

ИЗМЕНЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ХИМИЧЕСКОЙ ДЕНУДАЦИИ НА ВОДОСБОРЕ РЕКИ ПЕЧОРЫ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО КЛИМАТА И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Даниленко А. О., Решетняк О. С., Косменко Л. С., Кондакова М. Ю.

CHANGES IN THE CHEMICAL DENUDATION INTENSITY IN THE RIVER PECHORA CATCHMENT UNDER THE INFLUENCE OF NON-STATIONARY CLIMATE AND ECONOMIC ACTIVITIES

Danilenko A. O., Reshetnyak O. S., Kosmenko L. S., Kondakova M. Yu.

Аннотация

Введение. Потепление климата, отмечающееся в Арктике в настоящее время, потенциально способно усилить химическую денудацию в бассейнах рек, частично или полностью расположенных в пределах многолетней мерзлоты. Для проверки этой гипотезы исследована многолетняя динамика ионного стока рек бассейна р. Печоры, на 42 % расположенного в пределах многолетнемерзлых пород. **Методы.** Для исследования изменений интенсивности химической денудации в условиях нестационарного климата проанализированы данные систематических наблюдений за концентрациями главных ионов с 1985 по 2017 гг. в замыкающем створе р. Печоры (г. Нарьян-Мар) и на ее притоках — реках Уса, Адзва, Колва, Сула. Оценка интенсивности химической денудации в бассейне р. Печоры проведена по ионному стоку. Проанализированы вероятные причины его изменений: водность и концентрации макрокомпонентов. **Результаты.** Ионно-солевой состав воды р. Печоры определяется преимущественно растворением карбонатных минералов в подстилающих породах. Расчеты и сравнение модулей ионного стока показали, что исследуемые реки сопоставимы по интенсивности химической денудации на водосборах, за исключением рек Сула и Колва, с речным стоком которых выносятся относительно повышенное количество хлоридов и гидрокарбонатов соответственно. Вопреки исходным предположениям о возможном усилении процесса химической денудации в условиях потепления климата обнаружено снижение модулей стока сульфатов во всех реках. Также для рек наблюдаются индивидуальные изменения модулей стока других главных ионов. **Заключение.** В современных условиях интенсивность химической денудации остается на уровне конца прошлого века, а многолетняя динамика ионного стока р. Печоры коррелирует во времени с изменчивостью антропогенных факторов, в частности, влажных выпадений сульфатов с атмосферными водами.

Ключевые слова: бассейн р. Печоры, ионный сток, химическая денудация, антропогенное воздействие, глобальное изменение климата.

Abstract

Introduction. Climate warming, which is currently observed in the Arctic, has the potential to intensify chemical denudation in river basins partially or completely located within permafrost. In order to test this hypothesis, we investigated the long-term dynamics of the rivers' ion runoff in the Pechora River basin, 42 % of which are located within permafrost. **Methods.** To study changes in the chemical denudation intensity in nonstationary climate, we analyzed data of systematic observations over the main ion concentrations from 1985 to 2017 in the Pechora River outlet (Naryan-Mar) and its tributaries (Usa, Adzva, Kolva, Sula rivers). The intensity of chemical denudation in the Pechora River basin was assessed in terms of ion runoff. The probable reasons for its changes — water content and concentrations of macrocomponents — were also analyzed. **Results.** The ion-salt composition of Pechora River water is mainly determined by the dissolution of carbonate minerals in the underlying rocks. Calculations and comparison of ion runoff moduli showed that the studied rivers are comparable in terms of the chemical denudation intensity in catchments. The exceptions were the Sula and Kolva rivers, where, with the river runoff, a relatively high amount of chlorides and hydrocarbonates is carried. Contrary to the initial assumptions about the possible intensification of the chemical denudation process under the conditions of climate warming, we found a decrease in the sulfate runoff moduli in all rivers. In addition to that, individual changes in the runoff moduli for other main ions are observed for the studied rivers. **Conclusion.** In modern conditions, the chemical denudation intensity remains at the level of the end of the last century, and the long-term dynamics of the Pechora River ion runoff correlates in time with the variability of anthropogenic factors, in particular, wet sulfate deposition with atmospheric waters.

Keywords: Pechora river basin, ion runoff, chemical denudation, anthropogenic impact, global climate change.

Введение

В научной литературе по вопросам геоэкологических исследований можно найти несколько формулировок понятия денудация (химическая денудация). В настоящем исследовании под химической денудацией понимается совокупность процессов «потери вещества ландшафтов в результате растворения и выноса водных мигрантов за пределы ландшафтов суши» [23].

Интенсивность процесса химической денудации отличается по ландшафтам и зависит от целого ряда параметров: вещественного состава и генезиса пород, геоморфологических особенностей территории, водности рек, доли подземных вод в общем речном стоке, обилия атмосферных осадков и многого другого. Один из косвенных количественных показателей химической денудации на водосборах рек — величина стока растворенных веществ. Как отмечается в работе [22], «основная часть стока растворенных веществ приходится на главные ионы, ... поэтому в оценке интенсивности химических процессов в речных бассейнах использована ионная составляющая стока».

Разумно предполагать, что современное потепление климата могло повлиять на интенсивность химической денудации в бассейнах рек, частично или полностью расположенных в пределах многолетней мерзлоты, так как сокращение площади и мощности многолетнемерзлых пород сопровождается ослаблением барьера, препятствующего проникновению поверхностных вод в более глубокие горизонты почв и разгрузке более минерализованных подземных вод в речное русло [25]. В целях проверки этой гипотезы была исследована многолетняя динамика ионного стока рек бассейна Печоры, который на 42 % расположен в пределах многолетнемерзлых пород [26]. Мощность их на Европейском Севере России сравнительно невелика и колеблется от 10–15 до 500–700 м. Так как эта мерзлота является «теплой» (от $-0,5$ до -20 °C), она очень чувствительна к изменению климата и антропогенным воздействиям [8].

Исследуемый водосбор р. Печоры относится к бассейнам с высокой антропогенной нагрузкой, которая, наряду с природно-климатическими факторами, может усиливать процессы химической денудации. Как было описано ранее, бассейн

«захватывает часть территории Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции — это регион крупномасштабной разведки, добычи и транспортировки нефти и газа. ... Основными источниками загрязнения в бассейне р. Печоры являются предприятия энергетики, нефтеперерабатывающей, угледобывающей, газодобывающей, лесозаготовительной и деревообрабатывающей отраслей промышленности» [6].

Интенсивное освоение территории Печорского бассейна не могло не сказаться на состоянии окружающей среды и водных экосистем рек. В работе [14] отмечается, что ухудшение экологической обстановки стало происходить с конца 1970-х годов. В период 80–90-х годов произошла серия аварий на нефтепроводах в бассейне Печоры, кроме этого наблюдалась «непрекращающаяся череда утечек нефти, разрывов трубопроводов и разливов локального характера. Дополнительное поступление нефтепродуктов в речные воды происходит также в процессе эксплуатации оборудования, судоходства, промышленного производства (в виде площадного стока)» [14].

Таким образом, к началу нового тысячелетия экосистемы рек «Печорского бассейна оказались подвержены значительному техногенному воздействию. Кроме этого, речные экосистемы в бассейне р. Печоры продолжают испытывать мультифакторное загрязнение, связанное с поступлением в водную среду соединений тяжелых металлов, нефтепродуктов, флотореагентов, органических веществ и хозяйственно-бытовых сточных вод. Важно подчеркнуть, что антропогенное воздействие на экосистемы осуществляется в условиях сурового климата, широкого распространения многолетнемерзлых пород, низкого потенциала самоочищения и слабой способности водных экосистем к саморегуляции при низком видовом разнообразии биоценозов» [3, 4, 6]. В последние годы состояние водных экосистем в бассейне р. Печоры характеризуется как относительно благополучное, за исключением наиболее загрязненных притоков (реки Колва и Сула) и экологически напряженного устьевое участка реки в районе г. Нарьян-Мар, где состояние водных экосистем характеризуется как «кризисное» [6].

Объект исследования, материалы и методы

Замыкающий створ р. Печоры — выше г. Нарьян-Мар, у п. Оксина — расположен на северо-востоке Европейской части России в 141 км от Баренцева моря и ограничивает площадь водосбора, равную 312 тыс. км² [10]. Непосредственно в Печору впадают с левого берега р. Сула, а с правого — р. Уса, с притоками второго порядка — реки Колва и Адзьва. Пространственное размещение пунктов наблюдения представлено на рис. 1, а краткая характеристика объектов исследования — в табл. 1.

Водосбор реки расположен в пределах северо-таежной и тундровой физико-географических зон с умеренно-континентальным климатом арктической климатической области, в связи с чем для описываемой территории характерно короткое и прохладное лето (средняя температура июля в г. Нарьян-Мар с 1985 по 2018 г. составила 13,6 °С), продолжительная, снежная и морозная зима (средняя температура января за тот же период –17,5 °С). За год выпадает значительное количество осадков, превышающих испарение. Для бассейна р. Печоры характерна высокая густота речной сети и значительное распространение озер и болот [10].

Чтобы оценить изменения некоторых климатических характеристик в районе исследования, мы проанализировали данные о многолетней динамике среднегодовой приземной температуры воздуха, измеренной у г. Нарьян-Мар в период с 1985 по 2018 г., и представленные в специализированных базах данных ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (<http://aisori-m.meteo.ru/>). С этой целью была построена диаграмма рассеяния, отражающая зависимость величины среднегодовой температуры воздуха от года. Между переменными обнаружена линейная зависимость с коэффициентом корреляции, равным 0,52, и высоким уровнем доверительной вероятности $p = 0,002$. Статистически значимая динамика увеличения приземной температуры воздуха характеризуется средней скоростью прироста приблизительно 0,08 °С в год (рис. 2), при этом наиболее сильные изменения характерны для холодного времени года, а именно ноября (приблизительно 0,14 °С в год) и декабря (приблизительно 0,24 °С в год).

Многолетняя мерзлота в бассейне р. Печоры исторически испытывала многочисленные периоды деградации и агградации, но никогда не исчезала полностью. Ее мощность на данной территории варьирует весьма значительно —

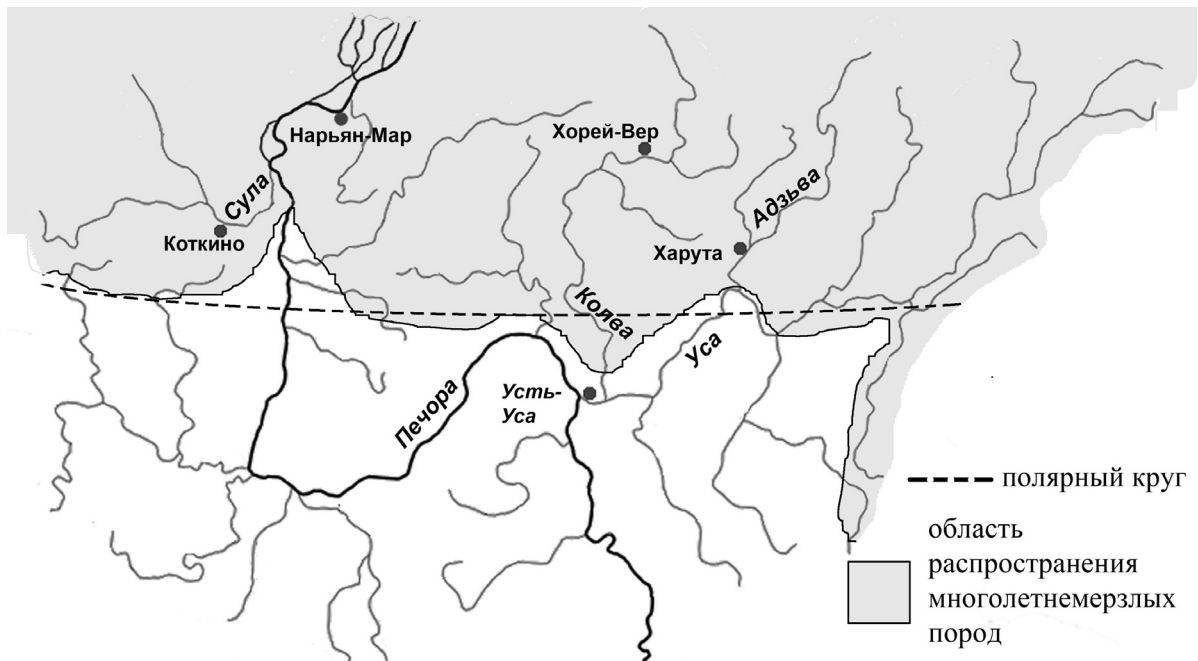


Рис. 1. Схема пространственного размещения пунктов наблюдений на реках бассейна р. Печоры (область распространения многолетнемерзлых пород нанесена в соответствии с картой Национального атласа России [11])

Таблица 1

Краткая характеристика рек в бассейне р. Печоры

Река	Пункт наблюдений	Расположение в пределах многолетнемерзлых пород («вечная мерзлота»)*	Площадь водосбора, тыс. км ²	Длина, км	Изменчивость водного стока**
Печора	Выше г. Нарьян-Мар, у п. Оксино	Сплошная 90–100 %	312,0	1809	$\frac{78,3-197,8}{148,3}$
Уса	п. Усть-Уса	Отсутствует 0 %	75,1	565	$\frac{18,3-47,5}{34,3}$
Сула	д. Коткино	Островная 0–10 %	8,5	353	$\frac{1,55-4,37}{3,12}$
Колва	с. Хорей-Вер	Островная 10–50 %	5,47	387	$\frac{0,43-4,90}{2,36}$
Адзьва	д. Харута	Островная 10–50%	8,7	334	$\frac{2,43-5,01}{3,52}$

* По данным [11] и <https://databasin.org/maps/>

**В числителе диапазон изменения водного стока за период с 1985 по 2017 г., в знаменателе — среднемноголетнее значение.

от 10–15 м на южной границе распространения многолетнемерзлых пород до 500–700 м в области реликтовой мерзлоты близ Полярного Урала. Преобладающие температуры многолетнемерзлых пород сравнительно высокие: от –0,5 до –2 °С, в связи с чем мерзлота здесь очень чувствительна к изменению климата и антропогенным воздействиям [8].

Как показано в оценочном отчете [2], для территории России изменения характеристик вечной мерзлоты во многом обусловлены изменениями климата, и прежде всего вариацией температуры воздуха.

В зависимости от ландшафтных условий мерзлые толщи реагируют на изменения температуры воздуха не только с разной интенсивностью, но при определенных условиях неоднозначно. Для бассейнов рек европейской части арктичес-

кого побережья России увеличение приземной температуры воздуха опосредованно привело к увеличению среднегодовой температуры верхнего слоя вечной мерзлоты с 1970-х гг. и по данным [2] составило 1,2–2,8 °С.

Согласно данным [15] южная граница распространения вечной мерзлоты в Печорской низменности сместилась к северу на 30–40 км, возникли многочисленные новые и углубились ранее существовавшие талики, в том числе и в зоне, где ранее наблюдалось сплошное распространение мерзлоты. Наблюдается смещение к северу границ зон сплошного и прерывистого распространения вечной мерзлоты, а в отдельных районах происходит активизация термокарста.

Такие изменения потенциально могли сказаться на интенсивности химической денудации в бассейне Печоры. Это явление было изучено по динамике косвенных показателей интенсивности химической денудации – модулей ионного стока рек Печора, Сула, Уса, Адзьва и Колва. Для их расчета использованы многолетние данные государственной наблюдательной сети Росгидромета за расходом воды и концентрациями главных ионов в период с 1985 по 2017 г.

Расчет годового ионного стока проводили суммированием значений месячного стока, вычисленных как произведение среднемесячной концентрации того или иного иона на водный сток за этот период. Модуль стока (тыс. т/км²) отдельных главных ионов рассчитывали как отношение значения годового ионного стока (тыс. т) к площади водосбора.

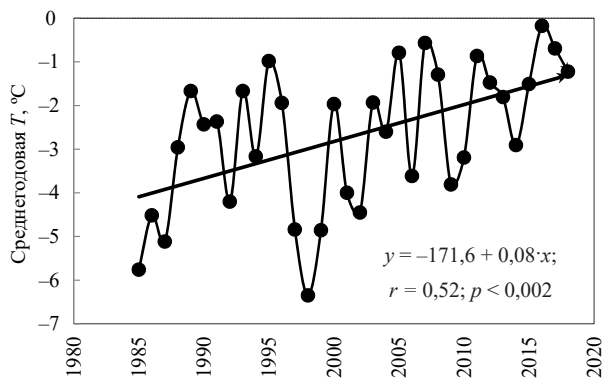


Рис. 2. Динамика среднегодовых значений приземной температуры воздуха в районе г. Нарьян-Мар

Расчеты, статистический анализ и построение графиков производили с использованием возможностей табличного редактора Microsoft Excel 365 и пакета прикладных программ Statistica 13.3.

Результаты исследования и обсуждение

Роль химического стока крупных рек России в арктические моря достаточна велика в силу его влияния на формирование гидрохимического режима устьевых экосистем рек и прибрежных частей морских акваторий [5]. Гипотеза возможного увеличения химического стока в моря Северного Ледовитого океана в связи с глобальными климатическими изменениями и деградацией вечной мерзлоты сформирована на представлениях о закономерностях влияния источников питания на химический состав водотоков. В работе [25] на примере масштабного обследования гидрохимического режима водных объектов Западной Сибири продемонстрирована шестикратная разница в минерализации рек, водосборы которых расположены в пределах и за пределами многолетнемерзлых пород. На основании этих исследований обосновано предположение, что, поскольку многолетняя мерзлота образует барьер, препятствующий разгрузке глубоко залегающих минерализованных подземных вод в русла рек, деградация этого барьера должна сопровождаться увеличением доли подземного питания, доступностью новых участков горных пород для химического выветривания и, как следствие, увеличением концентраций главных ионов и их выноса в арктические моря.

В свою очередь, увеличение выноса растворенных веществ реками свидетельствует об усилении химической денудации на их водосборах. Основным индикатором климатических изменений и усиления денудации является трансформация стока главных ионов, поэтому оценка интенсивности химических процессов для рек бассейна Печоры выполнена по ионной составляющей химического стока.

Расчеты и сравнение модулей ионного стока показали, что по интенсивности химической денудации на водосборах реки бассейна Печоры сопоставимы, за исключением рек Сула и Колва. С их речным стоком выносятся относительно повышенное количество соответственно хлоридов и гидрокарбонатов. В связи с тем, что гидрокарбонаты в водах рек этой широтной зоны количес-

твенно преобладают над остальными макрокомпонентами, модуль суммарного ионного стока р. Колва несколько выше, чем у остальных обсуждаемых рек.

В среднем реки характеризуются следующими величинами модулей стока: хлоридов — 2,26–5,22 тонн в год/км² (с водой р. Сула выносятся 9,17 тонн в год/км²), сульфатов — 3,94–6,79 тонн в год/км², гидрокарбонатов — 20,91–25,45 тонн в год/км² (с водой р. Колва выносятся 33,44 тонн в год/км²), кальция — 4,33–8,17 тонн в год/км², магния — 1,55–2,34 тонн в год/км² (рис. 3).

Статистический анализ вариационных рядов модулей стока показал, что вопреки исходным предположениям о возможном усилении процесса химической денудации в условиях потепления климата обнаружено снижение модулей стока сульфатов во всех реках (табл. 2). Для р. Уса эта динамика статистически значима при очень больших значениях p из-за влияния «экстремумов» — аномально малых значений в 1998 году и аномально больших — в 2006 и 2015 г. После исключения этих локальных пиков из выборки объемов стока сульфатов r становится равным $-0,47$ при $p = 0,019$.

Аналогичных региональных особенностей для гидрокарбонатов не обнаружено. Положительный тренд модуля их стока отмечается только в р. Колва, для которой характерна достаточно высокая скорость увеличения среднегодовых концентраций гидрокарбонатов — около 6,9 мг/л за десятилетие. В бассейне р. Печоры этот тренд является единственным свидетельством возможного усиления химической денудации карбонатных минералов.

Наблюдаются также индивидуальные для рек изменения модулей стока других главных ионов. Так, с 1985 по 2017 г. в р. Сула отмечено увеличение модуля стока хлоридов (но при сравнительно невысоком уровне доверительной вероятности $p = 0,09$), а в реках Сула и Адзъва — снижение модуля стока магния.

Таким образом, в ответ на температурные тренды климата и многолетней мерзлоты интенсивность химической денудации в бассейне р. Печоры изменилась слабо, а сток сульфатов, вопреки исходным предположениям, даже снизился. Также отсутствие изменений в интенсивности химического выветривания сульфатных

пород в бассейнах рек равнинных тундр в ответ на процессы деградации вечной мерзлоты и увеличения мощности деятельного слоя было показано в работе [27] при анализе соотношений ионов и изотопов серы в водотоках Аляски в различные сезоны. Основной причиной наблюдаемого явления авторы называют толстый слой торфа, который выполняет термоизолирующие

функции. Авторы также приходят к выводу, что прогнозируемая деградация многолетней мерзлоты должна сопровождаться растворением сульфатных солей, что можно было бы фиксировать по увеличению их концентрации в водной среде.

Каковы причины наблюдаемого снижения стока сульфатов в бассейне р. Печоры? С мате-

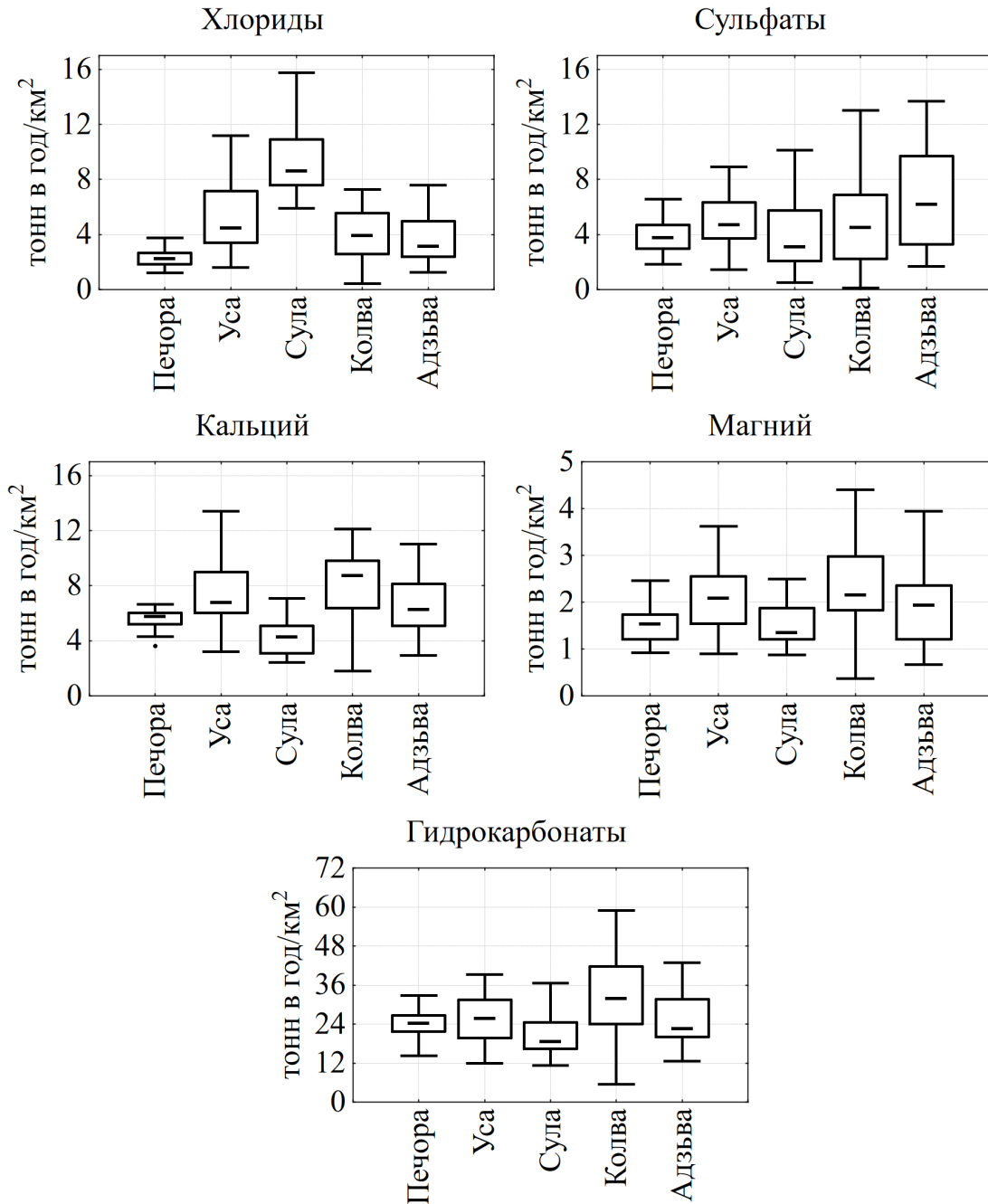


Рис. 3. Диаграммы размаха («ящики-с-усами») значений модулей стока главных ионов за период с 1985 по 2017 г.

Таблица 2

Статистические характеристики линейных регрессий временных рядов модулей стока главных ионов для рек бассейна р. Печоры

Река	Хлориды		Сульфаты		Гидрокарбонаты		Ионы кальция		Ионы магния	
	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
Печора	-0,23	0,205	-0,36	0,041	0,05	0,759	-0,08	0,663	0,07	0,699
Уса	-0,03	0,882	-0,22	0,261	0,06	0,763	-0,11	0,572	-0,09	0,631
Сула	0,34	0,090	-0,73	<i>p</i> <0,001	-0,06	0,744	-0,16	0,413	-0,43	0,015
Колва	-0,02	0,919	-0,36	0,060	0,56	0,002	0,17	0,408	0,11	0,588
Адзьва	-0,28	0,137	-0,59	<i>p</i> <0,001	-0,30	0,107	-0,29	0,147	-0,42	0,016

Примечание: *r* — значения коэффициента корреляции, *p* — доверительная вероятность.

матической точки зрения химический сток — это произведение двух переменных: водного стока и концентрации химического вещества. Изменчивость каждой из этих переменных способна повлиять на направленность тенденции химического стока. Поскольку формирование химического состава воды и функционирование исследуемых речных экосистем в бассейне Печоры происходит в сходных природно-климатических условиях, дальнейший анализ причин (факторов) изменения химического стока представлен на примере устьевого участка р. Печоры (г. Нарьян-Мар).

Водный сток для главных ионов, как правило, является основным фактором, влияющим на их концентрацию в воде. Тесная зависимость гидрохимического режима от водного проявляется в синхронном, но обратно противоположном изменении кривых минерализации и расхода воды [1]. В периоды половодья и нередко паводков наблюдается быстрое снижение концентраций ионов, в меженные периоды, напротив, увеличение.

Анализ многолетней динамики водного стока на замыкающем створе р. Печоры не выявил статистически значимого тренда за период с 1985 по 2018 г. В отличие от водного стока, динамика среднегодовых концентраций сульфатов действительно характеризуется статистически значимым убывающим трендом (рис. 4). Можно предположить, что снижение стока сульфатов здесь, как и в бассейне в целом, не коррелирует с изменением водного стока. Косвенное подтверждение этого — отсутствие динамики остальных главных ионов, особенно катионов кальция, которые могли бы поступать за счет химического выветривания гипсов и ангидрита.

Ионно-солевой состав воды р. Печоры определяется преимущественно растворением кар-

бонатных минералов в подстилающих породах. Это подтверждается соотношением между эквивалентными количествами суммы кальция и магния и гидрокарбонатов, близким к 1:1, что согласуется с уравнением гидролиза карбонатных минералов в присутствии угольной кислоты [25]. Сульфаты же в речных водах в естественных условиях образуются при растворении гипса, при этом сульфаты магния (как и одновалентных катионов щелочных металлов) получают вследствие катионного обмена между растворенным гипсом и горными породами, имеющими магний в качестве поглощающих оснований [9]. Наличие «гипсового» источника сульфатов подтверждается корреляцией между эквивалентными количествами сульфатов и суммой ионов кальция и магния (рис. 5). Теснота этой связи значительно слабее по сравнению с гидрокарбонатами, что может свидетельствовать о дополнительном (отличном от природного) источнике поступления сульфатов в речные воды (антропогенный фактор).

На водосборных территориях, расположенных вблизи побережий, одним из источников главных ионов являются атмосферные осадки. По мнению И. А. Рысаевой, для отдельных территорий сульфаты «занимают преобладающее положение, поскольку в метеорных водах отсутствуют агенты, препятствующие их миграции. Однако концентрация сульфатов в осадках обусловлена не только их высокой подвижностью, но и обилием источников пополнения атмосферы данным компонентом в континентальных условиях» [21]. Дополнительное поступление сульфатов происходит за счет антропогенного воздействия со стороны промышленных предприятий, «которые загрязняют атмосферу серноокислыми газами, яв-

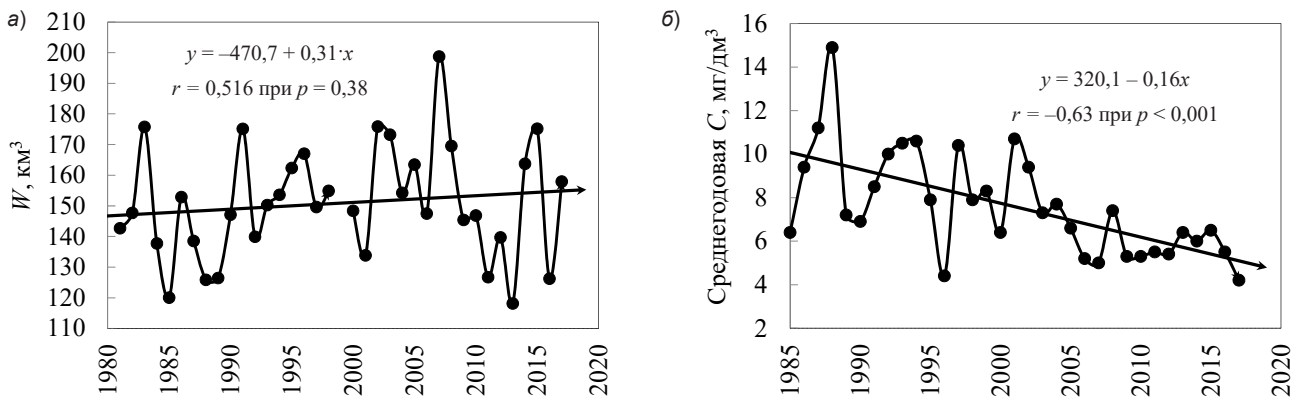


Рис. 4. Многолетняя динамика водного стока (а) и среднегодовых концентраций сульфатов (б) в воде р. Печоры в створе у г. Нарьян-Мар

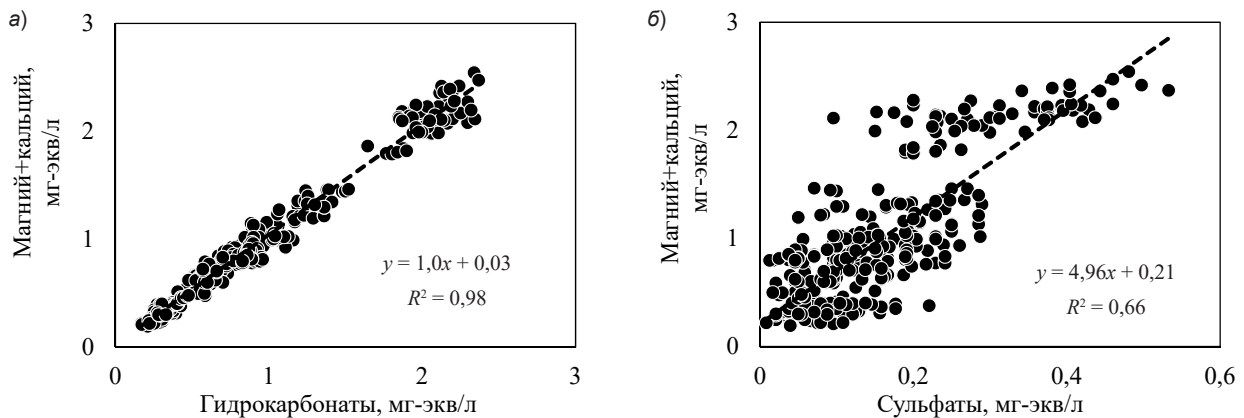


Рис. 5. Корреляционная зависимость между эквивалентными количествами (в мг-экв/л) суммы ионов магния и кальция и гидрокарбонатами (а) и сульфатами (б) в воде р. Печоры у г. Нарьян-Мар

ляющимися источниками образования ядер конденсации. Сульфаты выделяются при сжигании топлива и в ходе таких промышленных процессов, как нефтепереработка, производство цемента и гипса, серной кислоты» [21].

Чтобы оценить влияние атмосферных осадков на процессы снижения стока сульфатов, мы проанализировали данные о средневзвешенных за год концентрациях ионов в атмосферных осадках близ метеостанции г. Нарьян-Мар. Использование средневзвешенных концентраций предполагает учет количества выпавших осадков. И концентрация, и количество осадков определяют объемы поступления на постилающую поверхность различных веществ, так называемые «влажные выпадения» (P , т/км² в год), которые мы рассчитывали по формуле, приведенной в «Ежегодных данных по химическому составу атмосферных осадков» [17–20].

Выборка данных по влажным выпадениям сульфатов собрана за 1996–2015 гг. Для оценки связи между влажными выпадениями сульфатов и их среднегодовыми концентрациями в р. Печора у г. Нарьян-Мар построены диаграммы рассеяния. Пары значений сопоставлены друг другу в соответствии со сдвигом в один год, то есть независимой переменной — величине влажного выпадения за 1996 год соответствует зависимая переменная — среднегодовая концентрация сульфатов за 1997 год. Связано это с тем, что основной объем осадков на обсуждаемой территории приходится на холодное время года и макрокомпоненты попадают в речное русло не сразу, а спустя значительный промежуток времени после таяния снежного покрова.

Согласно полученным результатам (рис. 6) среднегодовая концентрация сульфатов в р. Печоре у г. Нарьян-Мар достаточно тесно ($r = 0,71$)

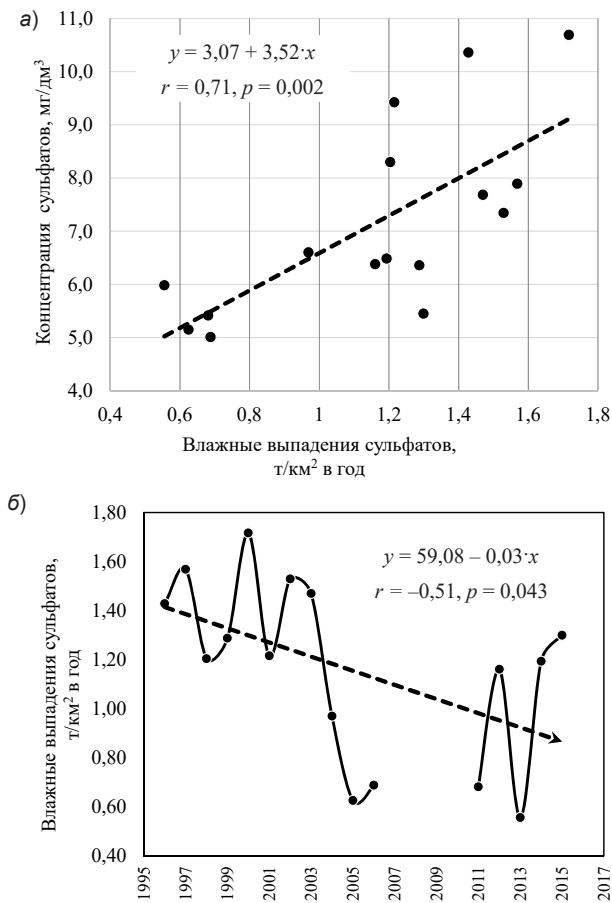


Рис. 6. Зависимость среднегодовых концентраций сульфатов в р. Печоре у г. Нарьян-Мар от количества влажных выпадений сульфатов с атмосферными водами (а) и многолетняя динамика влажных выпадений сульфатов (б)

и статистически значимо зависит от объема влажных выпадений в предшествовавшем году. С учетом того, что для влажных выпадений сульфатов обнаруживается достоверный убывающий тренд, причину наблюдаемого сокращения стока сульфатов в бассейне р. Печоры, по всей видимости, следует искать в изменении химического состава атмосферных вод.

Динамика снижения количества сульфатов в атмосферных осадках была отмечена для севера Русской равнины, начиная с 2000-х годов. Уменьшение данного макрокомпонента в осадках, по мнению И. А. Рысаевой [21], — следствие снижения антропогенного воздействия за счет сокращения «производственных мощностей, внедрения более прогрессивных технологий, снижающих негативное воздействие на окружающую среду».

Аналогичные тренды выявляются и в северных водотоках европейских стран, например, в Швеции [24], в связи с тем, что с 2000 по 2006 год выбросы оксида серы (SO_x) в странах Евросоюза и Восточной Европы сократились примерно на 20–24 % [28].

Таким образом, выявленная нами закономерность снижения стока сульфатов в бассейне р. Печоры скорее всего является региональной особенностью трансформации гидрохимического стока на фоне изменения климата и антропогенного воздействия.

Разнонаправленные тенденции изменения стока сульфатов были выявлены при изучении химического стока крупных рек арктического региона, как на территории европейской, так и азиатской части России. По данным авторов работы [12], для устьевых участков рек Поной, Оленек выявлено увеличение объемов стока сульфатов в период с 2000 по 2007 г. Особенно четко увеличение содержания сульфатов в речных водах арктических рек наблюдается как для рек Кольского полуострова, так и для крупных рек в районах промышленных центров Западно-Сибирской Арктики [7, 13].

Ранее нами были выявлены как возрастающие, так и убывающие тенденции изменения химического состава воды рек европейской части арктического побережья. Стоит отметить, что именно для реки Печоры и ее притоков (рек Колва, Адзва и Сула) установлены статистически значимые убывающие тренды концентраций сульфатов [16], что могло быть одной из причин снижения стока сульфатов в пределах водосбора.

Заключение

Таким образом, современные изменения климата слабо сказались на интенсивности химической денудации в бассейне р. Печоры.

Только в р. Колва отмечены тренды увеличения модулей стока гидрокарбонатов, ионов кальция и магния, что свидетельствует об усилении выветривания карбонатных пород. В остальных реках в ответ на климатические изменения в данном регионе многолетняя динамика модулей стока либо не изменилась, либо по отдельным ионам отмечено их снижение (например, для ионов магния в рр. Сула и Адзва).

Уменьшение модулей стока сульфатов во всех реках бассейна р. Печоры, по-видимому, связано

с хозяйственной деятельностью на водосборе и сокращением поступления сульфатов с атмосферными водами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60165

Литература

1. Алейкин, О. А. (1970). Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 444 с.
2. Анисимов, О. А. (ред.) (2010). Оценочный отчет. Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования. М.: Совет Гринпис, 44 с.
3. Брызгалов, В. А., Граевский, А. П. и Иванов, В. В. (1999). Влияние аварийных разливов нефти в бассейне р. Печоры на состояние воды и донных отложений в устьевой части. Экологическая химия, Т. 8, Вып. 3, сс. 177–185.
4. Брызгалов, В. А. и Иванов, В. В. (1999). Гидрохимический режим реки Печоры в условиях антропогенного воздействия. Экологическая химия, Т. 8, Вып. 2, сс. 91–100.
5. Брызгалов, В. А., Иванов, В. В. и Шевнина, Е. В. (2000). Изменчивость стока растворенных веществ в бассейне реки Печоры в условиях интенсивного антропогенного воздействия. Экологическая химия, Т. 9, Вып. 3, сс. 180–190.
6. Брызгалов, В. А., Решетняк, О. С., Косменко, Л. С. и Кондакова, М. Ю. (2015). Изменчивость экологического состояния и транспорт загрязняющих веществ по длине р. Печоры. Вестник Северного (Арктического) Федерального университета. Серия «Естественные науки», № 3, сс. 5–14. DOI: 10.17238/issn2227-6572.2015.3.5.
7. Даниленко, А. О., Косменко, Л. С., Решетняк, О. С. и Кондакова, М. Ю. (2020). Предпосылки техногенной метаморфизации ионного состава воды р. Надым в условиях глобальных климатических изменений. Известия РАН. Серия Географическая, № 1. сс. 127–137. DOI: 10.31857/S2587556620010069.
8. Добровольский, Г. В., Таскаев, А. И. и Забоева, И. В. (ред.) (2010). Атлас почв Республики Коми. Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 356 с.
9. Дуров, С. А. (1959). Геометрический метод в гидрохимии. Ростов-на-Дону: Ростовское книжное издательство, 196 с.
10. Жила, И. М. и Алюшинская, Н. М. (1972). Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 3. Северный край. Л.: Гидрометеоздат, 663 с.
11. Министерство транспорта Российской Федерации, Федеральное агентство геодезии и картографии Министерства транспорта Российской Федерации (2004). Национальный атлас России. Т. 2. Природа и экология. [online] Доступно по ссылке: <https://xn--80aaaa1bhnlcccl1c15c4ep.xn--p1ai/cd2/territory.html>. [Дата обращения: 06.11.2020].
12. Никаноров, А. М. и Брызгалов, В. А. (2010). Реки России. Часть II. Реки Европейского Севера и Сибири (гидрохимия и гидроэкология). Ростов-на-Дону: НОК, 296 с.
13. Никаноров, А. М., Брызгалов, В. А., Косменко, Л. С. и Даниленко, А. О. (2016). Реки материковой части Российской Арктики. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 276 с.
14. Новоселов, А. П., Студенов, И. И., Безумова, А. Л., Булатова, И. В., Боровской, А. В. и Лукин, А. А. (2012). Состояние сиговых рыб Печорского бассейна в условиях многофакторной антропогенной нагрузки. Арктика: экология и экономика. № 4 (8), сс. 26–35.
15. Оберман, Н. Г. и Лыгин, А. М. (2009). Прогнозирование деградации многолетнемерзлых пород на примере Европейского Северо-Востока страны. Разведка и охрана недр, № 7, сс. 15–20.
16. Решетняк, О. С., Кондакова, М. Ю., Даниленко, А. О., Косменко, Л. С. и Решетняк, В. Н. (2019). Тенденции изменчивости химического состава речных вод Европейской части арктической зоны России. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки, № 1 (201), сс. 86–94. DOI: 10.23683/0321-3005-2019-1-86-94.
17. Свистов П. Ф., Першина Н. А., Полищук А. И. Ежегодные данные по химическому составу атмосферных осадков за 1996–2000 гг. (Обзор данных). М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. 226 с.
18. Свистов П. Ф., Першина Н. А., Полищук А. И. Ежегодные данные по химическому составу атмосферных осадков за 2001–2005 гг. (Обзор данных). СПб: ООО «АНТТ-Принт», 2010. 128 с.
19. Свистов П. Ф., Полищук А. И., Першина Н. А., Павлова М. Т. Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2006–2010 гг. (Обзор данных). СПб: ФГБУ «ГГО» Росгидромета, 2013. 100 с.
20. Свистов П. Ф., Першина Н. А., Полищук А. И., Павлова М. Т., Семенец Е. С. Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2011–2015 гг. (Обзор данных). СПб: ФГБУ «ГГО» Росгидромета, 2016. 116 с.
21. Рысаева, И. А. (2013). Генезис и специфика пространственно-временной изменчивости сульфат- и гидрокарбонат-ионов в химическом составе атмосферных осадков на севере Русской равнины. Геология, география и глобальная энергия, № 3 (50), сс. 194–203.
22. Шарифуллин, А. Н., Денмухаметов, Р. Р., Кожеватов, Е. Д. и Мозжерин, В. И. (2008). Химическая денудация равнин. Ученые записки Казанского государственного университета. Естественные науки, Т. 150, кн. 4, сс. 51–58.
23. GenDocs.ru (2020). Физико-химическая миграция: Лекции. [online] Доступно по ссылке: <https://gendocs.ru/v1306/?cc=4&page=5>. [Дата обращения: 15.07.2020].
24. AMAP (2006). *AMAP Assessment 2006: Acidifying pollutants, Arctic haze, and acidification in the Arctic*. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 112 p.
25. Frey, K. E., Siegel, D. I. and Smith, L. C. (2007). Geochemistry of west Siberian streams and their potential response to permafrost degradation. *Water Resources Research*, Vol. 43, Issue 3, W03406. DOI: 10.1029/2006WR004902.
26. Lammers, R. B., Pundsack, J. W. and Shiklomanov, A. I. (2007). Variability in river temperature, discharge, and energy flux from the Russian pan-Arctic landmass. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, Issue G4, G04S59. DOI: 10.1029/2006JG000370.
27. Lehn, G. O., Jacobson, A. D., Douglas, T. A., McClelland, J. W., Barker, A. J. and Khosh, M. S. (2017). Constraining seasonal active layer dynamics and chemical weathering reactions occurring in North Slope Alaskan watersheds with major ion and isotope ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{44}/^{40}\text{Ca}$, and $\delta^{44}/^{42}\text{Ca}$) measurements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 217, pp. 399–420. DOI: 10.1016/j.gca.2017.07.042.
28. Tarrason, L., Nyiri, A., Gauss, M., Jonson, J. E., Mareckova, K. and Wankmuller, R. (2008). Transboundary

pollution in 2006. In: Tarrason, L. and Nyiri, A. (eds.) *Transboundary acidification, eutrophication and ground level ozone in Europe in 2006*. Oslo: Norwegian Meteorological Institute, pp. 21–36.

References

- Alekin, O. A. (1970). *Fundamentals of hydrochemistry*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 444 p.
- Anisimov, O. A. (ed.) (2010). *Assessment report. The main natural and socio-economic consequences of climate change in permafrost areas: a forecast based upon a synthesis of observations and modelling*. Moscow: Greenpeace Council, 44 p.
- Bryzgalo, V. A., Graevsky, A. P. and Ivanov, V. V. (1999). Impact of accidental oil spills in the Pechora River basin on the condition of water and bottom sediments in the mouth part. *Ekologicheskaya Khimiya (Ecological Chemistry)*, Vol. 8, No. 3, pp. 177–185.
- Bryzgalo, V. A. and Ivanov, V. V. (1999). Hydrochemical regime of the Pechora River under conditions of anthropogenic impact. *Ekologicheskaya Khimiya (Ecological Chemistry)*, Vol. 8, No. 2, pp. 91–100.
- Bryzgalo, V. A., Ivanov, V. V. and Shevnina, Ye. V. (2000). Variability of dissolved substances' runoff in the Pechora River basin under intense anthropogenic impact. *Ekologicheskaya Khimiya (Ecological Chemistry)*, Vol. 9, No. 3, pp. 180–190.
- Bryzgalo, V. A., Reshetnyak, O. S., Kosmenko, L. S. and Kondakova, M. Yu. (2015). Variation of the ecological conditions and pollutant transport along the length of the Pechora River. *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series "Natural Sciences"*, No. 3, pp. 5–14. DOI: 10.17238/issn2227-6572.2015.3.5.
- Danilenko, A. O., Kosmenko, L. S., Reshetnyak, O. S. and Kondakova M. Y. (2020). Preconditions to technogenic metamorphization of Nadym River water ionic composition in conditions of global climate change. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, No. 1, pp. 127–137. DOI: 10.31857/S2587556620010069.
- Dobrovolsky, G. V., Taskaev, A. I. and Zaboeva, I. V. (eds.) (2010). *Soil atlas of the Komi Republic*. Syktyvkar: OOO Komi Republican Publishing House, 356 p.
- Durov, S. A. (1959). *Geometric method in hydrochemistry*. Rostov-on-Don: Rostov Book Publishing House, 196 p.
- Zhila, I. M. and Alyushinskaya, N. M. (1972). *Surface water resources of the USSR. Vol. 3. Northern Territory*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 663 p.
- Ministry of Transport of the Russian Federation, Federal Agency for Geodesy and Cartography of the Ministry of Transport of the Russian Federation (2004). *National Atlas of Russia. Chapter 2. Environment (nature). Ecology*. [online] Available at: <https://xn--80aaaa1bhncelcc1cl5c4ep.xn--p1ai/cd2/territory.html> [Date accessed 06.11.2020].
- Nikanorov, A. M. and Bryzgalo, V. A. (2010). *Rivers of Russia. Part II. Rivers of the European North and Siberia (hydrochemistry and hydroecology)*. Rostov-on-Don: NOK, 296 p.
- Nikanorov, A. M., Bryzgalo, V. A., Kosmenko, L. S. and Danilenko, A. O. (2016). *Rivers of the Russian Arctic mainland*. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University, 276 p.
- Novoselov, A. P., Studenov, I. I., Bezumova, A. L., Bulatova, I. V., Borovskoj, A. V. and Lukin, A. A. (2012). State of whitefish of Pechora basin in terms of multi-factor anthropogenic impact. *Arctic: Ecology and Economy*, No. 4 (8), pp. 26–35.
- Oberman, N. G. and Lygin, A. M. (2009). Prognosis of the degradation of permafrost in an example of European North-East of Russia. *Prospect and Protection of Mineral Resources*, No. 7, pp. 15–20.
- Reshetnyak, O. S., Kondakova, M. Yu., Danilenko, A. O., Kosmenko, L. S. and Reshetnyak, V. N. (2019). Trends in the chemical composition in the river waters of the European part of the Arctic zone, Russian Federation. *Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences*, No. 1 (201), pp. 86–94. DOI: 10.23683/0321-3005-2019-1-86-94.
- Svistov P. F., Pershina N. A., Polishchuk A. I. Annual data on the chemical composition of atmospheric precipitation for 1996–2000. (Data Review). M.: Roshydromet Meteoaency, 2006. 226 p.
- Svistov P. F., Pershina N. A., Polishchuk A. I. Annual data on the chemical composition of atmospheric precipitation for 2001–2005. (Data Review). SPb: LLC "ANTT-Print", 2010. 128 p.
- Svistov P. F., Polishchuk A.I., Pershina N. A., Pavlova M. T. Annual data on the chemical composition and acidity of atmospheric precipitation for 2006–2010. (Data Review). SPb: FGBI "MGO", Roshydromet, 2013. 100 p.
- Svistov P. F., Pershina N. A., Polishchuk A. I., Pavlova M. T., Semenets E. S. Annual data on the chemical composition and acidity of atmospheric precipitation for 2011–2015 (Data Review). SPb: FGBI "MGO", Roshydromet, 2016. 116 p.
- Rysaeva, I. A. (2013). Genesis and specifics of variability sulfate- and hydrocarbonate ions in a chemical composition of an atmospheric precipitation in the north of east European Plain. *Geology, Geography and Global Energy*, No. 3 (50), pp. 194–203.
- Sharifullin, A. N., Denmukhametov, R. R., Kozhevator, Ye. D. and Mozzherin, V. I. (2008). Chemical denudation of plains. *Proceedings of the Kazan State University. Natural Sciences Series*, Vol. 150, No. 4, pp. 51–58.
- GenDocs.ru (2020). *Physical and chemical migration: Lectures*. [online] Available at: <https://gendocs.ru/v1306/?cc=4&page=5> [Date accessed July 15, 2020].
- AMAP (2006). *AMAP Assessment 2006: acidifying Pollutants, Arctic haze, and acidification in the Arctic*. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 112 p.
- Frey, K. E., Siegel, D. I. and Smith, L. C. (2007). Geochemistry of west Siberian streams and their potential response to permafrost degradation. *Water Resources Research*, Vol. 43, Issue 3, W03406. DOI: 10.1029/2006WR004902.
- Lammers, R. B., Pundsack, J. W. and Shiklomanov, A. I. (2007). Variability in river temperature, discharge, and energy flux from the Russian pan-Arctic landmass. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, Issue G4, G04S59. DOI: 10.1029/2006JG000370.
- Lehn, G. O., Jacobson, A. D., Douglas, T. A., McClelland, J. W., Barker, A. J. and Khosh, M. S. (2017). Constraining seasonal active layer dynamics and chemical weathering reactions occurring in North Slope Alaskan watersheds with major ion and isotope ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{44}/^{40}\text{Ca}$, and $\delta^{44}/^{42}\text{Ca}$) measurements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 217, pp. 399–420. DOI: 10.1016/j.gca.2017.07.042.
- Tarrason, L., Nyiri, A., Gauss, M., Jonson, J. E., Mareckova, K. and Wankmuller, R. (2008). Transboundary pollution in 2006. In: Tarrason, L. and Nyiri, A. (eds.) *Transboundary acidification, eutrophication and ground level ozone in Europe in 2006*. Oslo: Norwegian Meteorological Institute, pp. 21–36.

Авторы

Даниленко Аlesia Олеговна, канд. биол. наук
Гидрохимический институт, г. Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: a.danilenko@gidrohim.com

Решетняк Ольга Сергеевна, канд. геогр. наук, доцент
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону,
Россия
Гидрохимический институт, г. Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: olgare1@mail.ru

Косменко Людмила Семеновна, канд. хим. наук, с. н. с.
Гидрохимический институт, г. Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: l.kosmenko@gidrohim.com

Кондакова Мария Юрьевна, канд. биол. наук
Гидрохимический институт, г. Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: m.kondakova@gidrohim.com

Authors

Danilenko Alesia Olegovna, PhD in Biology
Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: a.danilenko@gidrohim.com

Reshetnyak Olga Sergeevna, PhD in Geography, Associate
Professor
Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: olgare1@mail.ru

Kosmenko Lyudmila Semenovna, PhD in Chemistry,
Senior Researcher
Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: l.kosmenko@gidrohim.com

Kondakova Maria Yur'evna, PhD in Biology
Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: m.kondakova@gidrohim.com