

ИОННЫЙ СТОК В АРКТИЧЕСКИЕ МОРЯ РОССИИ

Сток растворенных веществ (РВ) является основным связующим звеном в обмене веществом между суши и океаном, определяет обилие или дефицит «пищи», необходимой для гидробионтов. Он подразделяется на ионный сток (сток главных ионов), сток микроэлементов, органических и биогенных веществ, находящихся в ионно-молекулярном или коллоидном состоянии. Преобладающую часть (80 %) суммарного стока РВ в океан формирует ионный сток. Его изменчивость отражает естественные и антропогенные механизмы формирования стока воды и содержания химических веществ водных объектов. Изучение сезонной и межгодовой изменчивости ионного стока, стока отдельных главных ионов и их среднего содержания в воде дает интегральное представление о роли хозяйственной деятельности в изменении потребительских свойств водных ресурсов территории, крупных и средних рек. Это единственный объективный путь для определения сезонной интенсивности диффузных источников химических веществ, что весьма актуально для арктического района с повышенной уязвимостью наземных и водных экосистем при интенсивном хозяйственном освоении территории.

Расчеты ионного стока, а также его составляющих (стока сульфатов и хлоридов) выполнены авторами для крупных и средних арктических рек России за многолетний период. В качестве исходных материалов в работе использованы многолетние данные Росгидромета по замыкающим створам избранных рек, находящиеся в составе информационной базы Государственного водного кадастра (ГВК) с момента начала систематических измерений в 1948 году до 2000 года.

Для расчета ионного стока использовалось несколько методов, в основе которых находится линейная интерполяция измеренных значений концентраций РВ на каждый день расчетного периода или корреляционная зависимость между значениями концентрации (c) и расхода воды (Q). С учетом значения среднесуточных расходов эти методы позволяют восстановить среднесуточные концентрации растворенных веществ. Наилучшие результаты дает метод, сочетающий использование обоих подходов (Заславская М.Б., Ершова М.Г., Виноградова Н.Н. Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 3 Можайское водохранилище. Гл. IV. Сток с водосбора. М.: Изд-во МГУ, 1979. С. 61–81). Для маловодных фаз стока, когда в питании реки доминирует грунтовый генетический тип вод и отсутствует корреляция между c и Q , используется линейная интерполяция. Для многоводных фаз, когда в стоке

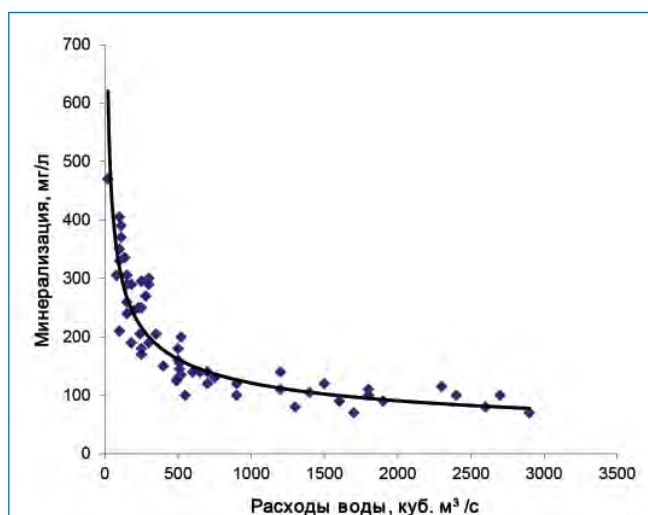


Рис. 1. Связь минерализации и расхода воды для р. Онеги (с. Порог).

реки преобладают менее минерализованные воды поверхностно-склонового и почвенного генезиса, разбавляющие грунтовые воды, возникает корреляционная связь $c = f(Q)$, которая и используется при расчете (рис. 1).

Надежность оценки стока растворенных веществ в значительной степени зависит от наличия данных о содержании искомого компонента химического состава речной воды за все перечисленные фазы водного режима. Выраженность сезонной неоднородности ионного стока определяется типом взаимосвязи между гидрологическим и гидрохимическим режимом рек и контрастностью содержания характеристик химического состава воды в разные фазы водного режима реки. Результаты расчетов позволили выявить характер сезонной изменчивости стока растворенных веществ арктических рек с разным типом гидролого-гидрохимического режима и с разной степенью антропогенного воздействия.

Таблица 1

Средний многолетний сток ионов, сульфатов и хлоридов крупных и средних рек арктического побережья России в окраинные моря Северного Ледовитого океана

Приемный водоем	Ионный сток		Сток сульфатов		Сток хлоридов	
	млн т	т/км ² ·г	млн т	т/км ² ·г	млн т	т/км ² ·г
Белое и Баренцево моря	26,04	36,0	5,04	7,10	1,02	1,44
Карское море	108,29	21,34	9,45	1,92	8,22	1,65
Море Лаптевых	51,07	19,24	6,25	2,35	8,70	3,28
Восточно-Сибирское море	6,50	7,82	0,75	0,89	0,26	0,31
Северный Ледовитый океан	191,9	20,9	21,49	2,34	18,2	1,98

Результаты расчетов стока ионов, сульфатов и хлоридов приведены в таблице 1. Наибольшее количество растворенных минеральных солей выносят реки Енисей, Обь, Лена (рис. 2–4). Средний многолетний ионный сток в замыкающих створах крупных и средних рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, равен 191,9 млн т/г, сток сульфатов и хлоридов соответственно составляет 21,49 и 18,2 млн т/г. Доля каждой из этих рек в суммарном ионном стоке составляет соответственно 28,5; 26,4; 25,4 %, в стоке сульфатов — 24,4; 17,2; 28,5 %, в стоке хлоридов — 26,7; 17,7; 47,2 %. Высокие значения стока ионов определяются большой водоносностью вышеперечисленных рек. В Карское море, куда впадают реки Обь и Енисей, поступает более половины (56,4 %) ионного стока в арктические моря России.

Наименьшее количество солей (3,4 % ионного стока, 3,5 % стока сульфатов и 1,4 % стока хлоридов) выносятся арктическими реками в Восточно-Сибирское море. Ионный сток в Белое и Баренцево моря составляет 25,83 млн т (13,6 % от суммарного ионного стока в арктические моря России). Относительная величина выноса сульфатов реками европейской части России в океан заметно выше (23,5 %), что связано с большим содержанием сульфатов в речной воде по сравнению с другими крупными реками арктического побережья.

Модули ионного стока, стока сульфатов и хлоридов, которые характеризуют интенсивность химической денудации на водосборе, различны для крупных рек арктического побережья России (рис. 2–4). Самые большие модули ионного стока и стока сульфатов имеют реки Онега и Северная Двина, водосборы которых сложены легковыщелачиваемыми породами (гипсом и известняком). Основными причинами уменьшения модуля стока ионов с запада на восток являются климатические особенности (продолжительность времени года

**Среднемноголетний ионный сток
с межбассейновых территорий в арктические моря**

Межбассейновые территории (МБТ)	Ионный сток, млн т/г	Площадь водосбора, км ²	Модуль ионного стока, т/(км ² ·г)
Кольско-Онежская	1,24	212000	5,8
Онего-Северодвинская	0,17	12000	14,2
Северодвинско-Мезеньская	0,36	34000	10,6
Мезень-Печорская	0,77	49000	15,7
Печоро-Обская	2,45	179000	13,7
Обь-Пуртазовская	1,27	86000	14,8
Таз-Енисейская	2,86	104000	27,5
Енисей-Ленская	18,68	1143000	16,3
Лено-Янская	0,70	58000	12,1
Яна-Индибирская	0,36	90000	4,0
Индигири-Колымская	0,12	121000	1,0
Восточносибирская	0,44	204000	2,1
Всего в Белое и Баренцево моря	2,54	307000	8,3
Всего в Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское моря	26,88	1985000	13,5
Всего в Северный Ледовитый океан	29,42	2292000	12,8

и Баренцева морей (0,17–0,77 млн т/г). Он составляет 48,8 % суммарного стока с МБТ в эти моря. В то же время модуль ионного стока с территории Кольско-Онежской МБТ наименьший (5,8 т/(км²·г)). Это связано с малой минерализацией поверхностных вод территории и большой площадью водосбора.

Наибольшее же количество растворенных солей в Северный Ледовитый океан с межбассейновых территорий России выносится с Енисей-Ленской МБТ — 18,68 млн т/г, что связано со значительным водным стоком с этой территории и большой площадью ее водосбора. Высокими значениями ионного стока (2,86 млн т/г) и его модуля (27,5 т/(км²·г)) характеризуется Таз-Енисейская МБТ.

Суммарный ионный сток в окраинные моря российского региона Арктики с учетом стока с межбассейновых территорий по нашим оценкам составляет 221,32 млн т/г. На долю крупных и средних рек приходится 191,9 млн т, или 86,7 %. На межбассейновых водосборных территориях формируется 13,3 % ионного стока, что является существенной частью общего притока растворенных веществ в Северный Ледовитый океан с территории России. Часть этих веществ транзитом перемещается к морскому краю дельт и устьевому взморью, другая — участвует в сложных процессах трансформации химических веществ в зоне смешения речных и морских вод.

Пространственная дифференциация стока растворенных веществ предопределяется природными факторами, что наглядно подтверждается устойчивыми различиями минерализации воды рек Онеги и Северной Двины по сравнению с Мезенью и Печорой. Среднемноголетние значения минерализации рек Онеги и Северной Двины 140 и 145 мг/л соответственно, а Мезени и Печоры — 85 и 64 мг/л.

Незначительная мощность ледниковых отложений и распространение легко выщелачиваемых пород на водосборе первых двух рек обуславливают увеличение минерализации и концентрации сульфатов в их воде по сравнению с реками Мезенью и Печорой. С ростом антропогенной нагрузки на водосборах исследуемых рек в период с 1961 по 1975 год минерализация воды, содержание хлоридов и особенно сульфатов заметно возрастают по сравнению с условно-фоновым

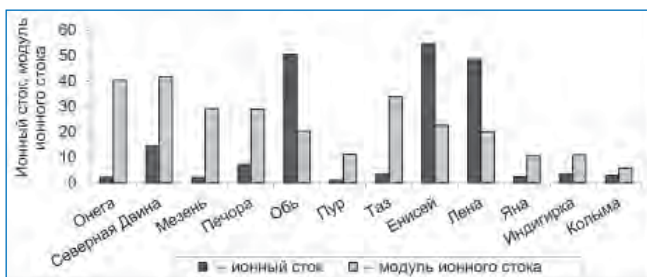


Рис. 2. Средний многолетний ионный сток (млн т) и его модуль (т/(км²·г)) в замыкающих створах крупных рек арктического побережья России.

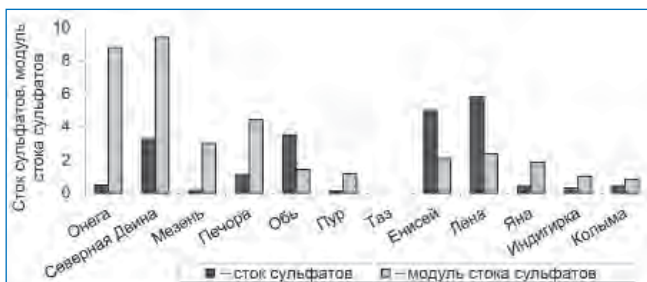


Рис. 3. Средний многолетний сток сульфатов (млн т) и его модуль (т/(км²·г)) в замыкающих створах крупных рек арктического побережья России.

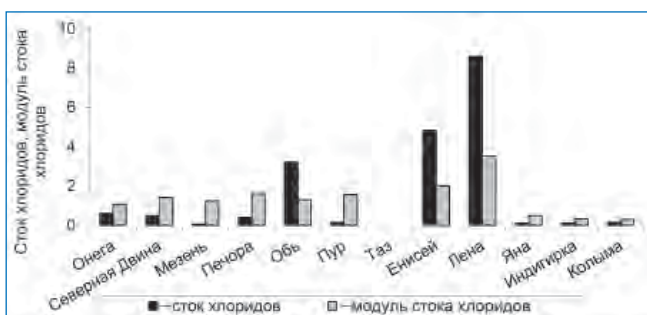


Рис. 4. Средний многолетний сток хлоридов (млн т) и его модуль (т/(км²·г)) в замыкающих створах крупных рек арктического побережья России.

с низкими температурами и умеренное количество осадков) и широкое распространение многолетней мерзлоты. Химическая денудация минимальна в бассейнах рек Яны, Индигирки и Колымы, сложенных трудно выщелачиваемыми многолетнемерзлыми породами. Средний многолетний модуль стока хлоридов для рек европейской территории России составляет 1,08–1,61 т/(км²·г). Модуль стока сульфатов значительно больше.

Модули стока сульфатов и хлоридов в бассейне Карского моря мало различаются (соответственно 1,08 и 1,65 т/(км²·г)). Модуль стока хлоридов минимален в низовьях рек Яны, Индигирки и Колымы (0,30–0,49 т/(км²·г)). Он примерно в три раза меньше модуля стока сульфатов.

Вышеприведенные расчеты ионного стока не учитывали приток растворенных веществ с местного водосбора окраинных арктических морей (межбассейновых территорий, расположенных между устьями крупных и средних рек) в суммарной геохимической нагрузке на Северный Ледовитый океан с территории России. Его величина составляет 29,42 млн т/г (табл. 2).

Ионный сток с межбассейновых территорий, расположенных между устьями крупных и средних рек, впадающих в Белое и Баренцево моря, равен 2,54 млн т/г, а в Карское, Лаптевых и Восточно-Сибирское моря — 26,88 млн т/г. Это соответствует 8,6 и 91,4 % ионного стока с межбассейновых территорий в Северный Ледовитый океан.

Большой водный сток с Кольско-Онежской межбассейновой территории (МБТ) определяет наибольшую величину ионного стока с этой территории (1,24 млн т/г) по сравнению с другими, относящимися к межбассейновой территории Белого

периодом (1949–1958 годы), в первую очередь для рек с их низкой фоновой концентрацией (реки Печора и Мезень). При снижении интенсивности загрязнения окружающей среды в условиях спада производства и повышении эффективности природоохранной деятельности (1990–1999 годы) наблюдается уменьшение концентрации по сравнению с предыдущим периодом.

Подобные изменения, обусловленные вышеперечисленными факторами, касаются не только концентрации растворенных веществ, но и их стока. Они находят отражение в его распределении внутри сезонов.

Например, для р. Мезень максимум стока сульфатов приходится на весну, что характерно для всех выявленных периодов с различной интенсивностью антропогенного воздействия (рис. 5). Однако наибольшее увеличение произошло в период с повышенной антропогенной нагрузкой (1961–1975 годы), когда сток сульфатов вырос почти в три раза по сравнению с условно-фоновым периодом (1949–1958 годы). Это обстоятельство привело к заметным изменениям его внутригодовой структуры: доля весеннего стока сульфатов увеличилась на 12,1 %, доля зимнего — уменьшилась на 14,6 %.

Аналогичная закономерность характерна и для периода 1990–1999 годов. Скорее всего, она связана с увеличивающимся выносом сульфатов, накопившихся на водосборе в результате хозяйственной деятельности или поступающих в реки в составе сточных вод.

Значительное нарушение фоновой внутригодовой распределения стока в период 1961–1975 годов характерно и для хлоридов (рис. 5в)). В отличие от сульфатов, доля стока хлоридов возросла в летне-осенний период.

Ионный сток р. Мезени более равномерно распределен по сезонам года, с небольшим преобладанием доли летне-осеннего стока, что характерно для всех периодов с разной антропогенной нагрузкой (рис. 5а)).

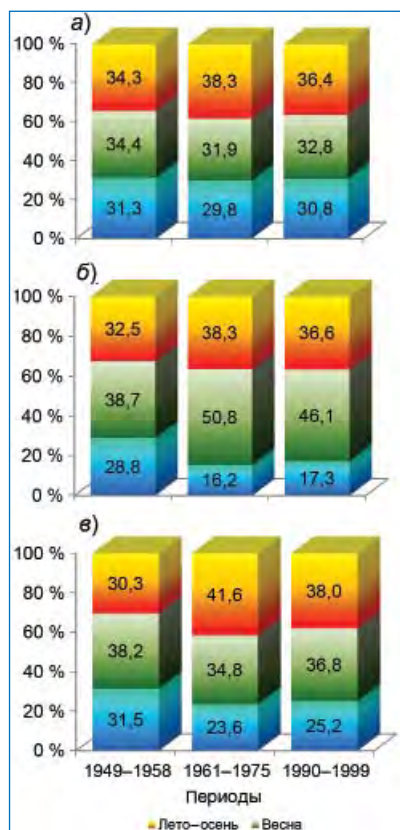


Рис. 5. Внутригодовое распределение (%) ионного стока (а), стока сульфатов (б) и хлоридов (в) в замыкающем створе р. Мезени для периодов с разной интенсивностью хозяйственной деятельности.

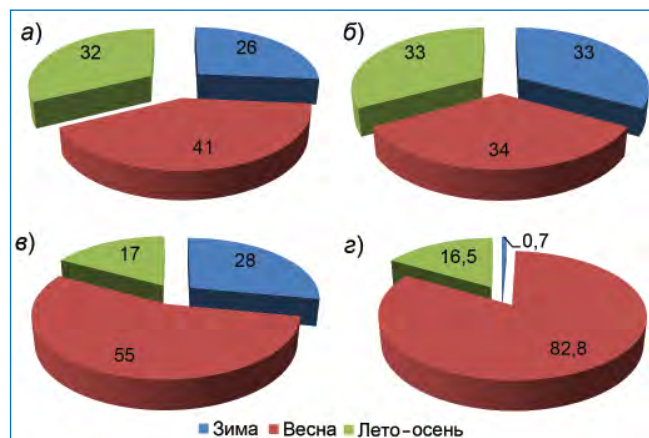


Рис. 6. Внутригодовое распределение в процентах ионного стока в замыкающих створах рек Онеги (а), Печоры (б), Оби (в) и Яны (г).

По внутригодовому распределению ионного стока, стоки сульфатов и хлоридов рек европейской и азиатской части арктического побережья имеют существенные различия (рис. 6). Реки европейской части за весь многолетний период (1949–1999 годы) характеризуются более равномерным распределением ионного стока и его составляющих по гидрологическим сезонам с преобладанием весной (33–42 % в ионном стоке, 34–45 % — в стоке сульфатов и хлоридов). Наименьший сток растворенных веществ на всех крупных реках европейской части побережья проходит в зимний период (рис. 6а, б).

В азиатской части страны водный сток в весенний период увеличивается в восточном направлении, возрастая от 66 % в замыкающем створе р. Оби до 82 % годового стока в замыкающих створах рек Яны и Индигирки. Подобная тенденция наблюдается и для ионного стока и его составляющих: резко выраженное преобладание его доли в период весеннего половодья, которое увеличивается по направлению с запада на восток и с уменьшением площади водосбора рек (рис. 6в, г). Среди рек азиатской части арктического побережья наиболее равномерную внутригодовую структуру стока ионов имеет Енисей, что, очевидно, определяется значительным зарегулированием реки. Наименее равномерное внутригодовое распределение ионного стока и его составляющих, сходное с распределением водного стока, характерно для рек Яны и Индигирки. За весеннее половодье в моря поступает более 80 % годового ионного стока, за период зимней межени — менее 1,5 %, что связано с климатическими особенностями (продолжительность времени года с низкими температурами и умеренное количество осадков) и широким распространением многолетней мерзлоты. Для всех рек арктического побережья (за исключением Яны, Индигирки и Колымы) характерна несколько бóльшая по сравнению с ионным стоком доля весеннего стока сульфатов. Это связано с увеличением их концентрации в воде в период половодья.

Изучение процессов формирования и изменения качества речных вод невозможно без учета гидрологического фактора, на фоне которого реализуются различные механизмы изменения химического состава воды. При использовании информации о величине и изменчивости составляющих речного стока появляется возможность для изучения процессов трансформации качества воды в конкретных природно-хозяйственных условиях.

*Ю.С. Дაცенко, Л.Е. Ефимова,
М.Б. Заславская, О.М. Пахомова
(МГУ им. М.В. Ломоносова,
географический факультет)*