

Многолетние изменения водного и ионного стока Северной Двины и Печоры*

А.Г. Георгиади, А.О. Даниленко

Проанализированы многолетние ряды годового и сезонного стока воды и главных ионов реки Северной Двины у села Усть-Пинеги и реки Печоры у села Усть-Цильмы. Выявлены долговременные фазы повышенных и пониженных значений водного стока, продолжительность которых составляла от 9 до 50 лет, и определены их основные характеристики. Последовательность и границы смены контрастных фаз годового стока, стока половодья и летне-осеннего стока на Северной Двине, а на Печоре – годового стока и половодья практически совпадали. Разница среднего годового и сезонного стока воды в фазы его повышенных и пониженных значений находилась в пределах от 11 до 41%, а стока ионов 5–36%. Ионный сток контрастных фаз, как правило, отличается меньше, чем водный сток. Это вызвано обратным характером зависимости концентрации ионов от расхода воды, за счет чего формируется своеобразная отрицательная обратная связь, стабилизирующая интенсивность химической денудации на водосборах этих рек и стока главных ионов в моря даже при заметных колебаниях водного стока.

Ключевые слова: Северная Двина, Печора, водный сток, ионный сток, многолетние фазы изменений, разностно-интегральные кривые.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-60240) и федеральных бюджетных ассигнований (государственное задание №119021990093–8).

Введение

В связи с глобальным потеплением, начало которого относят к 1970–1980 гг. [1], большое внимание уделяется вопросам исследования многолетних изменений геостока арктических рек. В его состав, согласно С.Д. Муравейскому [2], входят сток воды, тепла, наносов, химических и биологических веществ, которые весьма чувствительны к происходящим климатическим изменениям [3–10]. При этом многолетние изменения составляющих геостока арктических рек (так же, как и рек других регионов) характеризуются периодами (фазами, согласно принятой в России терминологии [11]) их повышенных и пониженных значений разной продолжительности. Синхронные длительные фазы одного знака могут охватывать большие территории [12]. Эти контрастные

фазы характеризуются специфическими относительно стабильными водным режимом рек и состоянием речных, озерных и морских экосистем [13, 14].

В многолетних изменениях стока воды выявляются длительные периоды, продолжительность которых может составлять от 10–15 лет до многих десятилетий [4, 8, 12, 15–17]. Они, последовательно сменяя друг друга, представляют собой важную особенность многолетней динамики гидрологических характеристик, обусловленных климатическими изменениями, а разница в стоке таких контрастных фаз чаще всего оказывается статистически значимой. В этом отношении уже исследованы годовой и сезонный сток воды не только арктических рек, но и рек других регионов мира [15, 18, 19].

Что касается изучения длительных контрастных фаз других составляющих геостока, то они изучены существенно меньше, хотя очевидно, что изменения стока воды вызывают отклик соответствующего элемента геостока, тем более отчетливый, чем теснее его связь с расходом воды. Помимо природно-климатических факторов его изменчивость может быть в разной степени связана с влиянием антропогенных воздействий.



ГЕОРГИАДИ
Александр Георгиевич
Институт географии РАН



ДАНИЛЕНКО
Алеся Олеговна
Гидрохимический институт

В связи с вышеизложенным, основное внимание в статье уделено исследованию долговременных (продолжительностью 10–15 и более лет) фаз повышенного и пониженного годового и сезонного стока воды и связанного с ним стока главных ионов крупнейших арктических рек Европейской территории России – Северной Двины и Печоры.

Краткая характеристика речных бассейнов Северной Двины и Печоры

Замыкающий створ бассейна реки Северной Двины расположен на входе в устьевую область в 137 км от морского края дельты у села Усть-Пинеги, ниже впадения реки Пинеги. Он замыкает водосбор площадью 348 000 км², что составляет 97.5% площади всего водосбора этой реки. Это типично равнинная таёжная река, в бассейне которой отсутствуют многолетнемерзлые грунты [20]. Среднегодовая температура воздуха, осредненная для ее водосбора, составляет 1.4 °С, а годовой слой атмосферных осадков – 576 мм. Пункт наблюдений на р. Печоре у с. Усть-Цильмы расположен на расстоянии 425 км от устья и замыкает площадь водосбора, равную 248 000 км² (около 77% площади водосбора). В отличие от бассейна р. Северной Двины, водосбор р. Печоры расположен в пределах северо-та-

ёжной и тундровой физико-географических зон. На севере и северо-востоке бассейна р. Печоры распространены многолетнемерзлые грунты [20]. Среднегодовая температура воздуха составляет здесь –3.3 °С, а годовой слой атмосферных осадков – 534 мм (картосхемы бассейнов рек представлены на рисунке 1).

Питание исследуемых рек смешанное, с преобладанием снегового. Средние многолетние расходы воды р. Северной Двины составили:

- осредненные за весь год – 3 305 м³/с;
- за половодье (апрель – июль) – 6 517 м³/с;
- за летне-осенний период (август – ноябрь) – 2 389 м³/с;
- за зимнюю межень (декабрь – март) – 1 020 м³/с.

В качестве окончания половодья был принят июль, хотя на его спаде в этом месяце формировались значительные паводки, что приводило к высокой водности, которая, в свою очередь, оказывала существенное

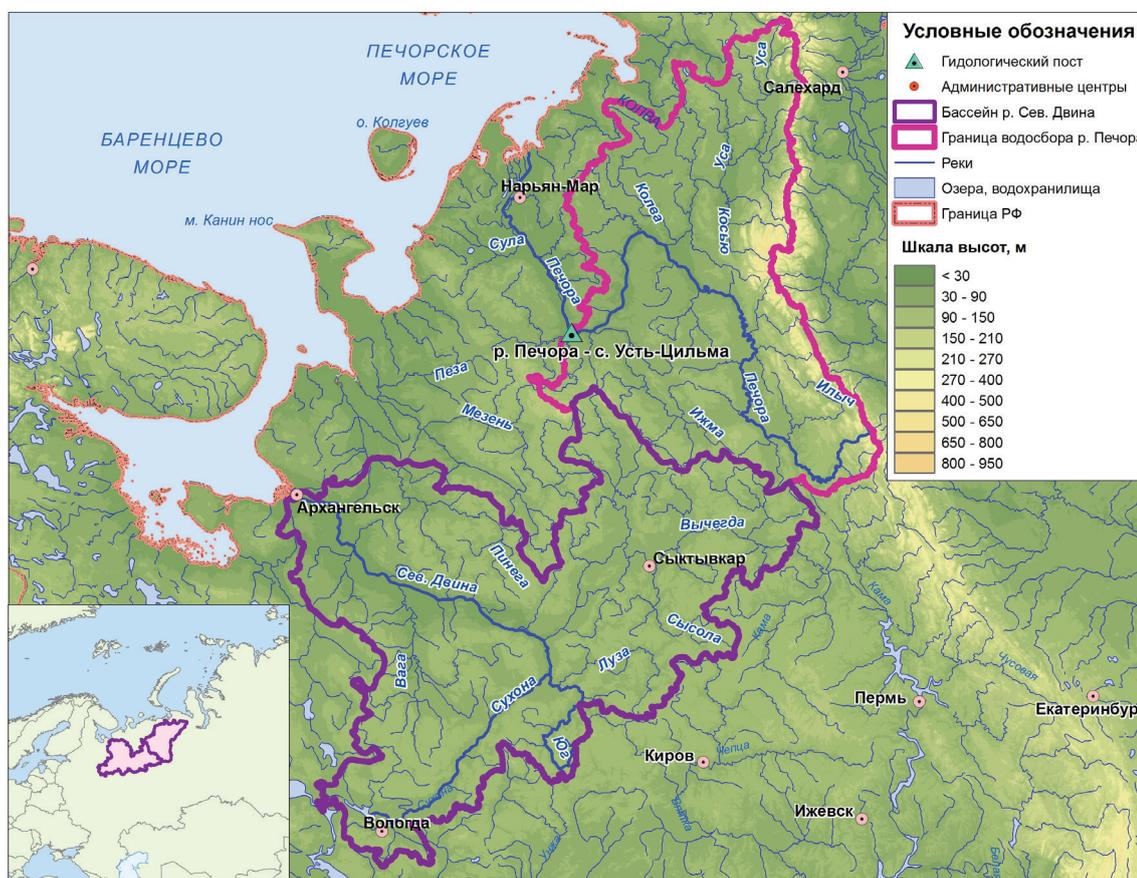


Рис. 1. Картосхема бассейнов Северной Двины и Печоры.

влияние на величину ионного стока. Границы гидрологических сезонов р. Печоры несколько отличаются: в створе с. Усть-Цильмы средний многолетний расход воды составляет:

- во время половодья (май – июнь) – 11 593 м³/с;
- за летне-осенний период (июль – октябрь) – 3 285 м³/с;
- в зимнюю межень (ноябрь – апрель) – 905 м³/с.

По ионно-солевому составу воды рек Северной Двины и Печоры относятся к гидрокарбонатному классу группы кальция ($\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$), то есть генетически воды связаны с подстилающими осадочными породами и продуктами их выветривания [21]. Суммарное содержание растворенных минеральных веществ в воде р. Северной Двины позволяет классифицировать ее как воду средней (200–500 мг/дм³) или малой (100–200 мг/дм³) минерализации в зависимости от сезона [22]. В период зимней межени суммарное содержание главных ионов достигает 292–438 мг/дм³ (в среднем 375 мг/дм³), в летне-осенний период находится в пределах 99–337 мг/дм³. В период соответствующий весеннему половодью, минерализация уменьшается до 57–144 мг/дм³ (в среднем 94 мг/дм³). Минерализация воды р. Печоры ниже и за год она может колебаться в пределах 18–256 мг/дм³, составляя в среднем 85 мг/дм³. Однако даже в период зимней межени, когда концентрации главных ионов достигают максимальных величин, вода р. Печоры остается маломинерализованной: 27–256 мг/дм³ (в среднем 170 мг/дм³). В период весеннего половодья содержание главных ионов так же, как и на Северной Двине, уменьшается до 18–157 мг/дм³ (в среднем 43 мг/дм³), в летне-осенний период находится в пределах 32–153 мг/дм³ (в среднем 82 мг/дм³).

Модуль ионного стока р. Северной Двины один из самых высоких среди рек водосбора Северного Ледовитого океана и составляет около 40 тонн/км² в год [23–25] при модуле водного стока, равном 9 л/с·км² [7]. Такой большой

модуль ионного стока обусловлен значительной водоносностью реки, отсутствием в ее бассейне многолетне-немерзлых пород, а также тем, что сам бассейн в значительной мере сложен такими легко выщелачиваемыми породами, как гипсы и известняки [24]. Модуль ионного стока р. Печоры меньше, около 30 тонн/км² в год [24], что связано как с наличием многолетне-немерзлых пород в ее бассейне, так и с особенностями влияния ее притоков. Право- и левобережные притоки р. Печоры существенно различаются по минерализации. Правобережные горные притоки маломинерализованные с водой устойчивого гидрокарбонатного состава, в то время как равнинным левобережным притокам свойственна более высокая минерализация и неустойчивость преобладающего анионного состава из-за наличия гипсового карста в их бассейнах. На ионном составе воды самой р. Печоры, за исключением участков непосредственно ниже впадения указанных притоков, это отражается мало, так как определяющими являются более многоводные правые притоки [20].

Материалы и методы исследования

Исследование изменений водного и ионного стока Северной Двины и Печоры выполнено по режимным данным о расходах воды и по гидрохимическим материалам, собранным Государственной наблюдательной сетью Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Начало наблюдений за химическим составом воды реки Печоры у села Усть-Цильмы датируется 1938 г. На реке Северной Двине у села Усть-Пинеги гидрохимические наблюдения начаты в 1947 г., но ряды наблюдений за расходом воды имеют значительно большую продолжительность – с 1882 г., а на р. Печоре у с. Усть-Цильмы – с 1932 г. Гидрохимическая информация, анализируемая в данной статье, получена по методикам, разработанным ФГБУ «Гидрохимический институт» [26].

Подход к анализу долговременных фаз в многолетних изменениях годового и сезонного стока воды, обусловленных изменениями климата, основан на использовании разностно-интегральных кривых и критериев статистической однородности средних значений стока, а также оценке характеристик выявленных фаз контрастной водности. Разностно-интегральные кривые представляют собой нарастающую сумму отклонений какой-либо характеристики от ее среднего многолетнего значения, рассчитанного для всего периода наблюдений [11, 12]. Они позволяют выявить долговременные фазы, в течение которых существенно чаще встречаются значения характеристики ниже или выше ее среднемноголетнего значения.

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

Как показали прежние исследования, временная граница смены долговременных фаз повышенных и пониженных значений стока воды, определенная на основе выявления минимальных и максимальных значений координат разностно-интегральных кривых и критериев однородности рядов по их средним значениям для контрастных фаз стока воды (параметрический критерий Стьюдента и непараметрический – Манна-Уитни-Пети), в подавляющем большинстве случаев совпадает, а различия средних значений стока оказываются статистически значимыми [8, 27, 28]. Те же границы контрастных фаз использовались и для расчета среднемноголетних величин ионного стока, так как его изменчивость тесно связана с гидрологическим режимом реки.

В условиях ограниченного набора гидрохимических данных, их неоднородности по частоте и срокам отборов за продолжительный период времени ионный сток рассчитывали корреляционно-регрессионным способом, учитывая характер связи между среднесуточным расходом воды (Q) и измеренными значениями концентраций (C). Такие зависимости можно рассматривать как сгла-

живающие функции, позволяющие, в известной мере, снизить ошибки расчетов, вызванные ошибками реальной практики гидрохимических полевых измерений и др. Были подобраны уравнения функций, описывающих связь гидрохимического режима с водным: поскольку для исследуемых рек характерно быстрое снижение минерализации в весенний период и нарастание – в межпаводковый, эта зависимость в большинстве случаев хорошо описывается степенными функциями, приведенными в *таблице 1*.

В замыкающем створе Северной Двины высокие значения индексов детерминации аппроксимирующих функций для большинства ионов и особенно для интегрального показателя – минерализации речной воды – косвенно свидетельствуют о ненарушенности природных процессов формирования гидрохимического режима этой реки. В то же время влияние антропогенного фактора на ионный состав воды р. Печоры, по всей видимости, выражено сильнее,

Таблица 1. Статистические характеристики зависимостей $C=f(Q)$ в р. Северной Двине у с. Усть-Пинеги и р. Печора у с. Усть-Цильмы

Компоненты ионного стока	Число пар ($Q; C$)	Уравнение связи $C=f(Q)$	Индекс детерминации, r^2	Ошибка аппроксимации, %
р. Северная Двина у с. Усть-Пинеги				
Кальций	572	$C=2\,732.8 \cdot Q^{-0.566}$	0.88	15.7
Магний	572	$C=646.69 \cdot Q^{-0.567}$	0.73	27.2
Натрий и калий	202	$C=151.74 \cdot Q^{-0.446}$	0.25	97.4
Гидрокарбонаты	602	$C=7\,839.3 \cdot Q^{-0.562}$	0.89	14.2
Сульфаты	608	$C=6\,298.4 \cdot Q^{-0.653}$	0.77	24.8
Хлориды	608	$C=529.95 \cdot Q^{-0.591}$	0.66	30.2
Минерализация	568	$C=15\,112 \cdot Q^{-0.558}$	0.89	15.1
р. Печора у с. Усть-Цильмы				
Кальций	470	$C=501.68 \cdot Q^{-0.468}$	0.68	30.5
Магний	431	$C=118.25 \cdot Q^{-0.454}$	0.58	42.1
Натрий и калий	424	$C=58.656 \cdot Q^{-0.344}$	0.30	88.4
Гидрокарбонаты	515	$C=2912 \cdot Q^{-0.519}$	0.76	28.0
Сульфаты	508	$C=55.268 \cdot Q^{-0.25}$	0.25	48.5
Хлориды	513	$C=32.190 \cdot Q^{-0.273}$	0.34	38.7
Минерализация	434	$C=2\,784 \cdot Q^{-0.447}$	0.76	23.0

что нашло свое отражение в искажении естественной связи гидрохимического режима с водным. Величины индексов детерминации в целом ниже даже для «литогенных» катионов и анионов (гидрокарбонатов, ионов магния и кальция), а для «антропогенно чувствительных» ионов (хлоридов, сульфатов, одновалентных катионов), даже наиболее подходящая для аппроксимации степенная функция объясняет изменчивостью расхода воды не более 25–34% изменчивости концентраций ионов.

Из-за неудовлетворительной аппроксимации гидрохимических данных степенными функциями по ряду главных ионов представляется более предпочтительным использование прямого метода расчета ионного стока. Однако детальный анализ внутригодового распределения концентраций показывает, что этот подход также будет давать большую ошибку. Так, например, в Северной Двине в зимний период и во время весеннего половодья концентрации одновалентных катионов колеблются в очень близких пределах, в то время как в водном стоке наблюдается шестикратная разница. В связи с этим было принято решение использовать для главных ионов единый подход, однако следует иметь в виду, что ошибка для полученных оценок изменчивости стока отдельных макрокомпонентов достаточно велика.

Используя ежедневные данные о среднесуточном расходе воды в качестве аргумента найденных функций, мы получили ежедневные ряды расчетных значений концентраций растворенных химических веществ и использовали их для вычислений суточного ионного стока (G) и его отдельных компонентов по

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

где W_i – водный сток за сутки, км³; C_i – среднесуточная концентрация вещества, тонн/км³; n – множество суток в году; i – порядковый номер элемента множества n .

Для расчета ионного стока за год и за сезон суммировали значения суточного химического стока в соответствующие расчетные периоды. Сезонный ионный сток рассчитан с округлением до месяца.

Результаты и обсуждение

Последовательность смены контрастных фаз годового стока, стока половодья и летне-осеннего стока р. Северной Двины характеризовалась сходными чертами, тогда как их динамика для зимнего стока происходила во многом по-другому (рисунки 2, таблица 2).

Для летне-осеннего и годового стока с 1880-х гг. наблюдалась продолжительная фаза их повышенного стока, а для половодья ее предваряла относительно короткая фаза пониженного стока. С 1930-х гг. чередовались контрастные фазы, последовательно сменявшие одна другую, при этом общая продолжительность фаз пониженной водности была существенно больше, особенно для летне-осеннего стока. Для зимнего стока сначала наблюдалась фаза, для которой среднее значение стока было близко к норме летне-осеннего стока для всего периода наблюдений. После чего с начала 1900-х гг. наступила относительно короткая фаза пониженного стока, а ее в начале 1920-х гг. сменила фаза повышенного стока такой же продолжительности. Вслед за ней последовала достаточно продолжительная фаза пониженного стока, после которой в конце 1970-х гг. наступила столь же продолжительная фаза повышенного зимнего стока. Во многом асинхронный характер чередования контрастных фаз зимнего и летне-осеннего стока на Северной Двине заметно отличается.

На Печоре границы контрастных фаз стока половодья и годового стока практически совпадают (представлено на рисунке 3 и в таблице 2). При этом следует иметь в виду, что так же, как и на Северной Двине, последовательность смены и границы контрастных фаз зимнего стока существенно отличаются от динамики фаз стока других сезонов и годового стока.

На Печоре выявляются лишь два длительных периода, когда фазы зимнего стока и годового и половодного стока совпадали по знаку. В 1932–1947 гг. (когда наблюдался их пониженный сток) и в 1989–2008 гг. (повышенный сток). При этом в течение почти сорока лет (1950–1988 гг.) для зимнего стока не наблюдалось сколько-нибудь длительных периодов, средний сток которых существенно отличался от его среднего значения, рассчитанного для всего периода наблюдений. Также и многолетняя динамика контрастных фаз стока летне-осеннего сезона отличалась от динамики фаз стока других сезонов года и года в целом. Для стока этого сезона сначала наблю-

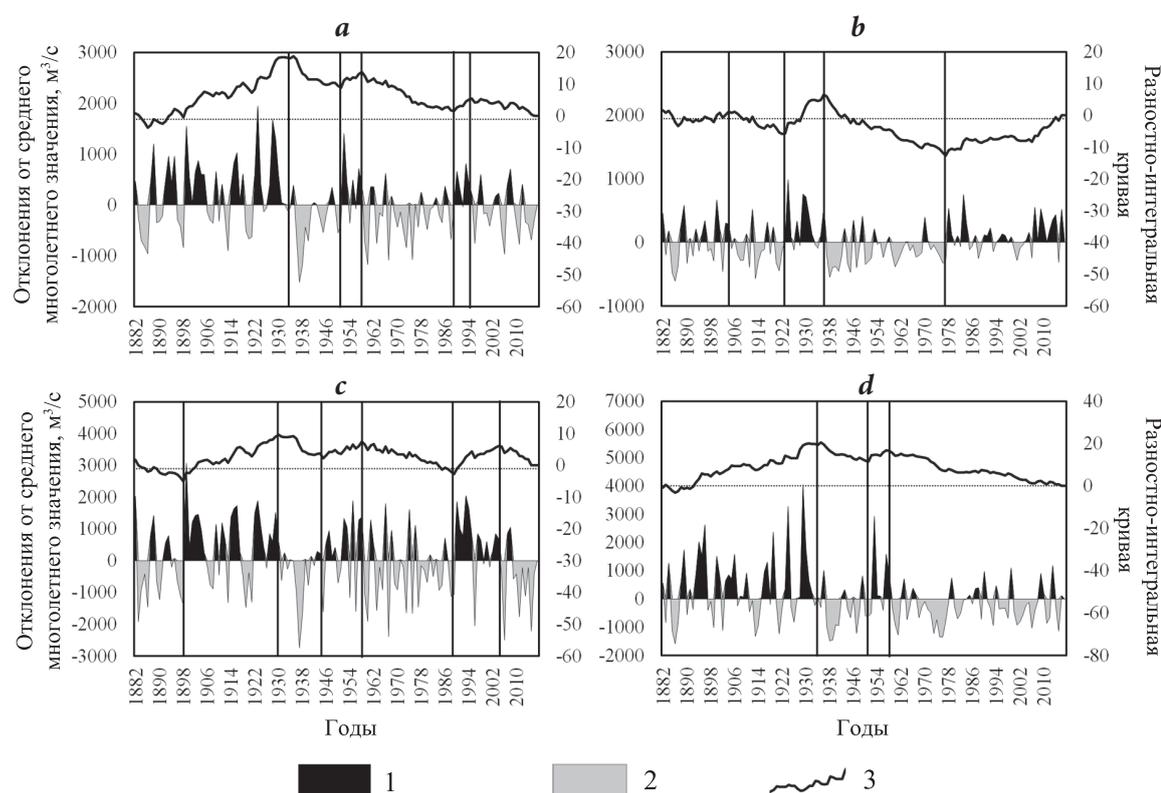


Рис. 2. Сток р. Северной Двины у с. Усть-Пинега: в среднем за год (а), в зимний период (б), в период половодья (с) и в летне-осенний период (д) в отклонениях от среднего многолетнего значения и в координатах разностно-интегральной кривой. Отклонения от среднего многолетнего значения: 1 – положительные, 2 – отрицательные, 3 – разностно-интегральная кривая. Вертикальные линии – границы фаз контрастной водности.

далась фаза пониженного стока, которая в 1962 г. сменилась на продолжительную фазу повышенного стока. При этом длительные фазы одного знака за летне-осенний сезон, половодье и год наблюдались лишь в фазу их повышенного стока в 1981–2008 гг., летне-осеннего и зимнего стока также в фазу их повышенных значений в 1989–2009 гг.

На Северной Двине и Печоре в течение относительно длительных периодов фазы одного знака наблюдались:

- для половодного стока – в 1935–1945 гг., 1967–1980 гг. и 1989–2004 гг.;
- для зимнего стока в 1936–1947 гг. и 1989–2016 гг.;
- для летне-осеннего стока в 1935–1961 гг. и 2009–2016 гг.;
- для годового стока лишь в 1934–1947 гг.

Продолжительность контрастных фаз на Северной Двине и на Печоре соответственно варьирует в пределах:

- для стока половодья – 9–32 и 11–25 лет;
- для летне-осеннего стока – 16–49 и 29–49 лет;
- для зимнего стока – 14–41 года и 17–28 лет;
- для годового стока – 16–50 и 17–28 лет.

Разница среднего стока воды для долговременных фаз его повышенных и пониженных значений (относительно значений характерных для фаз по-

ниженного стока) составляет соответственно на Северной Двине и Печоре для годового стока 17 и 11%; зимнего – 34 и 41%; летне-осеннего – 38 и 12%; стока половодья – 16 и 13% (данные представлены в таблице 3).

Так как связь гидрохимического режима с водным на реках Северной Двине и Печоре сохраняется даже в условиях антропогенной нагрузки, чередование периодов повышенного и пониженного стока воды должно было сказаться как на общем объеме ионного стока, так и на стоке отдельных его составляющих по сезонам годового цикла (таблицы 4 и 5).

В замыкающем створе р. Северной Двины изменения годового химического стока при переходе от фазы повышенного водного стока к фазе пониженного водного стока характеризуется сравнительно менее выраженными различиями по сравнению со стоком воды. Слабая реакция ионного стока объясняется, с одной стороны, обратным харак-

Таблица 2. Характеристика контрастных фаз пониженного и повышенного водного стока рек Северной Двины у с. Усть-Пинеги и Печоры у с. Усть-Цильмы

Фазы водного стока	Границы фаз, календарные годы, (продолжительность фаз, лет), средний расход воды, м³/с			
	Весеннее половодье	Летне-осенний период	Зимняя межень	Год
р. Северная Двина у с. Усть-Пинеги				
Фазы пониженного водного стока	1882–1898 (17) 6 257	1936–1951 (16) 1 922	1905–1922 (18) 899	1936–1951 (16) 2 930
	1931–1945 (15) 5 985	1959–2016 (48) 2 108	1937–1977 (41) 874	1959–1989 (31) 3 085
	1959–1989 (31) 6 128	—	—	1996–2016 (21) 3 146
	2006–2016 (11) 5 833	—	—	—
Фазы повышенного водного стока	1899–1930 (32) 7 069	1887–1935 (49) 2 815	1923–1936 (14) 1 296	1886–1935 (50) 3 560
	1946–1958 (9) 6 919	1952–1958 (7) 3 054	1978–2016 (29) 1 121	1952–1958 (7) 3 738
	1990–2005 (16) 7 090	—	—	1990–1995 (6) 3 698
р. Печора у с. Усть-Цильмы				
Фазы пониженного водного стока	1936–1956 (21) 10 767	1933–1961 (29) 3 094	1933–1949 (17) 736	1932–1948 (17) 3 204
	1969–1980 (12) 10 708	—	—	1967–1980 (24) 3 349
Фазы повышенного водного стока	1957–1967 (11) 12 271	1962–2010 (49) 3 460	1989–2016 (28) 1 036	1949–1966 (18) 3 564
	1981–2015 (25) 12 148	—	—	1981–2008 (28) 3 673
Фаза водного стока, близкого к его среднему многолетнему значению	—	—	1950–1988 (39) 885	—

тером зависимости концентрации ионов от расхода воды. С другой стороны, фаза пониженного или повышенного годового стока складывается из совокупностей фаз пониженного или повышенного стока в отдельные сезоны, противоположно направленное изменение которых может нивелировать изменения химического стока за год в целом.

В р. Печоре у с. Усть-Цильмы, напротив, изменения ионного стока при смене фаз водности выражены хорошо и становятся особенно заметны в период зимней межени, повторяя тенденции, характерные для

водного стока. Однако, как и в случае с Северной Двиной, различия в ионном стоке между контрастными фазами проявляются значительно слабее, чем в водном стоке. Прирост значений стока главных ионов в фазы повышенной водности возрастает на 24–36% в зависимости от иона, в то время как расход воды в эти же периоды увеличивается на 41%. В остальные гидрологические сезоны различия между контрастными фазами сглажены. Так, увеличение расхода воды на 12% в летне-осенний период и на 13% – в период весеннего половодья сопровождается увеличением стока главных ионов на 10–14 и 11–15% соответственно. В целом же более слабая изменчивость химического стока р. Печоры на фоне более заметной изменчивости водного стока обусловлена теми же причинами, что и для р. Северной Двины.

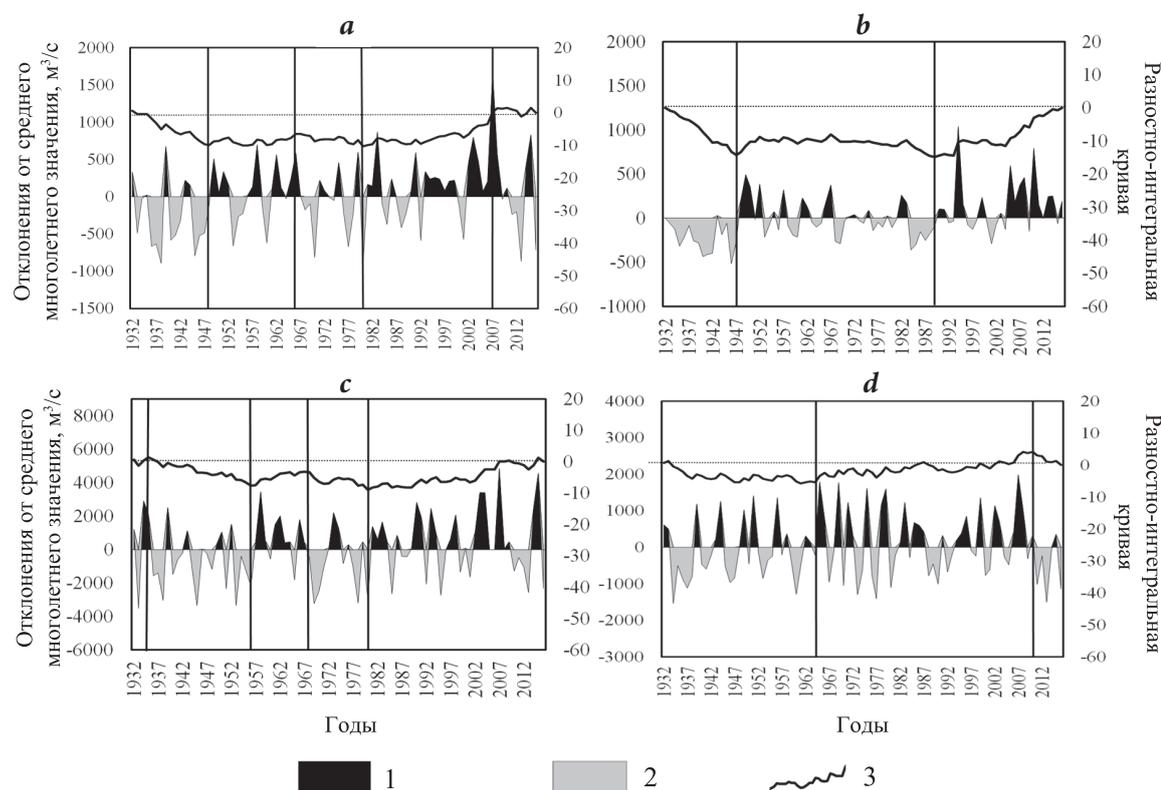


Рис. 3. Сток р. Печоры у с. Усть-Цильмы: в среднем за год (а), в зимний период (b), в период половодья (с) и в летне-осенний период (d) в отклонениях от среднего многолетнего значения и в координатах разностно-интегральной кривой. Отклонения от среднего многолетнего значения: 1 – положительные, 2 – отрицательные, 3 – разностно-интегральная кривая. Вертикальные линии – границы фаз контрастной водности.

Таблица 3. Средние значения расходов воды р. Северной Двины у с. Усть-Пинеги и р. Печоры у с. Усть-Цильмы для контрастных фаз (м³/с), их абсолютная (D) и относительная разни́ца (D_{отн}, относительно водного стока в фазу его пониженных значений)

Фазы водного стока	Весеннее половодье	Летне-осенний период	Зимняя межень	Год
р. Северная Двина у с. Усть-Пинеги				
Фаза повышенного водного стока	7 051	2 845	1 178	3 593
Фаза пониженного водного стока	6 085	2 062	882	3 067
D, м³/с	966	783	296	526
D _{отн} , %	16	38	34	17
р. Печора у с. Усть-Цильмы				
Фаза повышенного водного стока	12 179	3 460	1 036	3 631
Фаза пониженного водного стока	10 745	3 094	736	3 270
D, м³/с	1 434	367	300	361
D _{отн} , %	13	12	41	11

Внутригодовое распределение объема ионного стока при переходе от фазы пониженной к повышенной водности изменяется мало. В р. Северной Двине на период весеннего снегового половодья (с учетом летних дождевых паводков в июле) приходится приблизительно 43% годового ионного стока, что существенно меньше соответствующей доли годо-

вого стока воды (65%). В фазу пониженной водности доля ионного стока летне-осеннего периода близка к доле зимней межени (29 и 27%). В фазу повышенной водности эти различия более выражены: на летне-осенний период приходится 32%, а на

Таблица 4. Ионный сток р. Северной Двины в створе с. Усть-Пинеги в контрастные фазы водного стока (в таблице приведены среднемноголетнее значение и стандартное отклонение выборочных данных $G_{cp} \pm \sigma$)

Фаза водности	Ионный сток ($G_{cp} \pm \sigma$), млн тонн в год и сезоны						
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Σ _{ионов}
Год в целом							
пониженного водного стока	2.69±0.19	0.61±0.04	0.71±0.05	7.82±0.53	3.31±0.22	0.45±0.03	15.84±1.08
повышенного водного стока	2.89±0.23	0.66±0.05	0.76±0.06	8.41±0.68	3.54±0.28	0.48±0.04	16.92±1.30
ΔG_{cp} , %	+7.1	+6.5	+6.8	+7.5	+6.8	+6.5	+6.8
Половодье							
пониженного водного стока	1.17±0.08	0.26±0.02	0.30±0.02	3.36±0.23	1.41±0.09	0.19±0.01	6.74±0.46
повышенного водного стока	1.24±0.08	0.27±0.02	0.32±0.02	3.57±0.24	1.50±0.10	0.20±0.01	7.10±0.49
ΔG_{cp} , %	+6.4	+5.3	+6.1	+6.3	+6.0	+5.8	+5.2
Летне-осенний период							
пониженного водного стока	0.78±0.10	0.18±0.02	0.21±0.03	2.27±0.30	0.96±0.12	0.13±0.02	4.62±0.59
повышенного водного стока	0.90±0.17	0.21±0.04	0.24±0.04	2.66±0.53	1.10±0.20	0.15±0.02	5.40±0.95
ΔG_{cp} , %	+15.0	+13.7	+14.5	+17.1	+14.4	+13.9	+16.9
Зимняя межень							
пониженного водного стока	0.72±0.07	0.17±0.01	0.19±0.02	2.11±0.19	0.90±0.08	0.12±0.01	4.29±0.39
повышенного водного стока	0.80±0.08	0.19±0.02	0.21±0.02	2.33±0.24	0.99±0.10	0.14±0.01	4.73±0.48
ΔG_{cp} , %	+10.8	+9.9	+10.4	+10.6	+10.3	+10.0	+10.4

зимнюю межень – 28% годового ионного стока, что в три раза выше соответствующей доли водного стока. А вот доля водного стока в летне-осенний период, которая составляет от 26.5% (для фазы повышенного стока) до 22.5% (для фазы пониженного стока) и ионного стока отличаются между собой не столь значительно.

В р. Печоре наибольшая доля ионного стока «литогенных» катионов и анионов (гидрокарбонатов, ионов кальция и магния) приходится на период летне-осенней межени, составляя в фазу пониженной водности 38–39% от общего стока, а в фазу повышенной водности его доля несколько снижается – до 37%. В период весеннего половодья сток

«литогенных» ионов несколько ниже (33–37% в фазу пониженной водности и 32–36% в фазу повышенной водности). Наименьший сток гидрокарбонатов, кальция и магния наблюдается в период зимней межени (25–28%), но при этом в фазу повышенной водности его доля, в отличие от других гидрологических сезонов, возрастает (27–31%). Наибольшая доля стока ионов, чувствительных к антропогенному воздействию (сульфатов, хлоридов, одновалентных катионов), наблюдается в период весеннего половодья (40–45% в фазу пониженной водности и 39–44% в фазу повышенной водности). Несколько ниже эти значения в период летне-осенней межени (37–38%) при сохранении общей тенденции сокращения стока в эти периоды при переходе от фазы пониженного к фазе повышенного водного стока (36–37%). В период зимней межени, на который приходится наименьшая часть ионного стока, при переходе от фазы пониженного к фазе повышенного водного стока

Таблица 5. Ионный сток р. Печоры в створе с. Усть-Цильмы в контрастные фазы пониженного и повышенного водного стока (в таблице приведены среднеемноголетнее значение и стандартное отклонение выборочных данных $G_{cp} \pm \sigma$)

Фаза водности	Ионный сток ($G_{cp} \pm \sigma$), млн тонн в год и сезоны						
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Σ _{ионов}
Год в целом							
пониженного водного стока	0.99±0.10	0.25±0.03	0.38±0.04	3.73±0.39	0.66±0.08	0.29±0.03	6.51±0.69
повышенного водного стока	1.11±0.08	0.29±0.02	0.44±0.04	4.17±0.29	0.76±0.08	0.34±0.03	7.33±0.58
ΔG _{ср} , %	12.3	13.0	13.9	11.7	15.2	15.1	12.7
Весеннее половодье							
пониженного водного стока	0.34±0.04	0.09±0.01	0.15±0.02	1.23±0.13	0.29±0.04	0.13±0.02	2.32±0.27
повышенного водного стока	0.38±0.03	0.10±0.01	0.17±0.02	1.36±0.10	0.34±0.04	0.15±0.02	2.59±0.22
ΔG _{ср} , %	11.2	12.1	13.1	10.6	14.7	14.5	11.7
Летне-осенний период							
пониженного водного стока	0.38±0.05	0.10±0.01	0.14±0.02	1.44±0.19	0.24±0.05	0.11±0.02	2.49±0.37
повышенного водного стока	0.42±0.06	0.11±0.02	0.16±0.03	1.57±0.21	0.27±0.06	0.12±0.03	2.75±0.42
ΔG _{ср} , %	9.6	10.7	12.0	8.9	14.4	14.1	10.2
Зимняя межень							
пониженного водного стока	0.26±0.03	0.06±0.01	0.08±0.01	1.06±0.11	0.12±0.02	0.05±0.01	1.66±0.20
повышенного водного стока	0.33±0.02	0.08±0.01	0.11±0.01	1.29±0.08	0.16±0.02	0.07±0.01	2.08±0.16
фаза водного стока, близкого к его среднему многолетнему значению	0.30±0.02	0.07±0.01	0.10±0.01	1.20±0.09	0.14±0.02	0.07±0.01	1.92±0.16
ΔG _{ср} , %	23.8	26.6	29.8	22.0	35.6	34.8	25.3

также отмечается увеличение его доли с 18–22% до 21–25%.

Вероятно, более существенные изменения ионного стока при переходе между фазами водности в Печоре по сравнению с Северной Двиной (особенно в период зимней межени) связаны с увеличением влияния на химический состав воды Печоры в контрастную фазу повышенного водного стока более минерализованных равнинных левобережных притоков (Пижма, Ижма, Цильма, Сула и др. реки), протекающих вне территорий распространения многолетнемерзлых пород. Косвенно это подтверждается наиболее выраженным увеличением стока сульфатов легко выщелачиваемых коренных пород южной части Тимана.

Заключение

На основе анализа многолетних рядов годового и сезонного стока воды р. Северной Двины у с. Усть-Пинеги и р. Печоры у с. Усть-Цильмы, охватывающих соответственно периоды начиная с 1882 г. и с 1932 г. по 2016 г., выявлены долговременные фазы их повышенных и пониженных значений. Последовательность и границы смены контрастных фаз годового стока, стока половодья и летне-осеннего

стока на Северной Двине, а на Печоре – годового стока и половодья, практически совпадали. Динамика фаз зимнего стока (на Северной Двине), зимнего и летне-осеннего стока (на Печоре) существенно отличалась от характера многолетних изменений стока других сезонов и годового стока. На Печоре в течение почти сорока лет (1950–1988) для зимнего стока не были выявлены сколько-нибудь длительные периоды, средний сток которых существенно отличался от его среднего значения, рассчитанного для всего периода наблюдений. На Северной Двине и Печоре в течение относительно длительных периодов фазы одного знака наблюдались:

- для половодного стока – в 1935–1945 гг., 1967–1980 гг. и 1989–2004 гг.;
- для зимнего стока – в 1936–1947 гг. и 1989–2016 гг.;
- для летне-осеннего стока – в 1935–1961 гг. и 2009–2016 гг.;
- для годового стока лишь в 1934–1947 гг.

Продолжительность контрастных фаз на Северной Двине и на Печоре соответственно варьирует в пределах:

- для стока половодья – 9–32 и 11–25 лет;
- для летне-осеннего стока – 16–49 и 29–49 лет;

- для зимнего стока – 14–41 года и 17–28 лет;
- для годового стока – 16–50 и 17–28 лет.

Разница среднего стока воды для долговременных фаз его повышенных и пониженных значений (относительно значений, характерных для фаз пониженного стока) соответственно на Северной Двине и Печоре составляет:

- для годового стока 17 и 11%;
- для зимнего стока – 34 и 41%;
- для летне-осеннего стока – 38 и 12%;
- для стока половодья – 16 и 13%.

Наибольшие различия стока ионов в контрастные фазы водного стока характерны в р. Северной Двине для летне-осеннего периода, а в р. Печоре – для зимней межени. Но в целом для обеих крупных рек бассейна Северного Ледовитого океана характерно, что разница их ионного стока между контрастными фазами меньше, чем для водного стока. Такая реакция химического стока на изменения стока воды вызвана обратным характером зависимости концентрации ионов от расхода воды, за счет чего формируется своеобразная отрицательная обратная связь, стабилизирующая интенсивность химической денудации на водосборах этих рек и стока главных ионов в моря, даже при заметных колебаниях водного стока.

В целом можно сделать вывод, что климатические изменения, заметно трансформирующие водный сток, оказывают существенно меньшее воздействие на сток макрокомпонентов природных вод. Можно отметить некоторое относительное динамическое постоянство геохимической нагрузки на моря Северного Ледовитого океана водами Северной Двины и Печоры независимо от амплитуд колебаний их водности в контрастные фазы.

Литература

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме, РФ, Москва, Росгидромет, 2014, 94 с. (http://voeikovmgo.ru/download/2014/od/resume_teh.pdf).
2. С.Д. Муравейский
Реки и озера: гидробиология, сток, СССР, Москва, Географгиз, 1960, 388 с.
3. Водные ресурсы России и их использование, под ред. И.А. Шикломанова, РФ, Санкт-Петербург, Изд. ГГИ, 2008, 600 с.
4. А.Г. Георгиади, Н.И. Коронкевич, И.П. Милокова, А.В. Кислов, О.А. Анисимов, Е.А. Барабанова, Е.А. Какутина, О.О. Бородин
Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России, часть 1: бассейн реки Лены, РФ, Москва, Макс Пресс, 2011, 179 с.
5. *Climatic Change and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies*, Eds C.R. Goldman, M. Kumagai, R.D. Roberts, USA, Malden, Wiley-Blackwell, 2013, 496 pp. DOI: 10.1002/9781118470596.
6. М.П. Смирнов
Органические вещества и минерализация речных вод России, СНГ, Балтии, РФ, Ростов-на-Дону, НОК, 2015, 358 с.
7. D.V. Magritsky, N.L. Frolova, V.M. Evstigneev, E.S. Povalishnikova, M.B. Kireeva, O.M. Pakhomova
Polarforschung, 2018, 87(2), 177. DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177.
8. A.G. Georgiadi, E.A. Kashutina, I.P. Milyukova
Polarforschung, 2018, 87(2), 167. DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.167.
9. *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*, Ser. Springer Environmental Science and Engineering, Eds P.Ya. Groisman, G. Gutman, USA, New York, Springer Dordrecht, 2013, 360 pp. DOI: 10.1007/978-94-007-4569-8.
10. D. Yang, D. Kane
Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems, Eds D. Yang, D.L. Kane, CH, Cham, Springer Cham, 2021, 914 pp. DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9.
11. Г.Г. Андреев
В Труды III Всесоюз. гидролог. съезда, в 10 тт., т. 2, Секция расчетов и прогнозов стока, СССР, Ленинград, Гидрометеоздат, 1959, с. 3–50.
12. А.Г. Георгиади, Н.И. Коронкевич, И.П. Милокова, Е.А. Какутина, Е.А. Барабанова
Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России, ч. 2, Бассейны рек Волги и Дона, РФ, Москва, Макс Пресс, 2014, 214 с.
13. R.P. North, D.M. Livingstone, R.E. Hari, O. Köster, P. Niederhauser, R. Kipfer
Inland Waters, 2013, 3(3), 341. DOI: 10.5268/IW-3.3.560.
14. S.N. Rodionov, J.E. Overland
ICES J. Mar. Sci., 2005, 62(3), 328. DOI: 10.1016/j.icesjms.2005.01.013.
15. А.Г. Георгиади, И.П. Милокова, Е.А. Какутина
Водные ресурсы, 2020, 47(6), 651. DOI: 10.31857/S0321059620060061.
16. X. Shi, T. Qin, H. Nie, B. Weng, Sh. He
Int. J. Environ. Res. Pub. He., 2019, 16(8), 1469. DOI: 10.3390/ijerph16081469.
17. Научно-прикладной справочник: многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации, РФ, Санкт-Петербург, ООО «РИАЛ», 2021, 190 с.
18. А.Г. Георгиади, Н.И. Коронкевич, Е.А. Баранова, Е.А. Какутина
Доклады Академии наук, 2019, 488(5), 539. DOI: 10.31857/S0869-56524885539-544.
19. S. Sharma, P.K. Singh
Climate, 2017, 5(1), 18. DOI: 10.3390/cli5010018.
20. Ресурсы поверхностных вод СССР, т. 3, Северный край, под ред. И.М. Жила, Н.М. Алюшинской, СССР, Ленинград, Гидрометеоздат, 1972, 663 с.
21. О.А. Алекин
Основы гидрохимии, СССР, Ленинград, Гидрометеоздат, 1970, 445 с.
22. А.М. Никаноров
Гидрохимия: Учебник, Россия, Санкт-Петербург, Гидрометеоздат, 2001, 444 с.
23. А.М. Никаноров, В.А. Брызгалов
Реки России, ч. 2, реки Европейского Севера и Сибири (гидрохимия и гидроэкология), РФ, Ростов-на-Дону, НОК, 2010, 200 с.
24. Ю.С. Даценко, Л.Е. Ефимова, М.Б. Заславская, О.М. Пахомова
Российские полярные исследования, 2016, №1(23), 12. (<http://old.aari.ru/misc/publicat/sources/RPR-23.pdf>).
25. В.Ф. Бреховских, З.В. Волкова, Д.В. Ломова
Метеорология и гидрология, 2004, №10, 87.
26. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши, ч. 1, под ред. Л.В. Боевой, РФ, Ростов-на-Дону, НОК, 2009, 1032 с.
27. A.N. Pettitt
J. R. Stat. Soc. C-Appl., 1979, 28(2), 126. DOI: 10.2307/2346729.
28. S.N. Rodionov
Geophys. Res. Lett., 2004, 31(9), 1. DOI: 10.1029/2004GL019448.

English

The Long-Term Changes in Water and Ions Flux of Northern Dvina and Pechora*

Aleksandr G. Georgiadi
RAS Institute of Geography
29/4 Staromonetny Lane,
Moscow, 119017, Russia
georgiadi@igras.ru

Alesya O. Danilenko
Lomonosov Hydrochemical Institute
198 Stachki Ave., Rostov-on-Don,
344090, Russia
a.danilenko@gidrohim.com

Abstract

The long-term data sets of the annual and seasonal water flows and the major ions fluxes of the Northern Dvina River at the village of Ust-Pinega and Pechora River at the village of Ust-Tsilma were analyzed. Long-term phases of increased and decreased values of water runoff were identified, the duration of which ranged from 9 to 50 years, and their main characteristics were determined. The sequence and boundaries of the change in the contrasting phases of the annual water flow, the snowmelt flood flow and the summer-autumn flow on the Northern Dvina River and the annual water flow and snowmelt flood flow on the Pechora River practically coincided. The difference between the average annual and seasonal water flow in the phases of its increased and decreased values ranged from 11 to 41%, and the ion fluxes were in the range of 5–36%. The ion flux of contrast phases, as a rule, differs less than the water flow. This is due to the inverse nature of the dependence of the concentration of ions on the daily water discharges, because of which a kind of negative feedback is formed, stabilizing the intensity of chemical denudation in the watersheds of these rivers and the flux of the main ions into the seas, even with noticeable fluctuations in water flow.

Keywords: the Northern Dvina River, the Pechora River, water flow, ion flux, long-term phases of changes, cumulative deviation curves.

**The work was financially supported by RFBR (project 18-05-60240) and Federal Budget allocations (state target 119021990093–8).*

Images & Tables

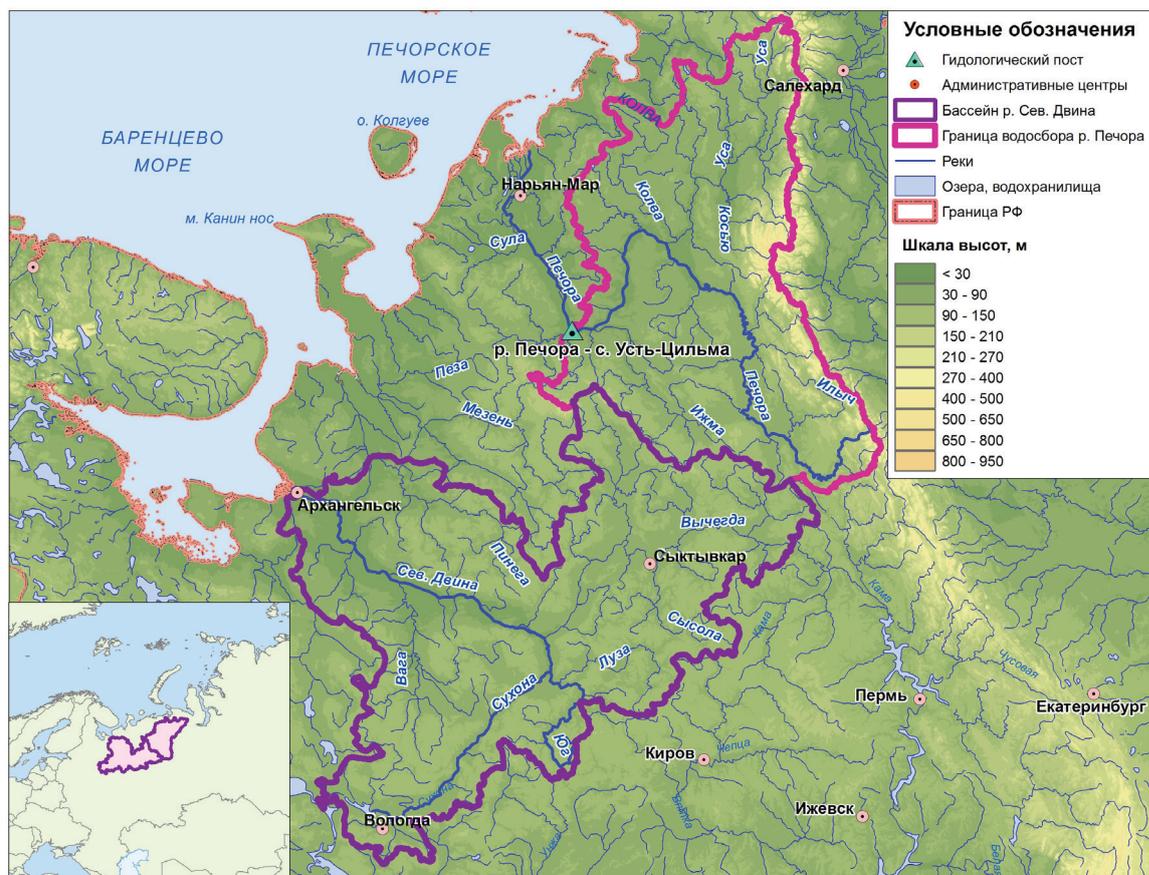


Fig. 1. Map of the Northern Dvina and Pechora rivers' basins.

Table 1. Statistical characteristics of dependences $C=f(Q)$ in Northern Dvina River near Ust-Pinega and the Pechora River near Ust-Tsilma

Ion fluxes components	Number of pairs (Q; C)	Relationship equation $C=f(Q)$	Index of determination, r_2	Approximation error, %
The Northern Dvina River near Ust-Pinega				
Calcium	572	$C=2\,732.8 \cdot Q^{-0.566}$	0.88	15.7
Magnesium	572	$C=646.69 \cdot Q^{-0.567}$	0.73	27.2
Sodium and Potassium	202	$C=151.74 \cdot Q^{-0.446}$	0.25	97.4
Bicarbonates	602	$C=7\,839.3 \cdot Q^{-0.562}$	0.89	14.2
Sulfates	608	$C=6\,298.4 \cdot Q^{-0.653}$	0.77	24.8
Chlorides	608	$C=529.95 \cdot Q^{-0.591}$	0.66	30.2
Mineralization	568	$C=15\,112 \cdot Q^{-0.558}$	0.89	15.1
The Pechora River near Ust-Tsilma				
Calcium	470	$C=501.68 \cdot Q^{-0.468}$	0.68	30.5
Magnesium	431	$C=118.25 \cdot Q^{-0.454}$	0.58	42.1
Sodium and Potassium	424	$C=58.656 \cdot Q^{-0.344}$	0.30	88.4
Bicarbonates	515	$C=2912 \cdot Q^{-0.519}$	0.76	28.0
Sulfates	508	$C=55.268 \cdot Q^{-0.25}$	0.25	48.5
Chlorides	513	$C=32.190 \cdot Q^{-0.273}$	0.34	38.7
Mineralization	434	$C=2\,784 \cdot Q^{-0.447}$	0.76	23.0

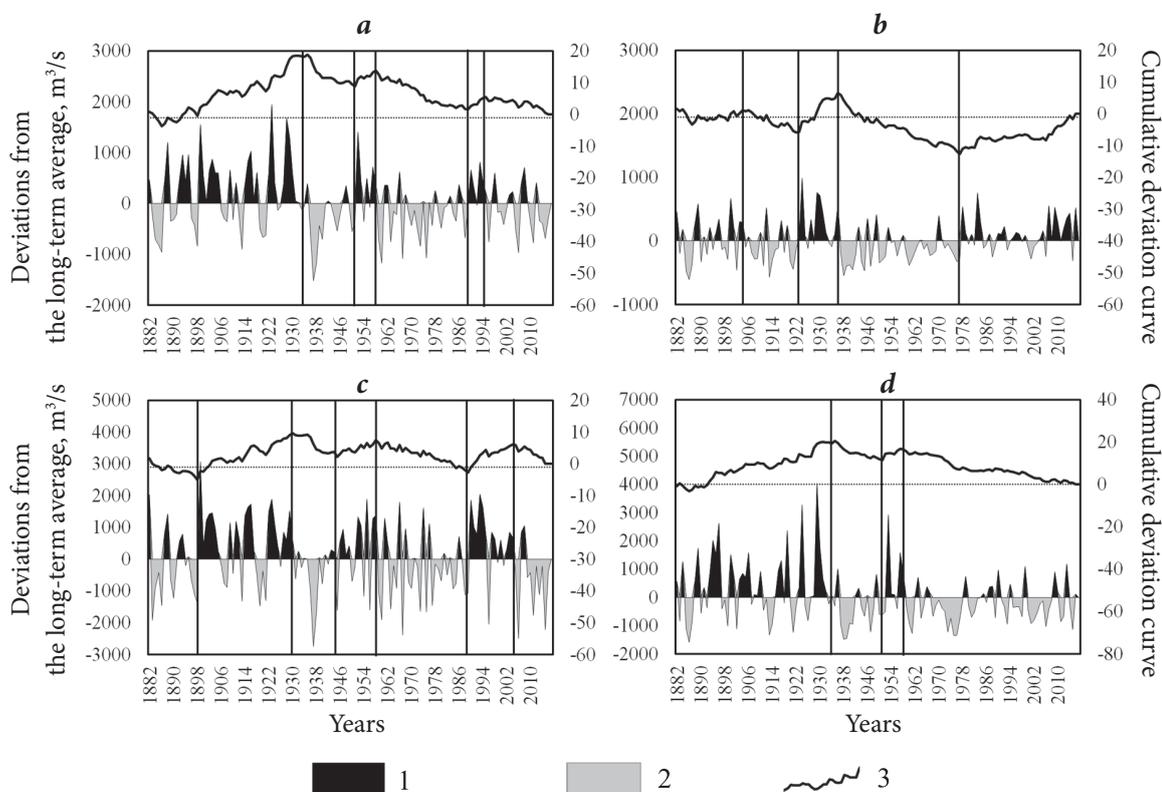


Fig. 2. Water flow of the Northern Dvina River near Ust-Pinega during the year (a), winter season (b), snowmelt flood season (c) and summer-autumn season (d) in deviations from the long-term average and in the coordinates of the cumulative deviation curve. Deviations from the average long-term value: 1 – positive, 2 – negative, 3 – cumulative deviation curve. Vertical lines are the limits of the contrasting water flow phases.

Table 2. Characteristics of the contrasting phases of the increased and decreased water flow of the Northern Dvina River near Ust-Pinega and Pechora River near Ust-Tsilma

Phases of water flow	Phases limits, calendar years, (phases duration, years), average discharge, m ³ per second			
	snowmelt flood flow	summer-autumn flow	winter flow	annual flow
The Northern Dvina River near Ust-Pinega				
Phases of decreased water flow	1882–1898 (17) 6 257	1936–1951 (16) 1 922	1905–1922 (18) 899	1936–1951 (16) 2 930
	1931–1945 (15) 5 985	1959–2016 (48) 2 108	1937–1977 (41) 874	1959–1989 (31) 3 085
	1959–1989 (31) 6 128	—	—	1996–2016 (21) 3 146
	2006–2016 (11) 5 833	—	—	—
Phases of increased water flow	1899–1930 (32) 7 069	1887–1935 (49) 2 815	1923–1936 (14) 1 296	1886–1935 (50) 3 560
	1946–1958 (9) 6 919	1952–1958 (7) 3 054	1978–2016 (29) 1 121	1952–1958 (7) 3 738
	—	—	—	1990–1995 (6) 3 698
The Pechora River near Ust-Tsilma				
Phases of decreased water flow	1936–1956 (21) 10 767	1933–1961 (29) 3 094	1933–1949 (17) 736	1932–1948 (17) 3 204
	1969–1980 (12) 10 708	—	—	1967–1980 (24) 3 349
Phases of increased water flow	1957–1967 (11) 12 271	1962–2010 (49) 3 460	1989–2016 (28) 1 036	1949–1966 (18) 3 564
	1981–2015 (25) 12 148	—	—	1981–2008 (28) 3 673
The phase of water flow, close to its average long-term value	—	—	1950–1988 (39) 885	—

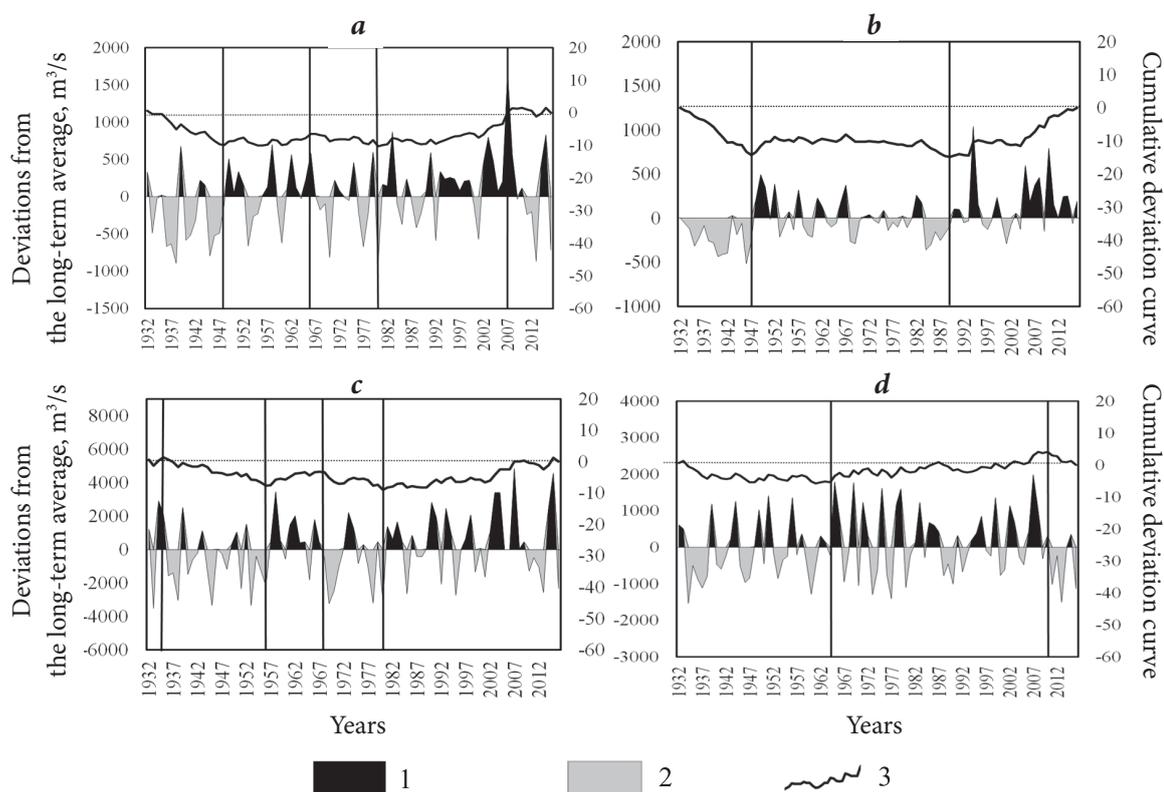


Fig. 3. Water flow of the Pechora River near Ust-Tsilma during the year (a), winter season (b), snowmelt flood season (c) and summer-autumn season (d) in deviations from the long-term average and in the coordinates of the cumulative deviation curve. Deviations from the average long-term value: 1 – positive, 2 – negative, 3 – cumulative deviation curve. Vertical lines are the limits of the contrasting water flow phases.

Table 3. Average values of water discharges of the Northern Dvina River near Ust-Pinega and the Pechora River near Ust-Tsilma for contrasting phases (in m³ per second), their absolute (D) and relative difference (D_{rel}, relative to the phase of decreased water flow)

Phases of water flow	Snowmelt flood flow	Summer-autumn flow	Winter flow	Annual flow
The Northern Dvina River near Ust-Pinega				
Phases of increased water flow	7 051	2 845	1 178	3 593
Phases of decreased water flow	6 085	2 062	882	3 067
D, m ³ /s	966	783	296	526
D _{rel} , %	16	38	34	17
The Pechora River near Ust-Tsilma				
Phases of increased water flow	12 179	3 460	1 036	3 631
Phases of decreased water flow	10 745	3 094	736	3 270
D, m ³ /s	1 434	367	300	361
D _{rel} , %	13	12	41	11

Table 4. Major ions flux of the Northern Dvina River near the Ust-Pinega in contrasting phases of decreased and increased water flow (the table shows the long-term average value and standard deviation of sample data $G_{cp} \pm \sigma$)

Phases of:	Major ions flux ($G_{cp} \pm \sigma$), million tons per year and seasons						
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Σ _{ионов}
Annual flow							
decreased water flow	2.69±0.19	0.61±0.04	0.71±0.05	7.82±0.53	3.31±0.22	0.45±0.03	15.84±1.08
increased water flow	2.89±0.23	0.66±0.05	0.76±0.06	8.41±0.68	3.54±0.28	0.48±0.04	16.92±1.30
ΔG_{av} , %	+7.1	+6.5	+6.8	+7.5	+6.8	+6.5	+6.8
Snowmelt flood flow							
decreased water flow	1.17±0.08	0.26±0.02	0.30±0.02	3.36±0.23	1.41±0.09	0.19±0.01	6.74±0.46
increased water flow	1.24±0.08	0.27±0.02	0.32±0.02	3.57±0.24	1.50±0.10	0.20±0.01	7.10±0.49
ΔG_{av} , %	+6.4	+5.3	+6.1	+6.3	+6.0	+5.8	+5.2
Summer-autumn flow							
decreased water flow	0.78±0.10	0.18±0.02	0.21±0.03	2.27±0.30	0.96±0.12	0.13±0.02	4.62±0.59
increased water flow	0.90±0.17	0.21±0.04	0.24±0.04	2.66±0.53	1.10±0.20	0.15±0.02	5.40±0.95
ΔG_{av} , %	+15.0	+13.7	+14.5	+17.1	+14.4	+13.9	+16.9
Winter flow							
decreased water flow	0.72±0.07	0.17±0.01	0.19±0.02	2.11±0.19	0.90±0.08	0.12±0.01	4.29±0.39
increased water flow	0.80±0.08	0.19±0.02	0.21±0.02	2.33±0.24	0.99±0.10	0.14±0.01	4.73±0.48
ΔG_{av} , %	+10.8	+9.9	+10.4	+10.6	+10.3	+10.0	+10.4

Table 5. Major ions flux of the Pechora River near the Ust-Tsilma in contrasting phases of decreased and increased water flow (the table shows the long-term average value and standard deviation of sample data $G_{av} \pm \sigma$)

Phases of:	Major ions flux ($G_{cp} \pm \sigma$), million tons per year and seasons						
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Σ _{ионов}
Annual flow							
decreased water flow	0.99±0.10	0.25±0.03	0.38±0.04	3.73±0.39	0.66±0.08	0.29±0.03	6.51±0.69
increased water flow	1.11±0.08	0.29±0.02	0.44±0.04	4.17±0.29	0.76±0.08	0.34±0.03	7.33±0.58
ΔG_{av} , %	12.3	13.0	13.9	11.7	15.2	15.1	12.7
Snowmelt flood flow							
decreased water flow	0.34±0.04	0.09±0.01	0.15±0.02	1.23±0.13	0.29±0.04	0.13±0.02	2.32±0.27
increased water flow	0.38±0.03	0.10±0.01	0.17±0.02	1.36±0.10	0.34±0.04	0.15±0.02	2.59±0.22
ΔG_{av} , %	11.2	12.1	13.1	10.6	14.7	14.5	11.7
Summer-autumn flow							
decreased water flow	0.38±0.05	0.10±0.01	0.14±0.02	1.44±0.19	0.24±0.05	0.11±0.02	2.49±0.37
increased water flow	0.42±0.06	0.11±0.02	0.16±0.03	1.57±0.21	0.27±0.06	0.12±0.03	2.75±0.42
ΔG_{av} , %	9.6	10.7	12.0	8.9	14.4	14.1	10.2
Winter flow							
decreased water flow	0.26±0.03	0.06±0.01	0.08±0.01	1.06±0.11	0.12±0.02	0.05±0.01	1.66±0.20
increased water flow	0.33±0.02	0.08±0.01	0.11±0.01	1.29±0.08	0.16±0.02	0.07±0.01	2.08±0.16
The phase of water flow close to its average long-term value	0.30±0.02	0.07±0.01	0.10±0.01	1.20±0.09	0.14±0.02	0.07±0.01	1.92±0.16
ΔG_{av} , %	23.8	26.6	29.8	22.0	35.6	34.8	25.3

References

1. *The Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and Its Consequences in the Russian Federation. Technical Summary [Vtoroy otsenochny doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Tekhnicheskoe rezyume]*, RF, Moscow, Rosgidromet, 2014, 94 pp. (in Russian). (http://voeikovmgo.ru/download/2014/od/resume_teh.pdf).
2. **S.D. Muravevsky** *Rivers and Lakes: Hydrobiology, Flow [Reki i ozera: gidrobiologiya, stok]*, USSR, Moscow, Geografiz Publ., 1960, 388 pp. (in Russian).
3. *Water Resources of Russia and Their Use [Vodnye resursy Rossii i ikh ispolzovanie]*, Ed. I.A. Shiklomanov, RF, Snt. Petersburg, Publ. SHI, 2008, 600 pp. (in Russian).
4. **A.G. Georgiadi, N.I. Koronkevich, I.P. Milyukova, A.V. Kislov, O.A. Anisimov, E.A. Barabanova, E.A. Kashutina, O.O. Borodin** *Scenario Assessment of Probable Changes in River Flow in the Basins of the Largest Rivers in Russia, Part 1: Lena River Basin [Stsenarnaya otsenka veroyatnykh izmeneniy rechnogo stoka v basseynakh krupneyshkikh rek Rossii, chast 1: basseyn reki Leny]*, RF, Moscow, Max Press, 2011, 179 pp. (in Russian).
5. *Climatic Change and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies*, Eds C.R. Goldman, M. Kumagai, R.D. Robarts, USA, Malden, Wiley-Blackwell, 2013, 496 pp. DOI: 10.1002/9781118470596.
6. **M.P. Smirnov** *Organic Substances and Mineralization of river waters in Russia, the CIS countries, the Baltic countries [Organicheskie veshchestva i mineralizatsia rechnykh vod Rossii, SNG, Baltii]*, RF, Rostov-on-Don, NOK Publ., 2015, 358 pp. (in Russian).
7. **D.V. Magritsky, N.L. Frolova, V.M. Evstigneev, E.S. Povalishnikova, M.B. Kireeva, O.M. Pakhomova** *Polarforschung*, 2018, **87**(2), 177. DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177.

8. **A.G. Georgiadi, E.A. Kashutina, I.P. Milyukova**
Polarforschung, 2018, **87**(2), 167.
DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.167.
9. *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*, Ser. Springer Environmental Science and Engineering, Eds P.Ya. Groisman, G. Gutman, USA, New York, Springer Dordrecht, 2013, 360 pp.
DOI: 10.1007/978-94-007-4569-8.
10. **D. Yang, D. Kane**
Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems, Eds D. Yang, D.L. Kane, CH, Cham, Springer Cham, 2021, 914 pp.
DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9.
11. **G.G. Andreyanov**
In Proc. The III All-Union Hydrol. Congr. in 10 Vols, Vol. 2, Runoff Calculations and Forecasts Section [*Trudy III Vsesoyuz. gidrolog. Sezda v 10 tt., t. 2, Sektsiya raschetov i prognozov stoka.*], USSR, Leningrad, 1959, pp. 3–50 (in Russian).
12. **A.G. Georgiadi, N.I. Koronkevich, I.P. Milyukova, E.A. Kashutina, E.A. Barabanova**
Modern and Scenario Changes in River Water Flow in the Basins of the Largest Rivers in Russia, P. 2, Volga and Don Rivers Basins [*Sovremennye i scenariye izmeneniya rechnogo stoka v basseynakh krupneyshikh rek Rossii, ch. 2, Basseyny rek Volgi i Dona*], RF, Moscow, Max Press, 2014, 214 pp. (in Russian).
13. **R.P. North, D.M. Livingstone, R.E. Hari, O. Köster, P. Niederhauser, R. Kipfer**
Inland Waters, 2013, **3**(3), 341. DOI: 10.5268/IW-3.3.560.
14. **S.N. Rodionov, J. E. Overland**
ICES J. Mar. Sci., 2005, **62**(3), 328.
DOI: 10.1016/j.icesjms.2005.01.013.
15. **A.G. Georgiadi, I.P. Milyukova, E.A. Kashutina**
Water Resources, 2020, **47**(6), 913. DOI: 10.1134/S0097807820060068.
16. **X. Shi, T. Qin, H. Nie, B. Weng, Sh. He**
Int. J. Environ. Res. Pub. He., 2019, **16**(8), 1469.
DOI: 10.3390/ijerph16081469.
17. *Scientific and Applied Handbook: Long-Term Variability of Water Resources and the Main Characteristics of the Flow of Rivers in the Russian Federation* [*Nauchno-prikladnoy spravochnik: mnogoletnie kolebania i izmenchivost vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiyskoy Federatsii*], RF, Snt. Petersburg, RIAL, Ltd, Publ., 2021, 190 pp. (in Russian).
18. **A.G. Georgiadi, N.I. Koronkevich, E.A. Barabanova, E.A. Kashutina, I.P. Milyukova**
Dokl. Earth Sci., 2019, **488**(2), 1211.
DOI: 10.1134/S1028334X19100106.
19. **S. Sharma, P.K. Singh**
Climate, 2017, **5**(1), 18. DOI: 10.3390/cli5010018.
20. *Resources of Surface Waters of the USSR, Vol. 3, Northern Territory* [*Resursy poverkhnostnykh vod SSSR, t. 3, Severnyy kray*], Eds I.M. Zhila, N.M. Alyushinskaya, USSR, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1972, 663 pp. (in Russian).
21. **O.A. Alekin**
Basic Hydrochemistry [*Osnovy gidrokhimii*], USSR, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1970, 445 pp. (in Russian).
22. **A.M. Nikanorov**
Hydrochemistry: Textbook [*Gidrokhimiya: Uchebnik*], RF, Snt. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2001, 444 pp. (in Russian).
23. **A.M. Nikanorov, V.A. Bryzgalov**
Rivers of Russia, p. 2, Rivers of the European North and Siberia (Hydrochemistry and Hydroecology) [*Reki Rossii, chast 2, reki Evropeyskogo Severa i Sibiri (gidrokhimiya i gidroekologiya)*], RF, Rostov-on-Don, NOC, 2010, 200 pp. (in Russian).
24. **Yu.S. Datsenko, L.E. Efimova, M.B. Zaslavskaya, O.M. Pakhomova**
Russian Polar Research [*Rossiyskie polyarnye issledovaniya*], 2016, №1(23), 12 (in Russian). (<http://old.aari.ru/misc/publicat/sources/RPR-23.pdf>).
25. **V.F. Brekhovskikh, Z.V. Volkova, D.V. Lomova**
Meteorologiya i gidrologiya [*Meteorology and Hydrology*], 2004, №10, 87 (in Russian).
26. *The Guidelines for the Chemical Analysis of Land Surface Waters, p. 1* [*Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushy, ch. 1*], Ed. L.V. Boeva, RF, Rostov-on-Don, NOC, 2009, 1032 pp. (in Russian).
27. **A.N. Pettitt**
J. R. Stat. Soc. C-Appl., 1979, **28**(2), 126. DOI: 10.2307/2346729.
28. **S.N. Rodionov**
Geophys. Res. Lett., 2004, **31**(9), 1.
DOI: 10.1029/2004GL019448.