

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИОННОГО СТОКА РЕК В БАССЕЙНЕ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ НА ФОНЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

О.С. Решетняк¹, А.А. Коваленко^{1, 2}

¹ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

² Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону
olgare1@mail.ru, arinaa.kov@gmail.com

Аннотация. В статье представлена изменчивость ионного стока рек в бассейне Северной Двины. Исследование проведено на основе гидрологических и гидрохимических данных государственной наблюдательной сети Росгидромета за многолетний период. Рассмотрены основные тенденции климатических изменений в бассейне и вызванные ими изменения водного и ионного стока Северной Двины и ее основных притоков. На основе коэффициентов ранговой корреляции Кендалла выявлены статистически значимые убывающие тенденции ионного стока за многолетний период. Модуль ионного стока в бассейне в целом изменялся от 27,1 (р. Сысола) до 110,8 т/(км²/г.) (р. Вызь). Выявлено, что повышенная нагрузка по модулю ионного стока характерна для участков рек Вызь, Вычегда и Пинега. Для большинства изученных участков рек бассейна Северной Двины и прибрежных акватории Белого моря нагрузка по ионному стоку условно оценивается как средняя.

Ключевые слова: Северная Двина, изменение климата, ионный сток, модуль ионного стока, макрокомпоненты, коэффициент корреляции, тенденции.

Введение. Степень влияния климатических изменений на процессы формирования ионного состава и качества речных вод широко обсуждается в последние годы. Актуальным является исследование возможной трансформации солевого состава речных вод и с последующим изменением качества воды, нарушением состояния абиотической и биотической составляющих водных экосистем в целом [1–5]. В условиях климатических вариаций могут изменяться процессы, происходящие на водосборах рек, может происходить изменение условий миграции элементов, смещение кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий. Все эти процессы влияют на химический состав речных вод и поступление элементов с водосборов северных и арктических рек [2; 3].

Природно-климатические особенности северных территорий определяют повышенную уязвимость наземных и водных экосистем к комплексному антропогенному воздействию. Среди них – суровость климата, широкое распространение неустойчивых многолетнемерзлых пород, слабый потенциал самоочищения почв и природных вод, низкие скорости биогеохимических процессов и самовосстановления нарушенных экосистем, бедное биологическое разнообразие [1–3].

Интенсивное природопользование и малая эффективность водоохранных мероприятий на водосборах рек являются основной причиной возникновения экологических угроз во всех природных средах. В атмосфере, пресных водах, почве идут геохимические изменения, которые могут привести к ряду экологических проблем и формированию очагов экологической напряженности различных масштабов. Суммарная антропогенная нагрузка на водосборах рек и влияние речного стока определяют серьезную угрозу хронического загрязнения северных морей, что со временем может привести к дестабилизации ледового покрова и серьезным глобальным последствиям [1–3].

Глобальные изменения климата с середины XX в. отражаются в колебаниях водного стока Северной Двины. В последние десятилетия ослабление зональной циркуляции и сохранение темпов летнего потепления в бассейне Северной Двины вопреки существующим прогнозам стока уже в ближайшее время может существенно повысить риск возникновения маловодий [6].

В целом климатические изменения в бассейне реки Северная Двина проявляются в статистически значимом увеличении среднегодовой температуры воздуха до 1 °С (за счет увеличения

температуры воздуха в летний период с последующим увеличением испарения на 20 %), увеличении количества осадков, выпадающих за зимний период (что приводит к увеличению годовой суммы осадков на 100 мм), увеличении водного стока за период март – май на 6,4 %. В итоге климат в бассейне «становится мягче, а в водном режиме, несмотря на стационарность, наблюдается перераспределение стока, равное 3 % от годового» [7].

В таком контексте на фоне происходящих глобальных климатических изменений становятся особенно актуальными исследования по оценке изменчивости ионного стока в бассейне Северной Двины для дальнейших прогнозных оценок степени загрязненности речных вод и состояния водных экосистем в целом.

Объект исследования. Северная Двина – одна из крупнейших рек Европейского Севера России, которая образуется при слиянии рек Сухона и Юг и впадает в Двинской залив Белого моря. Территория бассейна Северной Двины изобилует таежными лесами, болотными массивами, коренные берега основных наиболее крупных рек бассейна хорошо разработаны, глубины этих рек позволяют осуществлять судоходство в период открытого русла [8]. Спектр антропогенных факторов, воздействующих на поверхностные воды в бассейне Северной Двины, широк: здесь расположено около половины всех предприятий Архангельской области, которые загрязняют экосистему реки сбросами недостаточно очищенных сточных вод с высоким содержанием загрязняющих веществ. Более 85 % загрязнения приходится на предприятия целлюлозно-бумажной промышленности, а также на поступление загрязняющих веществ со всей площади водосбора реки и из других источников [9–11].

Материалы и методы. Исследование проведено на основе многолетних гидрологических и гидрохимических данных государственной наблюдательной сети Росгидромета [12; 13]. Исходные массивы данных включали информацию о расходах воды и концентрациях главных ионов (хлориды, сульфаты, гидрокарбонаты, ионы кальция, а также сумма ионов) за период с 1990 по 2017 г. Объектами исследования выступали 13 речных участков Северной Двины и ее притоков первого и второго порядка: р. Северная Двина (д. Абрам-

ково и с. Усть-Пинега), р. Вага (г. Вельск, д. Леховская), р. Вымь (с. Весляна), р. Вычегда (с. Малая Кужба), р. Луза (п. Красавино), р. Пинега (с. Кулогоры), р. Сухона (г. Тотьма, г. Сокол, г. Великий Устюг), р. Сысола (п. Первомайский), р. Юг (п. Подосиновец).

На основе значений концентраций веществ и годового стока воды выполнены расчеты ионного стока и модуля ионного стока рек бассейна Северной Двины. Расчет проводился прямым методом [14]. Показатель модуля ионного стока M (т/км² в год) рассчитывался по формуле: $M = G/F$, где G – количество перенесенного вещества за расчетный период, тыс. т; F – площадь водосбора, тыс. км². Статистически значимые временные тенденции значений ионного стока определяли с помощью коэффициента ранговой корреляции Кендалла и уровня доверительной вероятности, при котором эти коэффициенты могут считаться статистически значимыми (тенденция считалась значимой при $p < 0,05$).

Результаты и их обсуждение. Особенно заметное влияние современное глобальное потепление оказало на бассейны арктических рек, включая бассейн Северной Двины [15; 16]. Исследования авторов работы [17] показали, что климатические изменения, заметно трансформирующие водный сток, слабее сказываются на стоке ионов р. Северная Двина и его сезонной изменчивости. В период относительно холодного климата зимняя межень характеризовалась наименьшим стоком ионов в годовом цикле, однако при современном потеплении климата он сравнялся со стоком летне-осеннего сезона за счет увеличения доли более минерализованных «зимних» вод в общем речном стоке. Также было выявлено, что сток ионов кальция более чувствителен к изменениям климата [17]. Ионы кальция в речных водах являются доминирующими в ионном составе несмотря на то, что низовья Северной Двины расположены в западно-таежных ландшафтах без многолетней мерзлоты с хорошо промытыми, обедненными кальцием почвами и поверхностными грунтами [18].

Значения ионного стока рассчитаны за период 1990–2017 гг. по данным для 13 пунктов наблюдений на водосборе Северной Двины. Среднегодовые значения ионного стока и модуля ионного стока представлены в таблице 1.

Таблица 1. Среднегодовое ионное стока и модуль ионного стока рек бассейна Северной Двины (1990–2017 гг.) (составлено авторами)

| № | Река | Пункт | Ионный сток*, тыс. т / модуль стока*, т/(км ² в год) | Коэффициент корреляции Кендалла |
|----|----------------|-------------------|---|---------------------------------|
| 1 | Северная Двина | д. Абрамково | 13 336 / 60,6 | -0,62** |
| 2 | | с. Усть-Пинега | 23 355 / 66,7 | -0,29 |
| 3 | Вага | г. Вельск | 810 / 61,4 | -0,24 |
| 4 | | д. Леховская | 3252 / 74,1 | -0,18 |
| 5 | Вымь | с. Весляна | 2116 / 110,8 | -0,27 |
| 6 | Вычегда | с. Малая Кужба | 1287 / 48,6 | -0,046 |
| 7 | Луза | п. Красавино | 971 / 59,6 | -0,036 |
| 8 | Пинега | с. Кулогоры | 2626 / 71,6 | -0,24 |
| 9 | | г. Тотьма | 1788 / 51,4 | -0,57 |
| 10 | Сухона | г. Великий Устюг | 3134 / 63,7 | -0,14 |
| 11 | | г. Сокол | 811 / 52,3 | -0,18 |
| 12 | Сысола | пос. Первомайский | 317 / 27,1 | -0,13 |
| 13 | Юг | пос. Подосиновец | 948 / 62,0 | +0,007 |

Примечание: *даны среднегодовые значения; жирным шрифтом выделены наибольшие значения; **серым цветом отмечены статистически значимые убывающие тенденции (при $p < 0,05$ и выше).

В пределах бассейна Северной Двины абсолютные среднегодовые значения ионного стока изменяются в широких пределах: от 317 (р. Сысола) до 23 355 тыс. т (на замыкающем створе р. Северная Двина у с. Усть-Пинега). Поскольку исследуемые реки значительно различаются по водности и площади водосбора, для сравнительной оценки используется удельная характеристика – модуль ионного стока. По данному показателю наибольший ионный сток характерен для участков рек Вымь (с. Весляна), Вычегда (с. Малая Кужба) и Пинега (с. Кулогоры). Модуль ионного стока в бассейне в целом изменялся от 27,1 (р. Сысола) до 110,8 т/(км²/год) (р. Вымь).

В структуре ионного стока среди анионов преобладают гидрокарбонаты, доля которых составляет 47–64 %, сульфатов – 9–25 %, хлоридов – 1–4 %. Среди катионов преобладают ионы кальция (15–22 %). Такое распределение характерно для всех исследуемых участков рек за исключением р. Вымь (с. Весляна), где наблюдается преобладание сульфатов (43 % от ионного стока), а доля гидрокарбонатов в структуре ионного стока составляет 30 %.

Для количественной оценки тенденции временной изменчивости ионного стока рассчитан ранговый коэффициент корреляции Кендалла, характеризующий меру линейной связи между

годом и ионным стоком. Для всех исследуемых участков рек, за исключением р. Юг, формируется убывающий тренд (табл. 1). При этом статистически значимыми тенденциями являются изменения ионного стока всего лишь на трех участках: р. Северная Двина (с. Усть-Пинега и д. Абрамково) и р. Сухона (г. Тотьма). Обнаруженная корреляционная связь характеризуется как умеренная (для замыкающего створа р. Северная Двина у с. Усть-Пинега при $r = -0,29$) и тесная (для р. Северная Двина (д. Абрамково) и р. Сухона (г. Тотьма) при $r = -0,62$ и $r = -0,57$ соответственно) (рис. 1).

Крупные северные реки собирают воду, растворенные и взвешенные вещества с огромных водосборных площадей, связанных с различным видами хозяйственной деятельности, и транспортируют их далее вниз по течению до устьев рек. Компонентный состав ионного стока формируется под влиянием различных факторов, регионального и глобального масштабов, и рассматривается как источник регионального распространения химических веществ и факторов влияния на состояние и режим устьевых экосистем и прибрежных акваторий северных морей [14].

По изменчивости модуля ионного стока можно ориентировочно провести оценку уровня на-

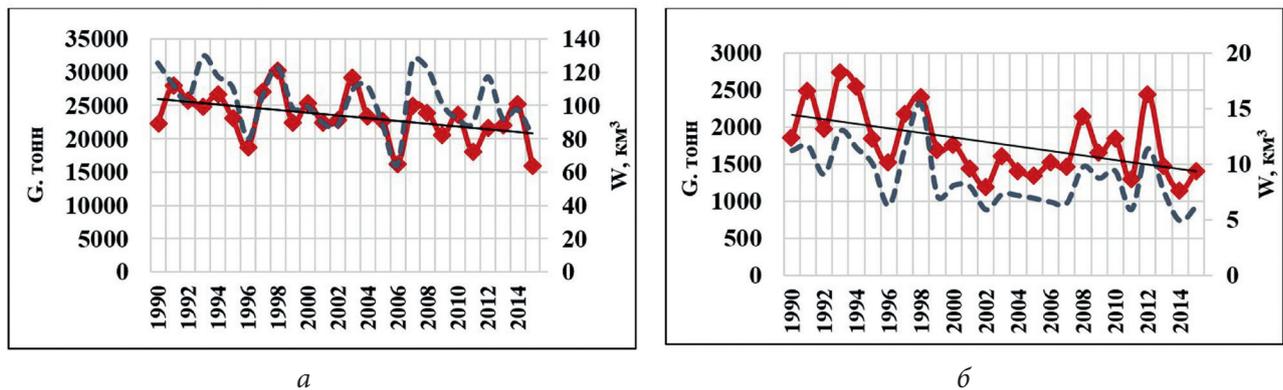


Рис. 1. Тенденции ионного стока на участках р. Северная Двина – с. Усть-Пинега (а) и р. Сухона – г. Тотьма (б) (сост. авторами)
Примечание: жирной линией отображен ионный сток, пунктирной – водный сток.

грузки на различных участках рек в бассейне Северной Двины и на прибрежные акватории Белого моря с использованием балльного подхода, широко применяемого в эколого-географических исследованиях. Полученные значения модуля ионного стока ранжированы и разделены на четыре равных интервала, соответствующие низкому, среднему, повышенному и высокому уровню нагрузки. Для исследуемых рек нагрузка меняется от «низкой» (для р. Сысола) до «высокой» (для р. Вымь). Для большинства изученных участков рек Северная Двина, Сухона, Луза, Юг, Вычегда, Вага (г. Вельск), а также на прибрежные акватории Белого моря нагрузка оценена как «средняя».

Заключение. Результаты проведенных исследований позволили оценить пространственно-временную изменчивость ионного стока Северной Двины и ее притоков за многолетний период.

В пределах речного бассейна абсолютные значения ионного стока изменялись в широких

пределах. Наибольших среднееголетних значений ионный сток достигал на замыкающем створе в районе с. Усть-Пинега (23 355 тыс. т). Среди притоков наибольшие величины абсолютных значений ионного стока характерны для рек Ваги и Сухоны. Для участков р. Северная Двина (с. Усть-Пинега и д. Абрамково) и р. Сухона (г. Тотьма) выявлен статистически значимый убывающий тренд умеренной и тесной силы связи соответственно.

Анализ изменчивости значений модуля ионного стока позволил оценить уровень нагрузки по ионному стоку на участках рек бассейна Северной Двины. Выявлено, что повышенная нагрузка по модулю ионного стока характерна для участков рек Вымь, Вычегда и Пинега. Для большинства изученных участков рек бассейна Северной Двины и прибрежных акваторий Белого моря нагрузка по ионному стоку условно оценивается как средняя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00366, <https://rscf.ru/project/24-27-00366/>.

Список литературы

1. Диагностический анализ состояния окружающей среды Арктической зоны Российской Федерации (Расширенное резюме) / отв. ред. Б.А. Моргунов. М.: Научный мир, 2011. 200 с.
2. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2007. 585 с.
3. Никаноров А.М., Иванов В.А., Брызгалов В.А. Реки Российской Арктики в современных условиях антропогенного воздействия. Ростов н/Д.: НОК, 2007. 280 с.
4. Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Антропогенная трансформация компонентного со-

става водной среды устьевой области р. Лены // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 2. С. 181–192.

5. Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Антропогенная трансформация структурной организации гидробиоценоза устьевой области р. Лены // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 3. С. 306–314.

6. Попова В.В. Современные изменения климата в крупных речных бассейнах на западе России: региональная структура и связь с глобальными тенденциями // Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (г. Екатеринбург, 22–24 апреля 2021 г.). С. 94–103.

7. Сумачев А.Э. Изменение климата и его влияние на гидрологический режим Северной Двины // Труды II Всерос. конф. «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» (г. Санкт-Петербург, 19–20 декабря 2018 г.). СПб.: Химиздат, 2018. С. 609–612.
8. Кузнецов В.С., Мискевич И.В., Зайцева Г.Б. Гидрохимическая характеристика крупных рек бассейна Северной Двины. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 195 с.
9. Новоселов А.П., Имант Е.Н., Артемьев С.Н., Матвеев Н.Ю., Матвеева А.Д. Современное состояние планктонных и бентосных сообществ устьевой области реки Северная Двина // Экология, 2022, № 3, С. 211–220.
10. Никаноров А.М., Соколова Л.П., Решетняк О.С., Кондакова М.Ю., Даниленко А.О. Антропогенная нагрузка на устьевую область р. Северная Двина // Метеорология и гидрология. 2010. № 4. С. 75–84.
11. Reshetnyak, O.S., Reshetnyak V.N., Vlasov K.G., Myagkova K.G. Long-Term Dynamics of the River Water Quality in the Northern Dvina Basin (Northwestern Russia) // Water Resources. 2018. Vol. 45(2). P. 93–98. DOI: 10.1134/S0097807818060283.
12. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 27.11.2023).
13. Государственный водный кадастр. Раздел 1. Поверхностные воды. Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши за 1990–2017 гг. Т. 1 (28). Вып. 9: Бассейны рек на территории Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми. Архангельск: ФГБУ «Северное УГМС».
14. Брызгалов В.А., Никаноров А.М., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. 161 с.
15. 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. Vol. 106. No. D4. P. 3321–3334. DOI: 10.1029/2000JD900444.
16. Hinzman L.D., Bettez N.D., Bolton W.R., Chapin F.S., Dyrgerov M.B. et al. Evidence and implications of recent climate change in Northern Alaska and other Arctic Regions // Climatic Change. 2005. Vol. 72. P. 251–298. DOI: 10.1007/s10584-005-5352-2.
17. Даниленко А.О., Георгиади А.Г. Влияние современного потепления на водный и ионный сток Северной Двины // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 64–69.
18. Malov A.A. Evolution of groundwater chemistry in coastal aquifers of the Northern Dvina basin (NW Russia) // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 98. P. 07016. DOI: 10.1051/e3sconf/20199807016.

VARIABILITY OF THE RIVER IONIC RUNOFF IN THE NORTHERN DVINA BASIN UNDER THE CONDITIONS OF CLIMATE CHANGES

O.S. Reshetnyak¹, A.A. Kovalenko^{1,2}

¹ Southern Federal University, Rostov-on-Don

² Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don
olgare1@mail.ru, arinaa.kov@gmail.com

Abstract. The article presents the variability of the ionic runoff of rivers in the Northern Dvina basin. The study was conducted on the basis of long-term hydrological and hydrochemical data from the state observation network of Roshydromet. The main trends in climate change in the basin and the resulting changes in the water and ion flow of the Northern Dvina River and its main tributaries are considered. Based on the Kendall rank correlation coefficients, statistically significant decreasing trends in the ion sink over a long-term period were identified. The modulus of ion runoff in the basin as a whole varied from 27,1 (the Sysola River) to 110,8 t/(km²/year) (the Vym River). It was revealed that an increased load in terms of ion runoff modulus is typical for sections of the Vym, Vychegda and Pinega Rivers. The load on ion runoff is conditionally estimated as medium for most of the studied sections of rivers in the Northern Dvina basin and coastal waters of the White Sea.

Keywords: the Northern Dvina River, the climate change, the ionic runoff, the ionic runoff modulus, macrocomponents, the correlation coefficient, trends.

References

1. *Diagnosticheskiy analiz sostoyaniya okruzhayushchey sredy Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii (Rasshirennoe rezyume)*. Otv. red. B.A. Morgunov. [Diagnostic analysis of the state of the environment of the Arctic zone of the Russian Federation (Extended summary)]. Editor-in-chief B.A. Morgunov. 2011. Moscow, "Nauchnyy mir": 200 p. (In Russian).
2. Geoekologicheskoe sostoyanie arkticheskogo poberezh'ya Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovaniya. Pod red. N.I. Alekseevskogo. [The geoecological state of the Arctic coast of Russia and the safety of environmental management. Edited by N.I. Alekseevsky]. 2007. Moscow, "GEOS": 585 p. (In Russian).
3. Nikanorov A.M., Ivanov V.A., Bryzgalo V.A. 2007. *Reki Rossiyskoy Arktiki v sovremennykh usloviyakh antropogennogo vozdeystviya*. [Rivers of the Russian Arctic in modern conditions of anthropogenic impact]. Rostov-na-Donu, "NOK": 280 p. (In Russian).
4. Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. 2011. [Anthropogenic transformation of the component composition of the aquatic environment of the estuary region of the Lena River]. In: *Vodnye resursy*. 38(2): 181–192. (In Russian).
5. Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. 2011. [Anthropogenic transformation of the structural organization of the hydrobiocenosis of the estuary region of the Lena River]. In: *Vodnye resursy*. 38(3): 306–314. (In Russian).
6. Popova V.V. 2021. [Modern climate changes in large river basins in Western Russia: regional structure and connection with global trends]. In: *Mat-ly Vseros. nauch.-prakt. konf. «Klimaticheskie izmeneniya i sezonnaya dinamika landshaftov»* (g. Ekaterinburg, 22–24 aprelya 2021 g.): 94–103. (In Russian).
7. Sumachev A.E. 2018. [Climate change and its impact on the hydrological regime of the Northern Dvina]. In: *Trudy II Vserossiyskoy konferentsii «Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya»* (g. Sankt-Peterburg, 19–20 dekabrya 2018 goda). Saint-Petersburg, "Himizdat": 609–612. (In Russian).
8. Kuznetsov V.S., Miskevich I.V., Zaytseva G.B. 1991. *Gidrokhimicheskaya kharakteristika krupnykh rek basseyna Severnoy Dviny*. [Hydrochemical characteristics of large rivers of the Northern Dvina basin]. Leningrad, "Gidrometeoizdat": 195 p. (In Russian).
9. Novoselov A.P., Imant E.N., Artemev S.N., Matveev N.Yu., Matveeva A.D. 2022. [The current state of planktonic and benthic communities in the estuary region of the Severnaya Dvina River]. In: *Ekologiya*. 3: 211–220. (In Russian).
10. Nikanorov A.M., Sokolova L.P., Reshetnyak O.S., Kondakova M.Yu., Danilenko A.O. 2010. [Anthropogenic load on the estuarine area of the river The Northern Dvina]. In: *Meteorologiya i gidrologiya*. 4: 75–84. (In Russian).
11. Reshetnyak, O.S. Reshetnyak V.N., Vlasov K.G., Myagkova K.G. 2018. Long-Term Dynamics of the River Water Quality in the Northern Dvina Basin (Northwestern Russia). In: *Water Resources*. 45(2): 93–98. (In Russian) DOI: 10.1134/S0097807818060283.
12. Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob'ektov (AIS GMVO). URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (accessed 27 November 2023). (In Russian).
13. Gosudarstvennyy vodnyy kadastr. Razdel 1. Poverkhnostnye vody. Ezhegodnye dannye o kachestve poverkhnostnykh vod sushi za 1990–2017 gg. 1(28). Vyp. 9: Basseyny rek na territorii

Arkhangel'skoy, Vologodskoy oblastey i Respubliki Komi. Arkhangelsk, FGBU "Severnoe UGMS" (In Russian).

14. Bryzgalo V.A., Nikanorov A.M., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. 2015. *Ust'evye ekosistemy krupnykh rek Rossii: antropogennaya nagruzka i ekologicheskoe sostoyanie*. [Estuarine ecosystems of large Russian rivers: anthropogenic load and ecological state]. Rostov-na-Donu: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 164 p. (In Russian).

15. Lammers R.B., Shiklomanov A.I., Vörösmarty C.J., Fekete B.M., Peterson B.J. 2001. Assessment of contemporary arctic river runoff based on observation discharge records. In: *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 106(D4): 3321–3334. DOI: 10.1029/2000JD900444 (In English).

16. Hinzman L.D., Bettez N.D., Bolton W.R., Chapin F.S., Dyurgerov M.B et al. 2005. Evidence and implications of recent climate change in Northern Alaska and other Arctic Regions. In: *Climatic Change*. 72: 251–298. DOI: 10.1007/s10584-005-5352-2 (In English).

17. Danilenko A.O., Georgiadi A.G. 2022. [The influence of modern warming on the water and ion runoff of the Northern Dvina]. In: *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 1: 64–69. (In Russian).

18. Malov A.A. 2019. Evolution of groundwater chemistry in coastal aquifers of the Northern Dvina basin (NW Russia). In: *E3S Web of Conferences*. 98: 07016. DOI: 10.1051/e3sconf/20199807016 (In English).