

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 504.064

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИОННОГО СТОКА РЕК БАСЕЙНА СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ ЗА МНОГОЛЕТНИЙ ПЕРИОД

О.С. Решетняк¹, А.А. Коваленко²^{1,2} Южный федеральный университет, Институт наук о Земле, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии² Гидрохимический институт Росгидромета, лаборатория региональной и экспериментальной гидрохимии¹ Доц., д-р геогр. наук; e-mail: olgarel@mail.ru² Мл. науч. сотр., лаборант-исследователь; e-mail: arinaa.kov@gmail.com

В статье представлены результаты исследования пространственно-временной изменчивости ионного стока в пределах бассейна Северной Двины. На основе многолетних гидрологических и гидрохимических данных государственной наблюдательной сети Росгидромета за 1990–2017 гг. рассчитаны значения ионного стока и модуля ионного стока в целом по сумме ионов и для отдельных компонентов: сульфатов, хлоридов, гидрокарбонатов и ионов кальция. В структуре ионного стока доминировали гидрокарбонаты, на долю которых приходилось до 50%. Наибольших среднемноголетних значений ионный сток р. Северной Двины достигал на замыкающем створе с. Усть-Пинега, а среди притоков наибольшие величины абсолютных значений ионного стока характерны для рек Ваги и Сухоны. На основе анализа значений коэффициентов ранговой корреляции Кендалла выявлены статистически значимые тенденции изменения ионного стока рек в бассейне Северной Двины. Показано, что динамика ионного стока за многолетний период характеризуется убывающим трендом только для отдельных участков Северной Двины и Сухоны, для большинства других участков рек изменения ионного стока во времени статистически незначимы. Анализ выявленных тенденций по стоку отдельных макрокомпонентов показал, что большинство из них являются убывающими и характеризуются по силе связи как умеренные. Возрастающие тренды выявлены только по стоку гидрокарбонатов в реках Лузе и Сыsole и по сульфатам в р. Сухоне. На основе сравнения модулей стока проведена оценка уровня нагрузки по ионному стоку на участки рек бассейна Северной Двины. Выявлено, что наибольшая нагрузка по стоку главных ионов характерна для р. Вымь, а наименьшая – для р. Сыsole. Для большинства исследуемых рек нагрузка по модулю ионного стока оценивается как средняя.

Ключевые слова: макрокомпоненты, модуль ионного стока, коэффициент корреляции, тенденции

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.3.4

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в условиях возможных экологических угроз для арктических экосистем широко обсуждается вопрос о степени влияния климатических изменений на процессы формирования ионного состава и качества поверхностных вод. При этом актуальным является исследование возможной трансформации солевого состава речных вод с последующим изменением качества воды, нарушением состояния абиотической и биотической составляющих водных экосистем в целом [Геоэкологическое состояние..., 2007; Никаноров и др., 2007, 2011a, 2011b]. На фоне происходящих климатических вариаций могут изменяться процессы, происходящие на водосборах рек, может изменяться геохимическая обстановка, обуслов-

ливающая миграцию элементов в ландшафтах, смещаться кислотно-щелочное и окислительно-восстановительное равновесие в водных экосистемах. Все эти процессы влияют на химический состав речных вод и поступление элементов с водосборов северных и арктических рек [Никаноров и др., 2007].

Изучение изменчивости ионного стока рек имеет большое значение в региональном и глобальном масштабе. Влияние антропогенных факторов может приводить к нарушению естественных потоков ионов и к изменениям в химическом составе речных вод [Kaushal et al., 2023, Wu et al., 2021]. Влияние климатических вариаций способствует изменению естественных процессов выветривания горных пород (в основном карбонатных, силикатных и сульфатных минералов) и, соответственно, влияет на

ионный сток рек в сторону возрастания стока основных ионов в речном переносе [Lechuga-Crespo et al., Gong et al., 2023].

Как известно, 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 [Геоэкологическое состояние..., 2007; Никаноров и др., 2007].

На фоне суровых природных условий интенсивное природопользование и малая эффективность водоохранных мероприятий на водосборах рек являются основной причиной возникновения экологических угроз во всех природных средах. В атмосфере, пресных водах и 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 с течением времени может привести к дестабилизации ледового покрова и серьезным последствиям [Геоэкологическое состояние..., 2007; Никаноров и др., 2007].

Глобальные изменения климата с середины XX в. отражаются в колебаниях водного стока Северной Двины. Сохраняется решающий вклад осадков, выпадающих в виде снега на водосборе, в формирование тенденций годового стока. 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 [Попова, 2021].

В целом климатические изменения в бассейне Северной Двины проявляются в статистически значимом увеличении среднегодовой температуры воздуха до 1°C (за счет увеличения температуры воздуха в летний период с последующим увеличением испарения на 20%), увеличении количества осадков, выпадающих за зимний период, 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» [Сумачев, 2018].

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 Сухоны и Юга и впадает в Двинский залив Белого моря. Ее общая протяженность составляет 744 км, площадь водосбора – 357 тыс. км². Территория бассейна Северной Двины изобилует таежными лесами и болотными массивами. Коренные берега основных наиболее крупных рек бассейна хорошо разработаны, глубины этих рек позволяют осуществлять судоходство в период открытого русла [Кузнецов и др., 1991].

Бассейн Северной Двины – лесной край, где профилирующей отраслью экономики является лесное хозяйство. Богатая сырьевая база и разветвленная речная сеть создали необходимые предпосылки для развития многоотраслевого лесохозяйственного комплекса, который включает заготовку, транспортировку, разнообразную обработку древесины и широко развитую целлюлозно-бумажную промышленность. Как уже отмечалось ранее [Reshetnyak et al., 2018], основной очаг хозяйственного освоения и использования водных ресурсов бассейна Северной Двины – Архангельская агропромышленная агломерация, включающая в себя города Архангельск, Новодвинск, Северодвинск и прилегающие населенные пункты с комплексами предприятий и космодромом «Плесецк». Среди основных отраслей и предприятий, оказывающих значительное влияние на состояние речных вод в бассейне Северной Двины, следует отметить предприятия судостроения, теплоэлектростанции и целлюлознобумажные комбинаты (ЦБК), расположенные в районах крупных городов (Котласский, Архангельский и Соломбальский ЦБК и др.), водный транспорт, предприятия агропромышленного комплекса и др. Таким образом, спектр антропогенных факторов, воздействующих на поверхностные воды в бассейне р. Северной Двины, достаточно широк.

Изучение ионного стока северных и арктических рек начало развиваться после организации регулярных наблюдений за химическим составом речных вод (особенно за макрокомпонентами) в арктической зоне в первой половине XX в. Первые данные об ионном стоке для бассейна р. Северной Двины появились в работах сотрудников Гидрохимического института [Алекин, Бражникова, 1964; Гидрохимический атлас СССР, 1990]. Представлены сведения начиная с 1940–1950-х гг. о суммарном стоке главных ионов в целом для водосбора Северной Двины (по результатам расчета на замыкающем

створе реки), но не рассматривалась изменчивость ионного стока в пределах частных водосборов и во временном аспекте. Позже в Гидрохимическом атласе СССР были представлены не только обобщающие картосхемы, отражающие пространственную изменчивость ионного стока в бассейне Северной Двины, но и стока органических и биогенных веществ, некоторых микроэлементов.

При сопоставлении более ранних данных об ионном стоке с современными результатами исследования существует ряд проблем. Так, по мнению авторов статьи [Коробов и др., 2022], это происходит из-за того, что чаще всего научные исследования охватывают небольшие промежутки времени, отборы проб единичны, неравномерны во внутригодовом формате. При проведении исследований, как правило, формируется свой перечень параметров и показателей. Использование большого разнообразия методик анализа, несогласованность сроков и периодичности отбора проб затрудняют сопоставление данных, полученных разными организациями и авторами.

В последние годы актуальность изучения ионного стока северных и арктических рек значительно усилилась в связи с влиянием на речные системы климатических изменений. Так, в серии работ А.О. Даниленко и А.Г. Георгиади [Даниленко, Георгиади, 2020; 2022] показано, что климатические изменения, трансформирующие водный сток р. Северной Двины, слабее влияют на сток ионов, который в период современного потепления климата увеличился примерно на 6–8%. При этом авторы отмечают, «что независимо от колебаний водности Северной Двины существует некоторое динамическое постоянство геохимической нагрузки ее водами на Белое море» [Даниленко, Георгиади, 2020].

Одной из обобщающих работ по оценке изменчивости стока растворенных веществ с водосбора реки Северная Двина можно считать атлас «Гидрохимический сток рек европейской части России» [Гидрохимический сток..., 2020]. В данном издании представлены современные данные о пространственной изменчивости ионного стока и его компонентов на водосборе.

Исходя из этого, цель данного исследования – проанализировать пространственно-временную изменчивость ионного стока и его отдельных компонентов в пределах бассейна р. Северной Двины за многолетний период (1990–2017) в современных условиях климатических изменений и антропогенного воздействия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено на основе собранных из архивных фондов многолетних гидрологических и гидрохимических данных государственной наблю-

дательной сети [Государственный водный кадастр; АИС ГМВО (<https://gmvo.skniivh.ru>)]. Исходные массивы данных включали информацию о расходах воды, минерализации воды (по сумме ионов) и концентрациях отдельных главных ионов (хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, ионов кальция) за период с 1990 по 2017 г.

Объекты исследования – участки р. Северной Двины и ее притоков первого и второго порядков (рис. 1). На участках рек, включенных в исследование, организованы пункты наблюдений, на которых проводят регулярные гидрологические и гидрохимические наблюдения. Периодичность гидрохимических наблюдений (и, соответственно, временное разрешение получаемых ежегодных данных) определяется категорией пунктов наблюдений и охватывает основные фазы водного режима реки. Пункты наблюдений на исследуемых участках рек относятся к III категории, и регулярность отбора проб воды в среднем составляет 6–7 раз в год. Наибольшей была частота отбора проб на замыкающем створе Северной Двины в районе с. Усть-Пинега и составила 11 проб в год, минимальной – на отдельных притоках – четыре пробы в год (по одной пробе в каждый сезон года). Таким образом, исходный массив гидрохимических данных для одного пункта наблюдений составил от 108 до 297 значений концентрации по одному показателю.

На основе значений о концентрациях макрокомпонентов и годового стока воды выполнен расчет ионного стока (по сумме главных ионов), стока макрокомпонентов и модулей стока для рек бассейна Северной Двины. Расчет ионного стока проводился прямым методом [Никаноров и др., 2007]. Сначала был проведен пересчет данных по расходам воды в пунктах наблюдений на водный сток (W , км³) с использованием коэффициента пересчета 0,0315. На основе данных о концентрациях главных ионов и значениях годового стока воды выполнен расчет ионного стока Северной Двины и ее основных притоков за определенный временной период по формуле [Никаноров и др., 2007]:

$$G = \sum_{i=1}^m W_i \bar{C}_i,$$

где G – количество перенесенного вещества за расчетный период, тыс. т; m – число интервалов расчетного периода; W_i – объем стока воды за i -й интервал расчетного периода, км³; $\bar{C}_i$ – средняя концентрация вещества за i -й интервал расчетного периода, мг/дм³. Допустимый предел точности для годового и сезонного стока составляет 10% [Рождественский, 1977].

Показатель модуля ионного стока M (т/км² в год) рассчитывался как отношение ионного стока к площади водосбора F (тыс. км²).

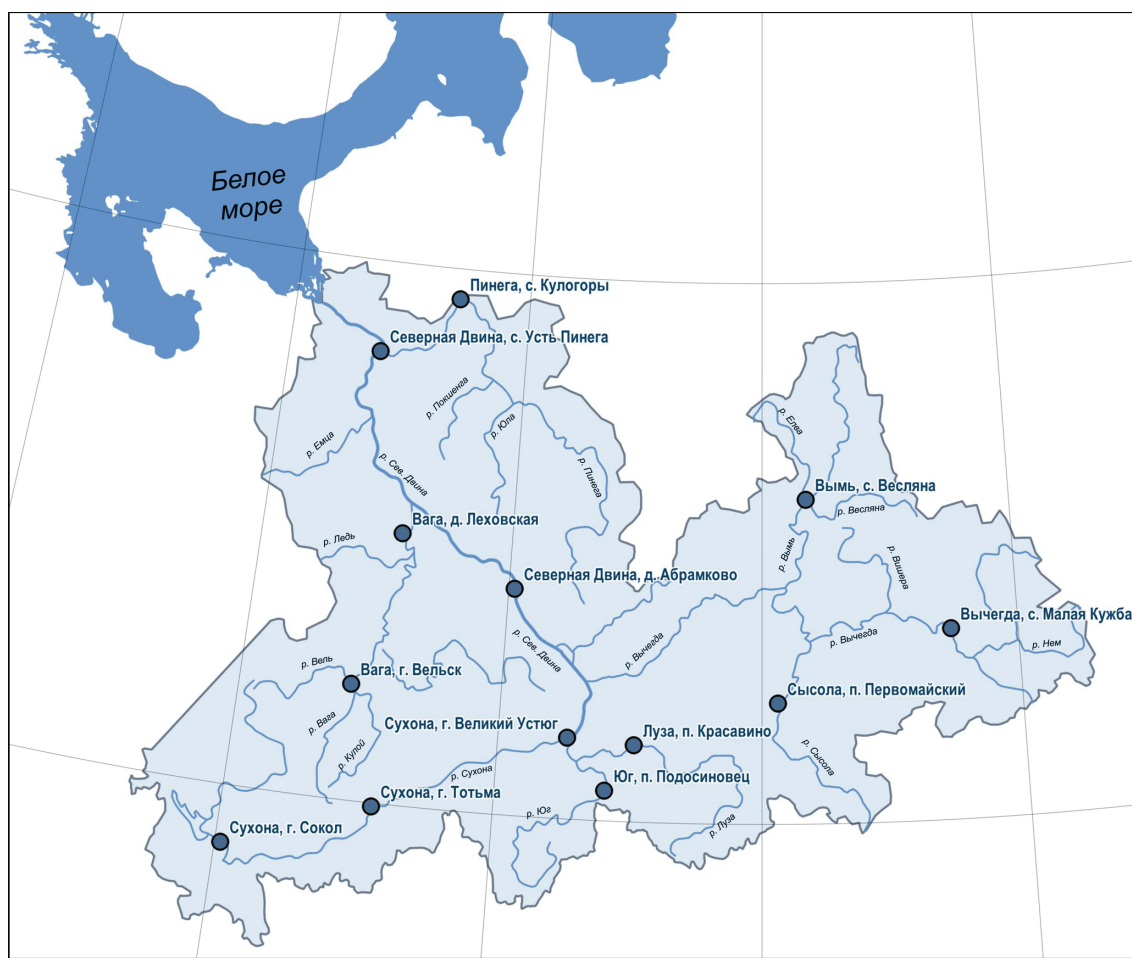


Рис. 1. Картограмма расположения пунктов наблюдений в бассейне Северной Двины.

Источник: составлено авторами

Fig. 1. The location map of observation points in the Northern Dvina River basin.

Source: compiled by the authors

Для статистической обработки многолетних данных были использованы MS Excel 365 и пакет прикладных программ Statistica 13.3. Статистически значимые временные тенденции значений ионного стока определялись с помощью коэффициента ранговой корреляции Кендалла и уровня доверительной вероятности, при котором эти коэффициенты могут считаться статистически значимыми (тенденция считалась значимой при $p < 0,05$). Силу связи оценивали по следующим критериям: при $r < 0,10$ связь считалась отсутствующей; $0,10 \leq r < 0,25$ – связь слабая; $0,25 \leq r < 0,50$ – связь средняя (умеренная); $0,50 \leq r < 0,75$ – связь сильная (тесная); $0,75 \leq r < 1,00$ – очень сильная связь [Комаров, Решетняк, 2024].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Временная изменчивость ионного стока и стока отдельных макрокомпонентов в бассейне Северной Двины. По мнению ряда авторов [Lammers

et al., 2001; Hinzman et al., 2005], современное глобальное потепление оказало заметное влияние на гидрологический режим рек арктической зоны в целом, включая и бассейн Северной Двины. Естественно, что многолетние изменения водности рек должны сказаться и на ионном стоке.

Исследования авторов работы [Даниленко, Георгиади, 2022] показали, что климатические изменения, заметно трансформирующие водный сток, слабее сказываются на стоке ионов р. Северной Двины и его сезонной изменчивости. В период относительно холодного климата (1947–1988) зимняя межень характеризовалась наименьшим стоком ионов в годовом цикле, однако при современном потеплении климата (1989–2016) он сравнялся со стоком летне-осеннего сезона за счет увеличения доли более минерализованных «зимних» вод в общем речном стоке. Также было выявлено [Даниленко, Георгиади, 2022], что сток ионов кальция более чувствителен к изменениям климата и по сравнению с периодом относительно холодного климата за период

современного потепления увеличился примерно на 6–8%. Рассматриваемый нами временной интервал попадает в «период современного потепления».

По данным авторов работы [Фролова и др., 2018], увеличение водного стока в бассейне Северной Двины небольшое и составляет в среднем 5%. В сезонной динамике стока северных рек отмечается положительная динамика зимнего (меженного) стока, когда рост зимних температур воздуха приводит к повышенному питанию грунтовых вод. Однако в бассейне Северной Двины меженный сток почти не меняется [Фролова и др., 2015]. Таким образом, роль и годового, и меженного стока в изменчивости ионного стока рек в бассейне будет минимальна, а определяющим будет изменение концентраций главных ионов в речных водах.

Значения ионного стока рассчитаны за период с 1990 по 2017 г. по данным для 13 пунктов наблюде-

ний на водосборе р. Северной Двины (т. е. для 13 речных участков). Диапазоны и среднемноголетние значения ионного стока и стока отдельных главных ионов (макрокомпонентов) представлены в таблице 1. В пределах бассейна Северной Двины абсолютные среднемноголетние значения ионного стока изменяются в широких пределах: от 317 (р. Сысола) до 23 355 тыс. т (на замыкающем створе р. Северной Двины у с. Усть-Пинега).

Что касается среднемноголетних значений стока отдельных макрокомпонентов, то наибольшие абсолютные значения для всех исследуемых рек наблюдаются по гидрокарбонатам (см. табл. 1): от 202 (р. Сысола, пос. Первомайский) до 11 810 тыс. т (р. Северная Двина, с. Усть-Пинега). Сток сульфатов варьирует от 29 до 4993 тыс. т, хлоридов – от 7,37 до 695 тыс. т, ионов кальция от 51,1 до 4066 тыс. т для исследуемых участков рек бассейна Северной Двины.

Таблица 1

Изменчивость ионного стока и стока макрокомпонентов рек бассейна Северной Двины за многолетний период (1990–2017)

№ п/п	Река	Пункт наблюдения	Ионный сток, тыс. т	Сток ионов G, тыс. т			
				Хлориды	Сульфаты	Гидрокарбонаты	Кальций
1	Северная Двина	д. Абрамково	9565–18 619	279–516	1394–2824	5445–8638	1510–2389
			13 336	393	2079	7020	2015
2	Северная Двина	с. Усть-Пинега	15 933–30 290	453–981	3149–6719	8362–14 758	2735–5256
			23 355	695	4993	11 810	4066
3	Вага	г. Вельск	535–1286	5,50–15,9	85,4–222	319–770	87,0–209
			810	9,84	135	484	144
4	Вага	д. Леховская	1942–4370	25,8–97,8	222–1017	1097–2479	328–737
			3252	56,5	606	1806	565
5	Вымь	с. Весляна	1505–2899	10,4–24,2	646–1435	411–905	322–621
			2116	16,4	910	641	467
6	Вычегда	с. Малая Кужба	934–1650	12,0–34,9	149–326	484–939	154–288
			1287	21,5	231	714	226
7	Луза	п. Красавино	512–1494	13,4–66,8	30,7–366	278–730	81,0–274
			971	35,5	167	489	167
8	Пинега	с. Кулогоры	1236–3702	25,5–63,0	256,4–1191	638–1745	213–754
			2626	46,4	666	1225	494
9	Сухона	г. Тотьма	1140–2745	27,1–161,9	151,5–531	587,5–1608	155–381
			1788	71	261	1058	272
10	Сухона	г. Великий Устюг	2195–4412	52,2–161	346–863	1132–2613	334–656
			3134	101	553	1652	460
11	Сухона	г. Сокол	525–1137	10,1–39,7	91,0–241	284–696	81,5–178,4
			811	23,8	148,5	439	123
12	Сысола	п. Первомайский	138–400	4,22–14,0	13,5–68,4	84,4–278	22,5–62,7
			317	7,37	29,0	202	51,1
13	Юг	п. Подосиновец	512–1494	13,4–66,8	30,7–366	278–730	81–274
			948	27,3	128	531	161

Примечание. В верхней строке представлен диапазон значений, в нижней – среднемноголетнее значение ионного стока или стока макрокомпонента.

Источник: составлено авторами.

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

Это вполне объяснимо, так как данные реки относятся к рекам восточно-европейского типа гидрологического режима с высоким весенним половодьем и имеют преимущественно гидрокарбонатно-кальциевый состав. Основными факторами формирования стока главных ионов являются естественные процессы выветривания пород, обогащенных карбонатами и гидрокарбонатами кальция и магния (известняков, доломитов и др.), а природным источником поступления сульфатов в речные воды являются как процессы

растворения сульфатных пород (преимущественно гипса), так и окисление сульфидов в составе залегающих горных пород [Алекин, Бражникова, 1964].

Для количественной оценки тенденций временной изменчивости ионного стока и стока отдельных макрокомпонентов рассчитан ранговый коэффициент корреляции Кендалла (табл. 2), характеризующий меру линейной связи между годом и ионным стоком. Для большинства исследуемых участков рек выявлено отсутствие тренда в динамике ионного стока. 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 убывающая тенденция (для замыкающего створа р. Северной Двины с. Усть-Пинега при $r = -0,29$) и тесной силы связи (для р. Северной Двины (д. Абрамково) и р. Сухоны (г. Тотьма) при $r = -0,62$ и $-0,57$ соответственно).

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции Кендалла, характеризующие тенденции изменения ионного стока и стока макрокомпонентов рек бассейна Северной Двины

№ п/п	Река	Пункт наблюдения	Коэффициент корреляции Кендалла				
			Сумма ионов	Хлоридов	Сульфатов	Гидрокарбонатов	Кальция
1	Северная Двина	д. Абрамково	$-0,62$	$-0,57$	$-0,54$	–	–
2	Северная Двина	с. Усть-Пинега	$-0,29$	$-0,42$	$-0,37$	–	–
3	Вага	г. Вельск	–	–	–	–	–
4	Вага	д. Леховская	–	$-0,40$	$-0,34$	–	–
5	Вымь	с. Весляна	–	$-0,46$	–	–	–
6	Вычегда	с. Малая Кужба	–	$-0,48$	$-0,29$	–	–
7	Луза	п. Красавино	–	–	–	0,37	–
8	Пинега	с. Кулогоры	–	–	$-0,27$	–	–
9	Сухона	г. Тотьма	$-0,57$	$-0,55$	0,55	$-0,72$	$-0,71$
10	Сухона	г. Великий Устюг	–	–	0,35	$-0,45$	–
11	Сухона	г. Сокол	–	–	0,43	$-0,51$	$-0,43$
12	Сысола	п. Первомайский	–	–	$-0,42$	0,43	–
13	Юг	п. Подосиновец	–	–	$-0,33$	–	–

Примечание. Статистически значимые тенденции (при $p < 0,05$ и выше): курсив – убывающая тенденция; жирный шрифт – возрастающая тенденция; прочерк – отсутствие статистически значимого тренда.

Источник: составлено авторами.

Корреляционный анализ является хорошим методом для предварительной оценки направленности временных тенденций ионного стока рек. Но в данном случае ожидать высокую линейную зависимость нельзя по причине значительной вариабельности гидрологических и гидрохимических

данных, влияющих на ионный состав речных вод множества факторов и процессов. Поэтому линейные тренды даже умеренной силы связи являются статистически значимыми для природных вод.

Для отдельных макрокомпонентов выявлено 23 статистически значимых тенденции из 52 возможных

(см. табл. 2). Из них четыре характерны для участков р. Северной Двины, а остальные – для притоков первого и второго порядков. Большинство (80%) из выявленных статистически значимых тенденций описываются убывающим линейным трендом.

Больше всего значимых тенденций выявлено для стока сульфатов (в 43,5% случаях): убывающие тенденции характерны для обоих участков Северной Двины, а также для участков рек Вага (д. Леховская), Вычегда (с. Малая Кужба), Пинега (с. Кулогоры), Сысола (пос. Первомайский) и Юг (пос. Подосиновец), а возрастающие – для всех трех исследуемых участков реки Сухоны. Выявленные тренды в основном характеризуются умеренной силой связи, кроме двух случаев: для Северной Двины (д. Абрамково) и р. Сухоны (г. Тотьма) характерна тесная связь с $r = -0,54$ и $0,55$ соответственно (см. табл. 2).

Для стока хлоридов выявлено шесть значимых убывающих тенденций умеренной (реки Северная Двина, Вага, Вымь и Вычегда) и тесной (р. Северная Двина, д. Абрамково; р. Сухона, г. Тотьма) силы связи. Для стока гидрокарбонатов выявлено пять значимых разнонаправленных тенденций: возрастающие умеренной силы (для рр. Лузы и Сысолы) и убывающие, характеризующиеся тесной связью (все участки р. Сухоны). Для стока ионов кальция ха-

рактерно отсутствие значимого тренда в 11 из 13 случаев (см. табл. 2), убывающий тренд умеренной силы наблюдается в р. Сухоне, г. Сокол, а тесной – в р. Сухоне, г. Тотьма.

Анализ выявленных временных, статистически значимых тенденций стока главных ионов позволяет отметить, что наиболее стабилен сток ионов на участке р. Ваги (г. Вельск). Здесь не обнаружено ни одной статистически значимой тенденции. Наибольшая изменчивость характерна для стока главных ионов на участке р. Сухоны (г. Тотьма), где отмечены убывающие тенденции по хлоридам, гидрокарбонатам и ионам кальция и возрастающая – по стоку сульфатов.

На рис. 2 продемонстрирован статистически значимый тренд снижения стока хлоридов (см. рис. 2А) и сульфатов (см. рис. 2Б) на устьевом участке р. Северной Двины (коэффициенты корреляции соответственно равны $-0,42$ и $-0,37$, что подтверждает зависимость умеренной силы). Статистически значимые тенденции снижения стока хлоридов (см. рис. 2В) и увеличения стока сульфатов (см. рис. 2Г), выявленные для участка р. Сухоны – г. Тотьма, также представлены на рис. 2 (коэффициенты корреляции соответственно равны $-0,55$ и $0,55$, что указывает на тесную связь).

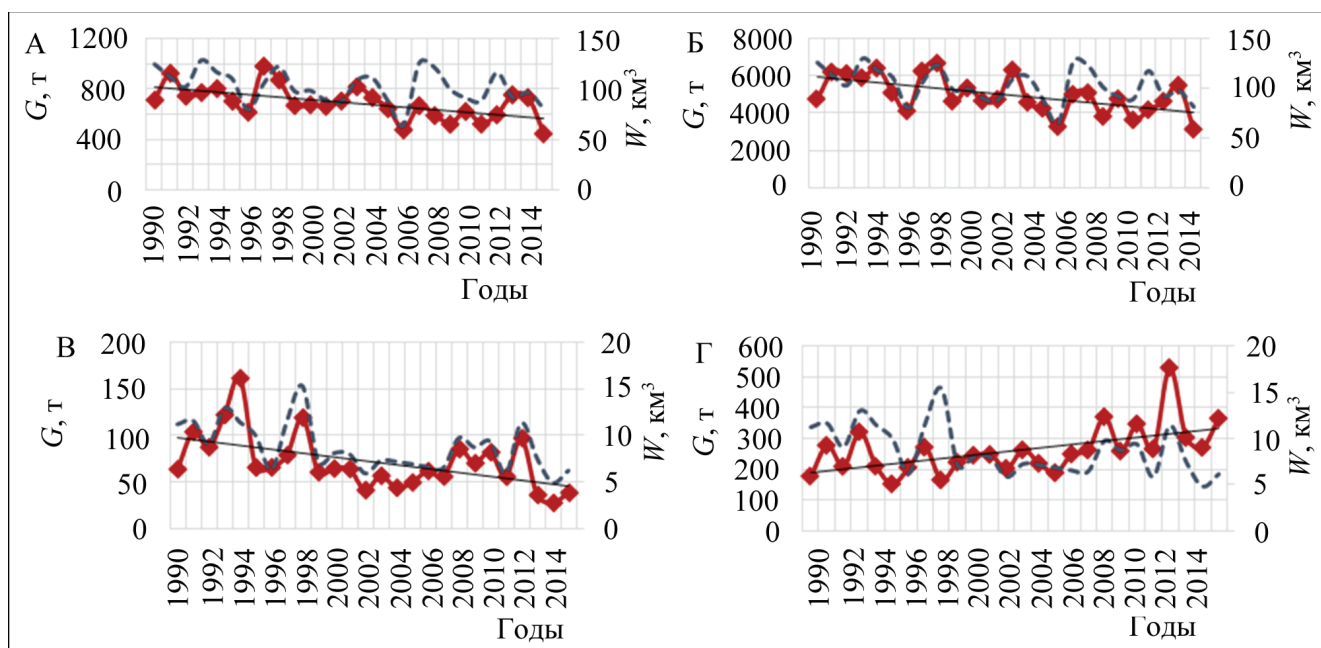


Рис. 2. Тенденции стока хлоридов (А, В) и стока сульфатов (Б, Г) на замыкающем створе реки Северной Двины (с. Усть-Пинега) (А, Б) и на участке реки Сухоны (г. Тотьма) (В, Г). Жирной линией отображен ионный сток, пунктирной линией – водный сток. Источник: составлено авторами

Fig. 2. Trends in chloride runoff (A, B) and sulfate runoff (Б, Г) at the outlet of the Northern Dvina River (the Ust-Pinega village) (А, Б) and at the Sukhona River section (the Totma city) (В, Г). The bold line shows the ionic runoff, the dotted line shows the water runoff. Source: compiled by the authors

Как известно, для большинства северных рек наблюдаются тесные обратные связи концентраций сульфатов и гидрокарбонатов с расходами воды [Алекин, Бражникова, 1964]. Это соблюдается при сохранении естественного режима функционирования речных систем. В современных условиях климатических изменений многие авторы отмечают, что на фоне повышения температуры воздуха для крупных рек Европейского Севера и Сибири происходит увеличение водного стока, что должно привести к снижению содержания гидрокарбонатов в воде рек при росте их водности (за счет увеличения разбавляющей способности). В нашем случае эта закономерность соблюдается для большинства участков рек, кроме рек Лузы и Сысолы.

Но, с другой стороны, климатические изменения связаны с ростом количества атмосферных осадков, выпадающих на водосборную территорию, что может приводить к усилению процессов химической денудации и, соответственно, к возрастанию содержания сульфатов и гидрокарбонатов в воде рек. Таким образом, происходит два противоположно направленных процесса, что приводит к тому, что в отдельных частях бассейна Северной Двины выявлен тренд на снижение содержания гидрокарбонатов в воде, в других – тренд на возрастание. Для оценки вклада данных процессов в изменчивость химического состава и ионного стока рек необходимы дополнительные исследования.

Река Сухона является наиболее загрязненным притоком Северной Двины из-за оказываемой на нее антропогенной нагрузки: река судоходна на всем протяжении и является связующим звеном между Северной Двиной, Невой и Волгой, обеспечивая выход судов на Волго-Балтийский водный путь. Основную часть грузооборота составляют лесные перевозки. Также большое количество загрязняющих веществ поступает со сточными водами предприятий г. Сокол и г. Тотма, наиболее негативное влияние оказывают сбросы целлюлозно-бумажных предприятий. Помимо этого, поступление загрязняющих веществ происходит за счет локальных источников и предприятий, расположенных на берегах Сухоны и ее притоков [Болотова, 1997].

Среди изученных рек выделяется Сухона, в ионном стоке которой выявлено больше всего значимых тенденций, а по стоку сульфатов сформировался возрастающий тренд на всех трех исследуемых участках. Причиной роста содержания сульфатов в воде р. Сухоны могут быть как природные факторы, так и локальные (точечное загрязнение частного водосбора).

Пространственная изменчивость модуля ионного стока и его отдельных компонентов в бассейне Северной Двины. Исследуемые реки от-

личаются друг от друга по длине и площади водосбора, поэтому для анализа пространственной изменчивости ионного стока целесообразно использовать удельный показатель – модуль химического стока (отношение значения химического стока к площади водосбора, $\text{т}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$) [Никаноров и др., 2007]. Среднемноголетние значения модуля стока для рек бассейна Северной Двины представлены в табл. 3.

Модули ионного стока, стока сульфатов и хлоридов, которые характеризуют интенсивность химической денудации на водосборе [Даценко и др., 2016], в бассейне р. Северной Двины достаточно высокие по сравнению с другими северными и арктическими реками. В первую очередь это связано с геологическим строением водосборов рек, отсутствием многолетнемерзлых пород и наличием на водосборе легковыщелачиваемых пород (в основном известняков и гипса).

По нашим расчетам, модуль стока хлоридов изменялся от 0,63 до 2,18 $\text{т}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$, модуль стока сульфатов – от 2,48 до 47,6 $\text{т}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$, модуль стока гидрокарбонатов – от 17,3 до 41,1 $\text{т}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ и модуль стока ионов кальция – от 4,36 до 24,5 $\text{т}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$. Модуль ионного стока в целом изменялся от 27,1 до 111 $\text{т}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ (см. табл. 3).

Крупные северные реки собирают воду, растворенные и взвешенные вещества с огромных водосборных площадей, связанных с различными 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 [Никаноров и др., 2007].

По изменчивости модуля ионного стока можно провести условную оценку уровня нагрузки 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 стока были ранжированы и разделены на четыре равных интервала, соответствующие низкому (1 балл), среднему (2 балла), повышенному (3 балла) и высокому (4 балла) уровню нагрузки по модулю ионного стока или по стоку соответствующего компонента. Оценка может быть выполнена как по отдельному показателю (макрокомпоненту), так и по сумме ионов (по модулю ионного стока). Результаты оценки нагрузки по стоку отдельных макрокомпонентов представлены на рис. 3, по ионному стоку – на рис. 4.

Таблица 3

Среднемноголетние значения модулей ионного стока и его отдельных компонентов для рек бассейна Северной Двины (1990–2017)

№ п/п	Река	Пункт наблюдения	Площадь водосбора, тыс. км ²	Модуль стока, т/(км ² ·год)				
				Сумма ионов	Хлориды	Сульфаты	Гидрокарбонаты	Кальций
1	Северная Двина	д. Абрамково	220	60,6	1,79	9,45	31,9	9,16
2	Северная Двина	с. Усть-Пинега	350	66,7	1,99	14,3	33,7	11,6
3	Вага	г. Вельск	13,2	61,4	0,75	10,2	36,7	10,9
4	Вага	д. Леховская	43,9	74,1	1,29	13,8	41,1	12,9
5	Вымь	с. Весляна	19,1	111	0,86	47,6	33,6	24,5
6	Вычегда	с. Малая Кужба	26,5	48,6	0,81	8,70	27,0	8,51
7	Луза	п. Красавино	16,3	59,6	2,18	10,2	30,0	10,2
8	Пинега	с. Кулогоры	36,7	71,6	1,26	18,1	33,4	13,5
9	Сухона	г. Тотьма	34,8	51,4	2,05	7,51	30,4	7,81
10	Сухона	г. Великий Устюг	49,2	63,7	2,05	11,2	33,6	9,36
11	Сухона	г. Сокол	15,5	52,3	1,54	9,58	28,3	7,91
12	Сысола	п. Первомайский	11,7	27,1	0,63	2,48	17,3	4,36
13	Юг	п. Подосиновец	15,3	62,0	1,78	8,36	34,7	10,6

Источник: составлено авторами.

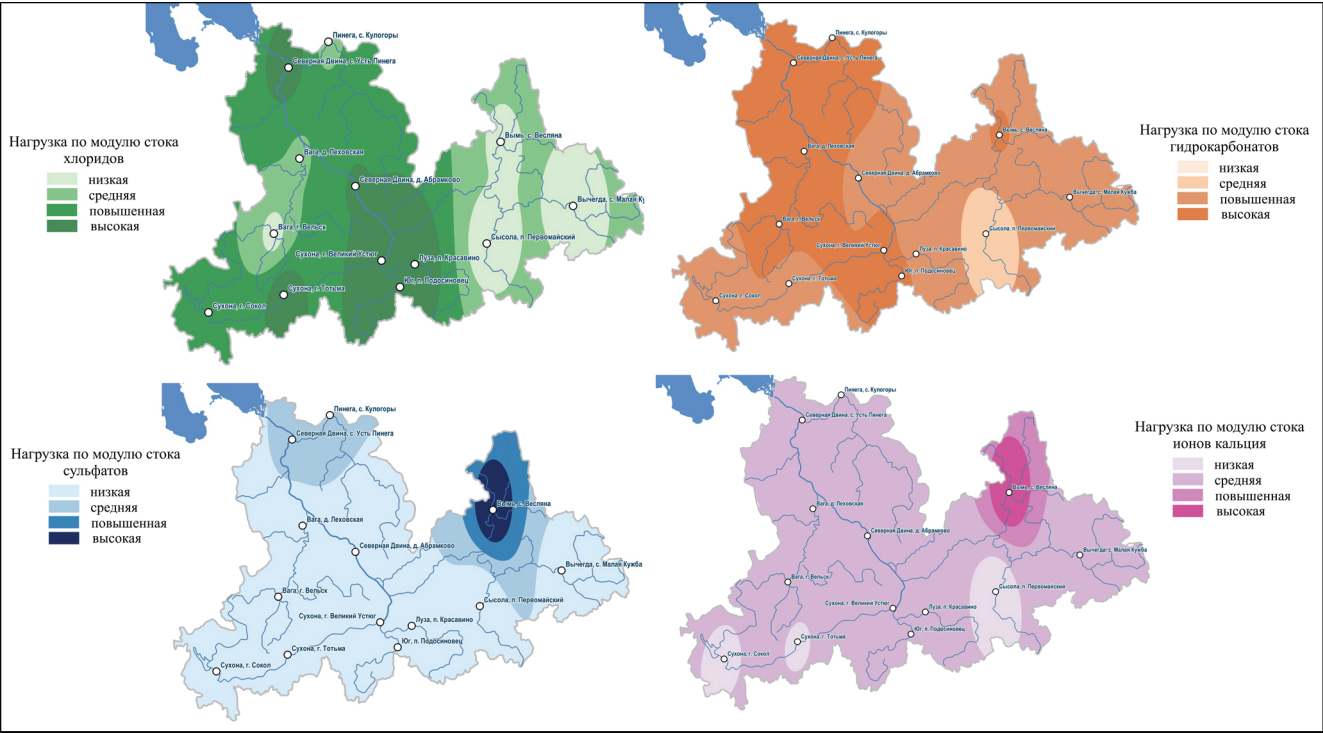


Рис. 3. Пространственная изменчивость нагрузки по модулю стока отдельных макрокомпонентов в бассейне реки Северной Двины. Источник: составлено авторами

Fig. 3. Spatial variability of the load by the runoff modulus of individual macrocomponents in the Northern Dvina River basin. Source: compiled by the authors

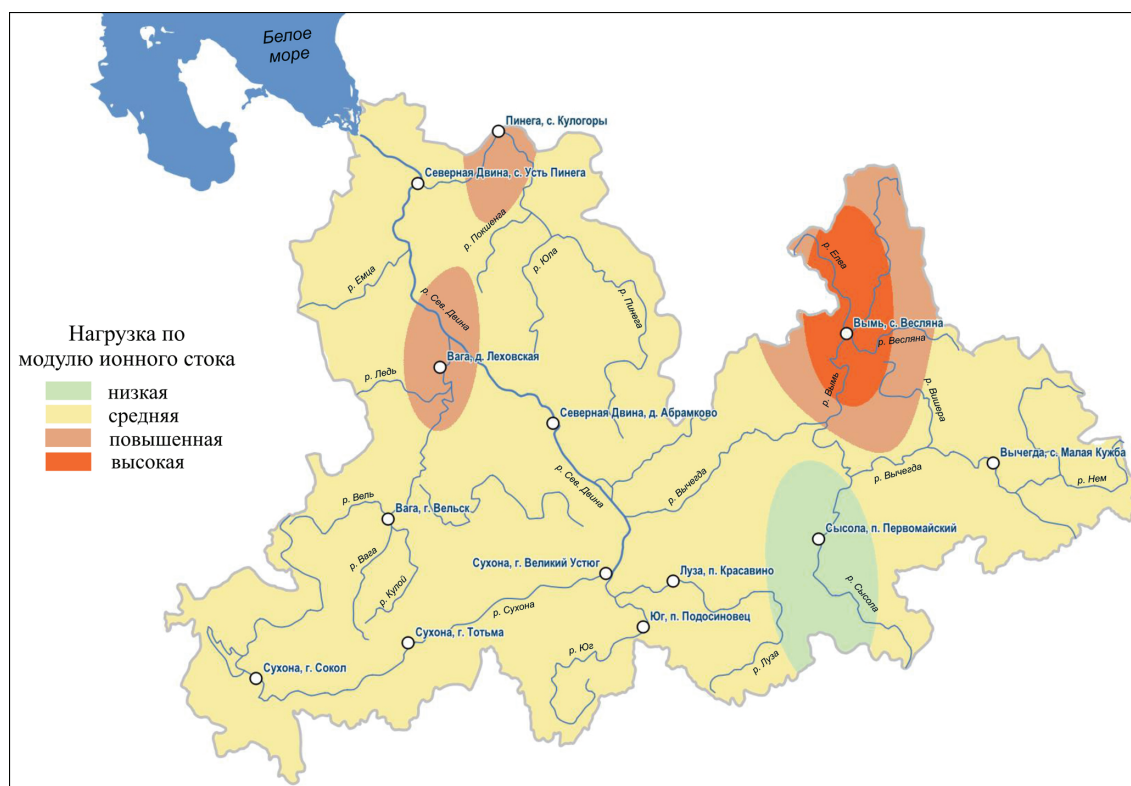


Рис. 4. Пространственная изменчивость нагрузки по модулю ионного стока в бассейне реки Северной Двины.

Источник: составлено авторами

Fig. 4. Spatial variability of the load by the ionic runoff modulus in the Northern Dvina River basin.

Source: compiled by the authors

По среднегодовым значениям модуля стока хлоридов под наибольшей нагрузкой находятся участки рек Северной Двины (с. Усть-Пинега и д. Абрамково), Сухоны (г. Великий Устюг и г. Тотьма), Лузы (п. Красавино) и Юга (п. Подосиновец), а наименьшей – участки рек Ваги (г. Вельск), Выми (с. Весляна), Сысолы (п. Первомайский) и Вычегды (д. Малая Кужба). По модулю стока сульфатов почти все исследуемые участки рек имеют низкую нагрузку, исключением являются участки рек Северной Двины (с. Усть-Пинега) и Пинеги (с. Кулогоры), где нагрузка оценивается как средняя, и участок Выми (с. Весляна) с высокой нагрузкой (см. рис. 3).

Нагрузка по модулю стока ионов кальция в большинстве случаев оценивается как средняя, за исключением участков р. Сухоны (г. Сокол и г. Тотьма) и р. Сысолы (пос. Первомайский), для которых нагрузка оценивается как низкая, а также р. Вымь (с. Весляна), где нагрузка оценивается как высокая. По модулю стока гидрокарбонатов на большинстве исследуемых участков рек нагрузка повышенная и высокая, и только для участка р. Сысолы (п. Первомайский) нагрузка оценивается как низкая (см. рис. 3).

Пространственное распределение нагрузки по модулю ионного стока представлено на рис. 4. Для исследуемых рек нагрузка меняется от низкой (Сы-

сола) до высокой (Вымь). Для большинства изученных участков рек Северной Двины, Сухоны, Лузы, Юга, Вычегды, Ваги (г. Вельск), а также на прибрежные акватории Белого моря нагрузка оценена как средняя.

Высокая нагрузка по модулю ионного стока и его компонентам на участке р. Выми у с. Весляна вероятно обусловлена природными факторами. «Несмотря на длительное промышленное освоение лесов на водосборе р. Выми, проводившееся во второй половине XX в., и современную разработку бокситового месторождения, состояние подавляющего большинства водотоков остается близким к естественному» [Захаров, Бознак, 2009].

Река Вымь является одним из крупных притоков р. Вычегды, относится к водоемам рыбохозяйственного использования. Река берет свое начало с южных склонов Тиманского кряжа, приближенность которого, по данным авторов [Батурина и др., 2020], оказывает сильное влияние на формирование химического состава не только р. Выми, но и в целом правых притоков р. Вычегды. Данным рекам характерны наибольшие показатели минерализации, а среди ионов доминируют катионы кальция и анионы гидрокарбонатов и сульфатов, при этом с повышением минерализации роль сульфатов увели-

чивается. В более ранних исследованиях [Власова, 1988] также было показано, что для ряда притоков характерен сульфатно-кальциевый состав вод за счет распространения в бассейнах этих рек гипсовых пород.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований позволили оценить пространственно-временную изменчивость ионного стока в бассейне р. Северной Двины за многолетний период. В пределах речного бассейна абсолютные значения ионного стока изменялись в широких пределах. Ближе к устьевому участку р. Северной Двины наблюдалось увеличение значений ионного стока. Наибольших средне-многолетних значений ионный сток достигал на замыкающем створе у с. Усть-Пинега (23 355 тыс. т). Среди притоков наибольшие величины абсолютных значений ионного стока характерны для рек Ваги и Сухоны. В структуре ионного стока доминировали гидрокарбонаты, на долю которых приходилось до 50%. Роль межгодовых колебаний годового и меженного стока в изменчивости ионного стока рек в бассейне минимальна и определяющим является изменение концентраций главных ионов в речных водах.

На основе результатов статистического анализа и расчета значений коэффициентов ранговой корреляции Кендалла выявлены статистически значимые тенденции изменения ионного стока в целом и стока отдельных макрокомпонентов для рек в бассейне Северной Двины. Среди выявленных тенденций изменения ионного стока большинство из них являются статистически незначимыми для большинства участков рек, убывающие тренды характерны для отдельных участков рек Северной Двины и Сухоны.

Анализ выявленных тенденций по стоку отдельных макрокомпонентов показал, что большинство из них являются убывающими и характеризуются по силе связи как умеренные. Больше всего статисти-

чески значимых трендов (и убывающих, и возрастающих) характерно для стока сульфатов. Все выявленные тенденции по стоку хлоридов являются убывающими, а возрастающие тренды выявлены только по стоку гидрокарбонатов в реках Лузе и Сысоле и по сульфатам в р. Сухоне.

Выявлено, что наиболее стабилен сток ионов на участке р. Ваги (г. Вельск), а наибольшая изменчивость характерна для стока главных ионов на участке р. Сухоны (г. Тотьма), где отмечены и убывающие тенденции по хлоридам, гидрокарбонатам, ионам кальция и возрастающая – по стоку сульфатов.

Анализ пространственной изменчивости значений модулей ионного стока, позволил выявить, что р. Северная Двина и отдельные ее притоки характеризуются относительно большими значениями модулей ионного стока, которые варьировали от 27,1 до 111 т/(км²·год). Выполнена условная оценка нагрузки по модулю стока отдельных макрокомпонентов и по ионному стоку в целом. Уровень нагрузки по стоку сульфатов и ионов кальция коррелирует с изменчивостью нагрузки на участках рек по модулю ионного стока. По стоку гидрокарбонатов и хлоридов отмечены различия.

В целом оценка уровня нагрузки по модулю ионного стока на исследуемых участках рек бассейна Северной Двины показала, что высокая нагрузка характерна для участка Выми, а низкая для участка Сысолы. Для Северной Двины, Сухоны, Лузы, Юга, Вычегды, Ваги (г. Вельск) нагрузка оценена как средняя, а для Ваги (д. Леховская) и Пинеги – как повышенная. Высокие значения модулей ионного стока в бассейне Выми обусловлены природными факторами формирования речного стока.

Результаты исследования могут быть использованы для оценки антропогенной нагрузки, качества воды на участках рек, а также для прогнозной оценки ионного стока и его возможного влияния на гидрохимический режим прибрежных морских акваторий Белого моря.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алекин О.А., Бражникова Л.В. Сток растворенных веществ с территории СССР. М.: Наука, 1964. 144 с.
- Батурина М.А., Кононова О.Н., Елсаков В.В. Гидробиологические характеристики рек Вычегодского бассейна в различных единицах ландшафтного деления // Принципы экологии. 2020. № 1. С. 4–26.
- Болотова Н.Л. Сухона: ресурсы и их использование // Тотьма: краеведческий альманах. 1997. Вып. 2. С. 588–596.
- Власова Т.А. Гидрохимия главных рек Коми АССР. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1988. 152 с.
- Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2007. 585 с.
- Гидрохимический атлас СССР. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. М., 1990. 110 с.

- Гидрохимический сток рек европейской части России: атлас / под ред. Р.Г. Джамалова, О.С. Решетняк, М.М. Трофимчука. М.: ИВП РАН, 2020. 155 с.
- Государственный водный кадастр. Раздел 1: Поверхностные воды. Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши за 1990–2017 гг. Том 1(28). Вып. 9: Бассейны рек на территории Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми. Архангельск: Изд-во ФГБУ «Северное УГМС».
- Даниленко А.О., Георгиади А.Г. Изменение водного и ионного стока Северной Двины в условиях современного потепления климата // Расширенные тезисы докладов II Всероссийской научной конференции с международным участием «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны», Москва, 25–27 ноября 2020 г., М.: ИГКЭ, 2020. С. 264–267.
- 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.
- Даценко Ю.С., Ефимова Л.Е., Заславская М.Б. и др. Ионный сток в арктические моря России // Российские полярные исследования. 2016. № 1(23). С. 12–15.
- Захаров А.Б., Бознак Э.И. Влияние освоения бокситовых месторождений на рыбное население водотоков Тимана // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера: материалы XXVIII Международной конференции 5–8 октября 2009 г. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 228–232.
- Комаров Р.С., Решетняк О.С. Пространственно-временная изменчивость ионного стока в бассейне р. Кубани // Геология и геофизика Юга России. 2024. № 14(3). С. 191–203.
- Коробов В.Б., Шевченко В.П., Котова Е.И. Нерешенные задачи исследования устьевой области Северной Двины // Океанологические исследования. 2022. Т. 50. № 2. С. 125–138.
- Кузнецов В.С., Мискевич И.В., Зайцева Г.Б. Гидрохимическая характеристика крупных рек бассейна Северной Двины. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 195 с.
- Никаноров А.М., Иванов В.А., Брызгалов В.А. Реки Российской Арктики в современных условиях антропогенного воздействия. Ростов на/Д: НОК, 2007. 280 с.
- Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Косменко Л.С. и др. Антропогенная трансформация компонентного состава водной среды устьевой области р. Лены // Водные ресурсы. 2011а. Т. 38. № 2. С. 181–192.
- Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Косменко Л.С. и др. Антропогенная трансформация структурной организации гидробиоценоза устьевой области р. Лены // Водные ресурсы. 2011б. Т. 38. № 3. С. 306–314.
- Попова В.В. Современные изменения климата в крупных речных бассейнах на западе России: региональная структура и связь с глобальными тенденциями // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов», 22–24 апреля 2021 г., Екатеринбург, 2021. С. 94–103.
- Рождественский А.В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 260 с.
- Сумачев А.Э. Изменение климата и его влияние на гидрологический режим Северной Двины // Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». СПб., 2018. С. 609–612.
- Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А. и др. Внутригодовое распределение стока равнинных рек европейской территории России и его изменение // Водное хозяйство России. 2015. № 4. С. 4–20.
- Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б. и др. Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек Российской Арктики // Вопросы географии. Сб. 145: Гидрологические изменения / под ред. В.М. Котлякова, Н.И. Коронкевича, Е.А. Барабановой. М.: Кодекс, 2018. С. 233–251.
- Gong S., Bai X., Luo G. et al. Climate change has enhanced the positive contribution of rock weathering to the major ions in riverine transport, *Global and Planetary Change*, 2023, vol. 228, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2023.104203.
- Hinzman L.D., Bettes N.D., Bolton W.R. 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.
- Kaushal S.S., Likens G.E., Mayer P.M. et al. The anthropogenic salt cycle. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, vol. 4, p. 770–784, DOI: 10.1038/s43017-023-00485-y.
- Lammers R.B., Shiklomanov A.I., Vörösmarty C.J. et al. 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.
- Lechuga-Crespo J.L., Sánchez-Pérez J.M., Sauvage S. et al. A model for evaluating continental chemical weathering from riverine transports of dissolved major elements at a global scale, *Global and Planetary Change*, 2020, vol. 192, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103226.
- Reshetnyak O.S., Reshetnyak V.N., Vlasov 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.
- Wu J., Xu N., Wang Y. et al. Global syndromes induced by changes in solutes of the world's large rivers, *Nature Communications*, 2021, vol. 12, DOI: 10.1038/s41467-021-26231-w.
- Электронный ресурс*
Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: <https://gmvo.skniihv.ru> (дата обращения 27.11.2023).

Поступила в редакцию 22.08.2024

После доработки 15.10.2024

Принята к публикации 12.03.2025

LONG-TERM SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF IONIC RUNOFF OF RIVERS IN THE NORTHERN DVINA RIVER BASIN

O.S. Reshetnyak¹, A.A. Kovalenko²

^{1,2} Southern Federal University, Institute of Earth Sciences, Department of Geoecology and Applied Geochemistry

² Hydrochemical Institute of Roshydromet, Laboratory of Regional and Experimental Hydrochemistry

¹ Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: olgarel@mail.ru

² Junior Scientific Researcher; Laboratory Research Assistant; e-mail: arinaa.kov@gmail.com

The article presents the results of the study dealing with the spatiotemporal variability of ionic runoff within the Northern Dvina River basin. Based on long-term hydrological and hydrochemical data collected from the state observation network of Roshydromet between 1990 and 2017, the values of ionic runoff and the modulus of ionic runoff have been calculated, both for the sum of ions and individually for specific components, namely sulfates, chlorides, bicarbonates, and calcium ions. Bicarbonates dominated in the structure of ionic runoff, accounting for up to 50%. The ionic runoff of the Northern Dvina River reached its highest average long-term values at the outlet section near the village of Ust-Pinega; among the tributaries, the highest absolute values of ionic runoff were characteristic of the Vaga and Sukhona rivers. Based on the analysis of the Kendall rank correlation coefficient values, statistically significant trends in the changes of ionic runoff have been identified for the rivers of the Northern Dvina River basin. It is shown that the long-term dynamics of ionic runoff is characterized by a decreasing trend only for certain sections of the Northern Dvina and Sukhona rivers; for most other river sections, temporal changes in ionic runoff are statistically insignificant. Analysis of the identified trends in the runoff of individual macrocomponents revealed that most of them are decreasing and have a moderate strength of association. Increasing trends were observed only for the runoff of bicarbonates in the Luza and Sysola rivers and for sulfates in the Sukhona River. Based on a comparison of runoff modulus, the ionic runoff load on various sections of the Northern Dvina River basin has been evaluated. It was revealed that the highest load of the main ions runoff is characteristic of the Vym River, and the lowest for the Sysola River. For most of the studied rivers, the load in terms of the ionic runoff modulus is estimated as average.

Keywords: macrocomponents, the ionic runoff modulus, correlation coefficient, trends

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (grant No. 24-27-00366, <https://rscf.ru/project/24-27-00366/>)

REFERENCES

- Alekin O.A., Brazhnikova L.V. *Stok rastvorenykh veshchestv s territorii SSSR* [The flow of dissolved substances from the territory of the USSR], Moscow, Nauka Publ., 1964. 144 p. (In Russian)
- Baturina M.A., Kononova O.N., Elsakov V.V. *Gidrobiologicheskie kharakteristiki rek Vychegodskogo basseina v razlichnykh edinitsakh landshaftnogo deleniya* [Hydrobiological characteristics of rivers of the Vychegda basin in various units of landscape division], *Printsipy ekologii*, 2020, no. 1, p. 4–26. (In Russian)
- Bolotova N.L. Sukhona: resursy i ikh ispol'zovanie [Sukhona: resources and their use], *Tot'ma: kraevedcheskii al'manakh*, 1997, no. 2, p. 588–596. (In Russian)
- Danilenko A.O., Georgiadi A.G. *Izmenenie vodnogo i ionnogo stoka Severnoi Dviny v usloviyakh sovremennogo potepeniya klimata* [Changes in water and ionic flow of the Northern Dvina River under the modern climate warming], Extended abstracts of reports of the II All-Russian scientific conference with international participation "Monitoring the state and pollution of the environment. Ecosystems and climate of the Arctic zone", Moscow, IGKE Publ., 2020, p. 264–267. (In Russian)
- Danilenko A.O., Georgiadi A.G. *Vliyanie sovremennogo potepeniya na vodnyi i ionnyi stok Severnoi Dviny* [The influence of modern warming on water and ionic flow of the Northern Dvina], *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2022, no. 1, p. 64–69. (In Russian)
- Datsenko Yu.S., Efimova L.E., Zaslavskaya M.B., Pakhomova O.M. *Ionnyi stok v arkticheskie morya Rossii* [Ionic flow into the Arctic seas of Russia], *Rossiiskie polynnye issledovaniya*, 2016, no. 1(23), p. 12–15. (In Russian)
- Frolova N.L., Kireeva M.B., Agafonova S.A. et al. *Vnutrigodovoe raspredelenie stoka ravninnykh rek evropejskoj territorii Rossii i ego izmenenie* [Intra-annual distribution of the flow of lowland rivers in the European territory of Russia and its change], *Vodnoe hozyajstvo Rossii*, 2015, no. 4, p. 4–20. (In Russian)
- Frolova N.L., Magrickij D.V., Kireeva M.B. et al. [Anthropogenic and climate-induced changes in water flow and ice phenomena for the rivers of the Russian Arctic], *Voprosy geografii, Sb. 145, Gidrologicheskie izmeneniya* [Problems in Geography, No. 145, Hydrological changes], V.M. Kotlyakov, N.I. Koronkevich, E.A. Barabanova (eds.), Moscow, Kodeks Publ., 2018, p. 233–251. (In Russian)
- Geoekologicheskoe sostoyanie arkticheskogo poberezh'ya Rossii i bezopasnost' prirodnopol'zovaniya* [Geoecological state of the Arctic coast of Russia and the safety of

- environmental management], N.I. Alekseevsky (ed.), Moscow, GEOS Publ., 2007, 585 p. (In Russian)
- Gidrokhimicheskii atlas SSSR [Hydrochemical Atlas of the USSR], Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR, Moscow, 1990, 110 p. (In Russian)
- Gidrokhimicheskii stok rek Evropeiskoi chasti Rossii, Atlas [Hydrochemical flow of rivers in the European part of Russia, Atlas], R.G. Jamalova, O.S. Reshetnyak, M.M. Trofimchuk (eds.), Moscow, IVP RAS Publ., 2020, 155 p. (In Russian)
- Gong S., Bai X., Luo G. et al. Climate change has enhanced the positive contribution of rock weathering to the major ions in riverine transport, *Global and Planetary Change*, 2023, vol. 228, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2023.104203.
- Gosudarstvennyi vodnyi kadastr, Razdel 1, Poverkhnostnye vody. Ezhegodnye dannye o kachestve poverkhnostnykh vod sushi za 1990–2017 gg. Basseiny rek na territorii Arkhangel'skoi, Vologodskoi oblastei i Respubliki Komi [State water cadastre, Section 1, Surface waters. Annual terrestrial surface water quality data 1990–2017, River basins in the Arkhangelsk, Vologda regions and the Komi Republic], Arkhangelsk, Severnoe UGMS Publ., vol. 1 (28), no. 9. (In Russian)
- Hinzman L.D., Bettez N.D., Bolton W.R. 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.
- Kaushal S.S., Likens G.E., Mayer P.M. et al. The anthropogenic salt cycle, *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, vol. 4, p. 770–784, DOI: 10.1038/s43017-023-00485-y.
- Komarov R.S., Reshetnyak O.S. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' ionnogo stoka v bassejne r. Kubani [Spatio-temporal variability of ionic runoff in the Kuban River basin], *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*, 2024, vol. 14(3), p. 191–203. (In Russian)
- Korobov V.B., Shevchenko V.P., Kotova E.I. Nereshennye zadachi issledovaniya ust'evoi oblasti Severnoi Dviny [Unsolved problems of studying the mouth area of the Northern Dvina River], *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2022, vol. 50, no. 2, p. 125–138. (In Russian)
- Kuznetsov V.S., Miskevich I.V., Zaitseva G.B. *Gidrokhimicheskaya kharakteristika krupnykh rek basseina Severnoi Dviny* [Hydrochemical characteristics of large rivers in the Northern Dvina River basin], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, 195 p. (In Russian)
- Lammers R.B., Shiklomanov A.I., Vörösmarty C.J. et al. 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.
- Lechuga-Crespo J.L., Sánchez-Pérez J.M., Sauvage S. et al. A model for evaluating continental chemical weathering from riverine transports of dissolved major elements at a global scale, *Global and Planetary Change*, 2020, vol. 192, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103226.
- Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. Antropogennaya transformatsiya komponentnogo sostava vodnoi sredy ust'evoi oblasti r. Leny [Anthropogenic transformation of components of the water environment in the mouth area of the Lena River], *Vodnye resursy*, 2011a, vol. 38, no. 2, p. 181–192. (In Russian)
- Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. Antropogennaya transformatsiya komponentnogo sostava vodnoi sredy ust'evoi oblasti r. Leny [Anthropogenic transformation of the structural organization of hydrobiocenosis in the mouth area of the Lena River], *Vodnye resursy*, 2011b, vol. 38, no. 3, p. 306–314. (In Russian)
- Nikanorov A.M., Ivanov V.A., Bryzgalo V.A. *Reki Rossiiskoi Arktiki v sovremennykh usloviyakh antropogennogo vozdeistviya* [Rivers of the Russian Arctic under modern anthropogenic influence], Rostov-on-Don, NOK Publ., 2007, 280 p. (In Russian)
- Popova V.V. [Modern climate changes in large river basins in western Russia: regional structure and relation to global trends], *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Klimaticheskie izmeneniya i sezonnaya dinamika landshaftov"* [Materials of the All-Russian scientific and practical conference "Climate changes and seasonal dynamics of landscapes"], 2021, p. 94–103. (In Russian)
- 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.
- Rozhdestvenskij A.V. *Ocenka tochnosti krivyyh raspredeleniya gidrologicheskikh kharakteristik* [Evaluation of the accuracy of distribution curves of hydrological characteristics], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1977, 260 p. (In Russian)
- Sumachev A.E. [Climate change and its impact on the hydrological regime of the Northern Dvina River], *Trudy II Vserossiiskoi konferentsii "Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya"* [Proceedings of the II All-Russian Conference "Hydrometeorology and Ecology: Achievements and Development Prospects"], St. Petersburg, 2018, p. 609–612. (In Russian)
- Vlasova T.A. *Gidrokhiymi glavnykh rek Komi ASSR* [Hydrochemistry of the main rivers of the Komi ASSR], Syktyvkar, Ural Department of RAS, Komi Scientific Center Publ., 1988, 152 p. (In Russian)
- Wu J., Xu N., Wang, Y. et al. Global syndromes induced by changes in solutes of the world's large rivers, *Nature Communications*, 202, vol. 12, DOI: 10.1038/s41467-021-26231-w.
- Zaharov A.B., Boznak E.I. [The impact of bauxite deposit development on fish population of the Timan watercourses], *Biologicheskie resursy Belogo morya i vnutrennih vodoemov Evropejskogo Severa* [Biologic resources of the White Sea and inner water bodies of the European North], *Materialy XXVIII Mezhdunarodnoj konferentsii 5–8 oktyabrya 2009 g.*, Petrozavodsk, KarNC RAN Publ., 2009, p. 228–232. (In Russian)

Web sources

- Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob'ektov (AIS GMVO) [Automated information system for state monitoring of water bodies (AIS GMVO)], URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (access date 11.27.2023). (In Russian)

Received 22.08.2024

Revised 15.10.2024

Accepted 12.03.2025