

УДК 504.064

DOI: 10.18384/2712-7621-2023-3-26-43

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА СТОКА ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ НА ЗАМЫКАЮЩИХ СТВОРАХ КРУПНЫХ РЕК СИБИРИ

Решетняк О. С.^{1,2}, Коваленко А. А.^{1,2}

¹ Гидрохимический институт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, д. 198, Российская Федерация; e-mail: olgare1@mail.ru

² Южный федеральный университет, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, д. 105/42, Российская Федерация; e-mail: arinaa.kov@gmail.com

Поступила в редакцию 14.02.2023

После доработки 07.06.2023

Принята к публикации 09.07.2023

Аннотация

Цель. Оценить многолетнюю динамику стока органических веществ (ОВ) и уровень суммарной нагрузки по стоку ОВ на устьевых участках крупных рек Сибири.

Процедура и методы. Для расчёта химического стока использована многолетняя гидрологическая и гидрохимическая информация за период с 1990 по 2020 гг. Рассмотрена динамика стока ОВ (в т. ч. и нефтепродуктов), а также проведена сравнительная оценка стока ОВ по удельной характеристике – модулю химического стока для устьевых участков таких рек, как Обь, Пур, Таз, Надым, Енисей, Анабар, Лена, Яна, Индигирка и Колыма.

Результаты. Показано, что наибольшие значения стока растворённых ОВ характерны для наиболее полноводных рек: Оби, Енисея, Лены, а наименьшие – для рек с невысоким водным стоком. По удельному показателю – по модулю химического стока – наибольшие значения стока легкоокисляемых ОВ фиксируются для рек Пур, Таз, Анабар и Колымы, а наибольшие значения стока трудноокисляемых ОВ и нефтепродуктов – для рек бассейна Карского моря. На основе корреляционного анализа выявлено статистически значимое возрастание стока трудноокисляемых ОВ на устьевых участках рек Оби, Пур, Енисея, Анабар, Яны и Индигирки и тренд снижения стока нефтепродуктов на участках рек Обь, Надым, Таз, Лены и Колымы. Установлено, что наименьшую суммарную нагрузку по стоку ОВ испытывают низовья рек восточной части Сибири, среднюю и высокую – устьевые участки рек бассейна Карского моря.

Теоретическая и/или практическая значимость. Результаты исследования могут быть использованы для оценки изменчивости антропогенной нагрузки на устьевые участки рек арктической зоны России и возможного влияния речного стока на гидрохимический режим устьевых экосистем арктических рек и прибрежных морских акваторий.

Ключевые слова: устьевые участки рек Сибири, сток органических веществ, модуль химического стока, тенденции, уровень нагрузки

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60165 (расчёт химического стока) и в рамках госзадания Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 тема 4.2 (оценка трендов и сравнительная оценка химического стока).

LONG-TERM TRENDS OF ORGANIC MATTER RUNOFF FROM LARGE SIBERIAN RIVERS WATERSHEDS

O. Reshetnyak^{1,2}, A. Kovalenko^{1,2}

¹ *Hydrochemical Institute of Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, pr. Stachki 198, Rostov-on-Don 344090, Russian Federation; e-mail: olgare1@mail.ru*

² *Southern Federal University, ul. B. Sadovaya 105/42 Rostov-on-Don 344006, Russian Federation; e-mail: arinaa.kov@gmail.com*

Received 14.02.2023

Revised 21.08.2023

Accepted 05.09.2023

Abstract

Aim. To evaluate the dynamics and load level of dissolved organic matter (DOM) runoff in the river-mouth sections of large Siberian rivers.

Methodology. To calculate the values of chemical runoff, long-term hydrological and hydrochemical information for the period from 1990 to 2020 were used. The dynamics of the organic matter (OM) runoff (including oil products) is considered. A comparative assessment of the runoff of DOM was carried out according to the specific characteristic – the module of chemical runoff – for the mouth sections of such rivers as the Ob, the Pur, the Taz, the Nadym, the Yenisei, the Anabar, the Lena, the Yana, the Indigirka and the Kolyma.

Results. It is shown that the largest values of DOM runoff are typical for the most full-flowing rivers (the Ob, the Yenisei, and the Lena rivers), while the smallest volumes are typical for rivers with a low water runoff. According to such a specific characteristic as the modulus of chemical runoff, the highest runoff values of easily oxidizable OM are recorded for the Pur, the Taz, the Anabar, and the Kolyma rivers, and the highest values of the runoff of hardly oxidizable OM and oil products are recorded for the rivers of the Kara Sea basin.

Correlation analysis revealed a statistically significant increase in the runoff of hard-to-oxidize OM in the mouth areas of such rivers as the Ob, the Pur, the Yenisei, the Anabar, the Yana, and the Indigirka. A declining trend of the oil products runoff was identified in the sections of the Ob, the Nadym, the Taz, the Lena and the Kolyma rivers.

It has been established that the lower reaches of the Eastern Siberia rivers incur the least total load of the OM runoff and the river-mouth sections of the Kara Sea basin incur the average and high load.

Research implications. Results and obtained data could be used to assess the variability of anthropogenic load and water quality in the mouths sections of the rivers. Also, the findings can be used to study the possible impact of river runoff on the hydrochemical regime of Arctic rivers-mouth ecosystems and coastal marine areas.

Keywords: mouth sections of the Siberian rivers, dissolved organic matter runoff, runoff chemical modulus, trends, load level

Acknowledgments: The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research as the part of a scientific project no. 18-05-60165 (the calculation of chemical runoff values) and as the part of the state task of Plan of Roshydromet for 2020–2024, topic 4.2 (the evaluation of trends and comparative assessment of chemical runoff).

Введение

Поступление химических веществ с речным стоком с водосборов крупных рек Сибири – один из важнейших факторов формирования гидрохимического режима низовий рек и их устьевых областей. Сток органических веществ формируется под влиянием природных и антропогенных факторов и во многом зависит от изменчивости водного стока. Крупные реки Сибири формируют химический сток с огромных водосборных площадей, и большая часть растворённых веществ транспортируется вниз по течению на устьевые участки [2; 10]. Для одних рек ведущим фактором формирования стока органических веществ может являться природный фактор (водный сток), а для других – антропогенный.

Вместе с тем поступление загрязняющих веществ, в т. ч. стойких органических соединений, может быть обусловлено атмосферным переносом в арктическую зону России из других регионов, что будет усиливать нагрузку на экосистемы и окружающую среду в целом, особенно в условиях климатических изменений [2].

Изменение климата прямо или косвенно оказывает воздействие на пресноводные речные экосистемы. Особенно важным в этом плане является рост температуры воды и количества осадков, таяние вечной мерзлоты, изменение сроков и интенсивности

стока рек, возрастание потока растворённых и взвешенных веществ [8].

В настоящее время потепление в сибирском секторе Арктики вызывает интенсивные изменения, которые отражаются в количестве атмосферных осадков и запасах подземных вод, что в итоге влияет и на сток рек в Северный Ледовитый океан [16]. Изменение речного стока, а также изменение температуры и биогеохимических свойств речной воды могут значительно повлиять на состояние прибрежных морских экосистем и на воды Северного Ледовитого океана в целом. Так, например, увеличение выноса с речными водами органических веществ в арктические моря приводит к более сильному поглощению солнечного света и увеличению потока тепла, что в свою очередь может способствовать уменьшению количества морского льда [17].

В то время как твёрдые частицы в основном осаждаются в устьях и на шельфах, растворённое органическое вещество выносится в прибрежные воды арктических морей, и примерно 50% переносится далее в Атлантический океан [15].

Дополнительное поступление органических веществ в устьевые экосистемы рек и прибрежные акватории морей может стать причиной развития процессов эвтрофирования в тёплый вегетационный период и усиления вероятности органического загрязнения водных экосистем [7].

В таком контексте изучение динамики стока органических веществ арктическими реками является актуальным не только в региональном, но и в глобальном масштабе.

Анализ динамики стока органических веществ на замыкающих створах крупных рек Сибири

Как известно, сток растворённых веществ – это выносимое реками с какой-либо территории в течение года количество неорганических и органических веществ, находящихся в ионно-молекулярном и коллоидном состоянии. Сток растворённых веществ состоит из таких компонентов, как главные ионы, соединения металлов,

биогенные вещества и органические вещества (ОВ)¹.

Оценка динамики стока органических веществ с водосборов крупных рек Сибири выполнена по нижнему (замыкающему водосбор) створу по руслу реки (рис. 1). Для расчёта химического стока использованы гидрологические данные: расход воды (м³/с) или водный сток (км³) в год и массовые концентрации ОВ (гидрохимические данные) за период с 1990 по 2020 гг. Рассмотрена динамика стока легкоокисляемых (ЛОВ) и трудноокисляемых органических веществ (ТОВ), в т. ч. и нефтепродуктов, условно оцениваемых по интегральным показателям содер-

¹ Никаноров А. М. Гидрохимия: учебник. Ростов-на-Дону: НОК, 2008. 461 с.

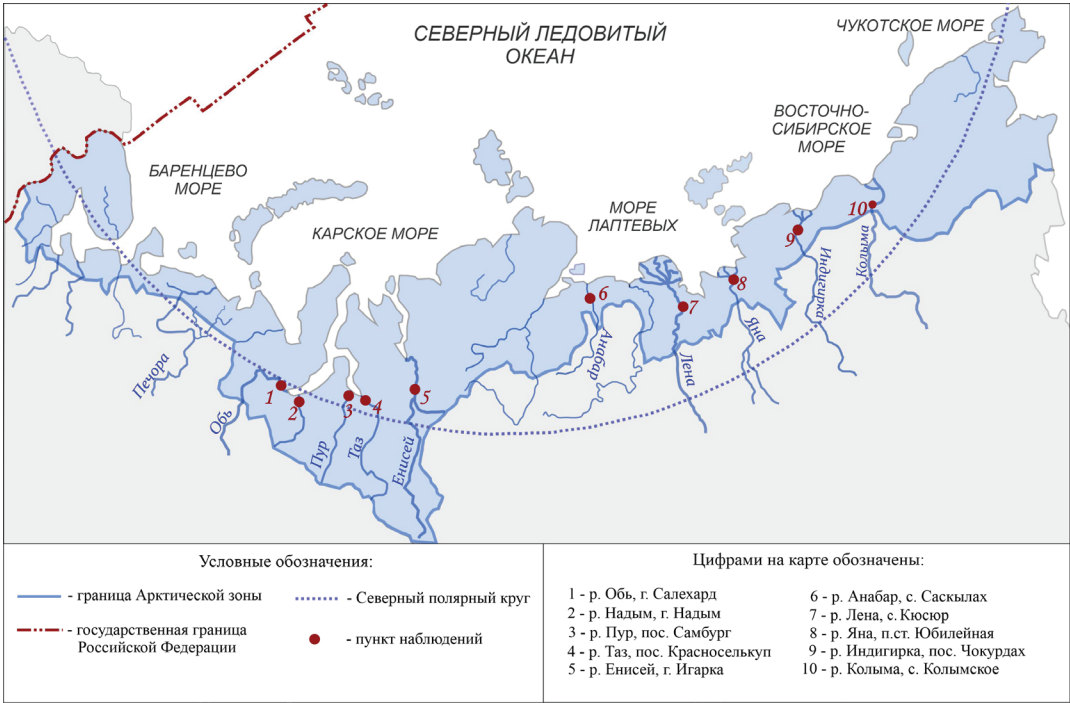


Рис. 1 / Fig. 1. Картограмма расположения замыкающих створов крупных рек Сибири / A outlets location map of large Siberian rivers

Источник: составлено авторами

жания ОВ, для устьевых участков рек Оби, Пур, Таз, Надыма, Енисея, Анабар, Лены, Яны, Индигирки и Колымы.

Содержание ЛОВ условно определяется по показателю БПК₅ воды (биохимическое потребление кислорода в воде за 5 суток); содержание ТОВ – по показателю ХП (химическое потребление кислорода в воде).

Состав ОВ в природных водах чрезвычайно разнообразен. Это и весьма сложные высокомолекулярные соединения типа белков и полисахаридов, разнообразные нефтяные углеводороды, смолы и др., относящиеся к ТОВ, и более простые – метан, формальдегид, низшие спирты, летучие фенолы и др. – типичные ЛОВ. В поверхностных водах ОВ появляются в результате многообразных по своей природе и скорости процессов: жизнедеятельность и отмирание гидробионтов, поступление с атмосферными осадками, с поверхностным стоком, из других объектов (болот, торфяников), а также с промышленными и хозяйственно-бытовыми сточными водами, с дренажными водами с орошаемых сельскохозяйственных территорий¹.

Расчёт химического стока (G, тыс. т) ОВ на замыкающих створах исследуемых рек за каждый год исследуемого периода выполнен прямым методом по формуле [2; 10]:

$$G = \bar{C}_e * W,$$

где:

$\bar{C}_e$ – среднегодовая концентрация органических веществ (ЛОВ, ТОВ или нефтепродуктов) в рассматриваемом створе реки, мг/дм³,

W – водный сток за год, км³.

¹ Зенин А. А., Белоусова Н. В. Гидрохимический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 239 с.

Исследуемые реки отличаются друг от друга по длине и площади водосбора, поэтому для сравнения химического стока целесообразно использовать удельный показатель – модуль химического стока (отношение значения химического стока к площади водосбора, тонн/(км²/год)) [2; 13].

Для выявления статистически значимой многолетней динамики стока растворённых веществ использован метод корреляционного анализа и рассчитан коэффициент корреляции Кендалла, характеризующий меру линейной связи между датой и значением химического стока [11; 12].

Оценка уровня нагрузки по стоку ОВ на устьевые участки крупных рек Сибири проводилась на основе широко используемого в эколого-географических исследованиях балльного подхода.

По среднемноголетним значениям модулей стока ЛОВ, ТОВ и нефтепродуктов всех исследуемых участков рек составлен диапазон значений по каждому показателю: модуль стока ЛОВ изменялся от 0,28 до 0,63 тонн/(км²/год), модуль стока ТОВ – от 2,26 до 6,49 тонн/(км²/год) и модуль стока нефтепродуктов – от 0,003 до 0,133 тонн/(км²/год).

Эти данные были ранжированы и разделены на 3 равных интервала, соответствующие низкому (1 балл), среднему (2 балла) и высокому (3 балла) уровню нагрузки по стоку соответствующего компонента (табл. 1).

Далее проводится балльная оценка нагрузки по стоку ОВ по каждому компоненту, присваиваются баллы. Для общей оценки нагрузки по стоку ОВ проводится расчёт среднего балла, и округлённые до целых чисел результаты (итоговые баллы) позволяют

Таблица 1 / Table 1

Шкала балльной оценки нагрузки по стоку органических веществ (на примере крупных рек Сибири) / The load level scoring scale of the organic substances runoff (on the example of the large Siberian rivers)

Уровень нагрузки	Модуль стока ЛОВ		Модуль стока ТОВ		Модуль стока нефтепродуктов		Итоговая оценка (средний балл)
	значения, $\frac{\text{тонн}}{\text{км}^2/\text{год}}$	балл	значения, $\frac{\text{тонн}}{\text{км}^2/\text{год}}$	балл	значения, $\frac{\text{тонн}}{\text{км}^2/\text{год}}$	балл	
Низкий	0,23–0,49	1	3,11–5,80	1	0,004–0,076	1	1
Средний	0,50–0,75	2	5,81–8,48	2	0,077–0,149	2	2
Высокий	0,76–1,01	3	8,49–11,2	3	0,150–0,220	3	3

Источник: составлено авторами

оценить уровень нагрузки по стоку ОВ как: низкий – 1 балл, средний – 2 балла или высокий – 3 балла.

Таким образом, для исследуемых рек Сибири может быть выполнена условная оценка нагрузки по стоку ОВ на устьевой участок.

Изменчивость химического стока арктических рек в многолетнем аспекте служит индикатором возможных климатических изменений в регионе. Взаимосвязь водного речного и химического стока используется для изучения других природных процессов в Арктике, таких, как: изменение состава вод устьевых областей и морских прибрежных акваторий [6], трансформация стока веществ в маргинальных фильтрах устьев рек, изменение зон опреснения и др.

Определяющим фактором в изменчивости химического стока является водный сток [2; 6; 10]. Чем он больше, тем, соответственно, большее количество растворённых веществ может быть вынесено рекой.

В данной работе рассматривается одна из составляющих стока раство-

рённых химических веществ – сток органических веществ.

Многолетний сток ОВ на замыкающих створах крупных рек Сибири

Сток ОВ с водосборов крупных рек Сибири происходит в акватории трёх морей: Карского моря, моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. Среднегодовой суммарный сток ОВ (за период 1981–2000 гг.) с водосборов крупных рек составил порядка 24 667 тыс. тонн в бассейне Карского моря, 11 787 тыс. тонн – в бассейне моря Лаптевых и 2 240 тыс. тонн – в бассейне Восточно-Сибирского моря (без учёта стока нефтепродуктов) [3]. При этом антропогенная составляющая стока ОВ с водосборов бассейна Карского моря составляла в среднем от 9% (р. Енисей) до 54% (р. Пур), а в бассейне рек Восточно-Сибирского моря она была отрицательной, что «характерно для малоосвоенных территорий водосборных бассейнов рек, где техногенная компонента стока веществ не сформирована» [3].

Таблица 2 / Table 2

Многолетний сток органических веществ на замыкающих створах крупных рек Сибири (1990–2020 гг.) / Long-term organic matter runoff in the mouth sections of the large Siberian rivers (1990–2020)

№	Река	Пункт наблюдений	W*, км ³	G, тыс. тонн		
				ЛОВ	ТОВ	Нефтепродукты
Бассейн Карского моря						
1	Обь	г. Салехард	418,1	357–1707**	6097–16257	1,5–626
				679	11019	208
2	Надым	г. Надым	11,9	мало данных	150–464	0,3–19,0
					266	6,9
3	Пур	пос. Самбург	28,4	мало данных	150–1335	0,8–36,5
					669	14,9
4	Таз	пос. Красноселькуп	31,4	26–156	331–2412	0,4–44,2
				88,0	974	19,3
5	Енисей	г. Игарка	605,6	363–1688	9770–19691	48,4–441
				734	13630	205
Бассейн моря Лаптевых						
6	Анабар	с. Саскылах	25,0	12–128	279–937	0,1–1,0
				62	599	0,5
7	Лена	с. Кюсюр	480,1	220–1718	2074–16780	2,8–103
				1008	8352	36,8
8	Яна	п. ст. Юбилейная	36,8	21–178	416–982	0,4–6,8
				74	697	2,6
Бассейн Восточно-Сибирского моря						
9	Инди́гирка	пос. Чокурдах	56,5	69–171	632–2106	0,5–4,4
				110	1169	1,2
10	Колыма	с. Колымское	105,2	118–474	467–2618	0,9–21,6
				303	1544	4,7

*среднемноголетний водный сток в устье (1990–2020 гг.);

**в числителе представлен диапазон значений, в знаменателе – среднемноголетнее значение химического стока.

Источник: составлено авторами по многолетним данным Росгидромета

В таблице 2 представлены диапазоны и среднемноголетние значения, характеризующие многолетний сток ОВ с водосборов крупных рек Сибири. Наблюдается значительная изменчивость стока ОВ по абсолютным значениям. Среднемноголетние значения стока ОВ варьируют: по ЛОВ – от 62 тыс. тонн (р. Анабар) до 1 008 тыс.

тонн (р. Лена); по ТОВ – от 266 тыс. тонн (р. Надым) до 13 630 тыс. тонн (р. Енисей); по нефтепродуктам – от 0,5 тыс. тонн (р. Анабар) до 205–208 тыс. тонн (реки Енисей, Обь).

Как и следовало ожидать, наибольшие величины стока растворённых органических веществ характерны для

Таблица 3 / Table 3

Среднемноголетние значения модулей стока органических веществ на замыкающих створах крупных рек Сибири (1990–2020 гг.) / Long-term average values of organic matter runoff modules in the mouth sections of the large Siberian rivers (1990–2020)

Река	Пункт наблюдений	Площадь водосбора, тыс.км	Модуль стока, тонн/(км ² ·год)		
			ЛОВ	ТОВ	нефтепродукты
Бассейн Карского моря					
Обь	г. Салехард	2 950	0,23	3,74	0,071
Надым	г. Надым	48	м.д.	5,53	0,144
Пур	пос. Самбург	95,1	м.д.	7,03	0,156
Таз	пос. Красноселькуп	87,2	1,01	11,2	0,220
Енисей	г. Игарка	2 440	0,30	5,59	0,084
Бассейн моря Лаптевых					
Анабар	с. Саскылах	78,8	0,79	7,60	0,006
Лена	с. Кюсюр	2 430	0,41	3,44	0,015
Бассейн Восточно-Сибирского моря					
Яна	п. ст. Юбилейная	224	0,33	3,11	0,011
Индигирка	пос. Чокурдах	322	0,34	3,63	0,004
Колыма	с. Колымское	413	0,73	3,52	0,011

Источник: составлено авторами по многолетним данным Росгидромета

наиболее полноводных рек арктической зоны России.

Среднемноголетние значения модулей стока ОВ на замыкающих створах исследуемых рек представлены в таблице 3. В целом наибольшие значения модуля стока ЛОВ характерны для рек Таз, Анабар и Колымы, стока ТОВ и нефтепродуктов – для всех исследуемых рек бассейна Карского моря и р. Анабар по стоку ТОВ. Именно для этих рек будет формироваться высокая нагрузка на устьевой участок за счёт стока органических веществ с водосборных площадей рек.

Динамика стока ОВ на замыкающих створах крупных рек Сибири

Как известно, динамика стока растворённых химических веществ от-

ражает все естественные и антропогенные факторы формирования стока воды и химического состава речных вод на водосборах. Межгодовая изменчивость химического стока даёт интегральное представление о роли хозяйственной деятельности на водосборных территориях и может быть использована при решении ряда прикладных вопросов [6].

Химический сток рек – важнейшая геохимическая характеристика, описывающая эрозионные и аккумулятивные процессы на земной поверхности. Он количественно характеризует основную расходную часть солевого баланса бассейна реки, эрозию почв и пород, процессы выветривания, карстообразования, засоления территории¹.

¹ Никаноров А. М. Гидрохимия: учебник. Ростов-на-Дону: НОК, 2008. 461 с.

В естественных условиях наблюдается тесная взаимосвязь между химическим и водным стоками и признаком антропогенного влияния и усиления хозяйственной деятельности на водосборе будет нарушение этой зависимости [5]. По многолетней изменчивости стока растворённых веществ можно косвенно судить об интенсивности химической денудации в бассейне [1]. Пространственно-временная изменчивость химического стока в таких крупных речных бассейнах, как Лена, значительно влияет на химический состав, степень загрязнённости и каче-

ство воды в частных конечных бассейнах стока [4].

Основная направленность тенденций в динамике модулей стока ОВ для устьевых участков исследуемых рек оценена по результатам расчёта коэффициента корреляции Кендалла (табл. 4).

В динамике модулей стока ЛОВ нет общих однонаправленных тенденций в пределах исследуемых бассейнов рек. Статистически подтверждено снижение стока ЛОВ на устьевых участках рек Яна и Индигирка и тенденция возрастания за многолетний период для рек Оби и Колымы.

Таблица 4 / Table 4

Значения коэффициентов корреляции Кендалла, характеризующих тенденции изменения модулей стока органических веществ на замыкающих створах крупных рек Сибири (1990–2020 гг.) / The Kendall correlation coefficient values characterizing the organic matter runoff temporal trends in the mouth sections of large Siberian rivers, 1990–2020

Река	Пункт наблюдений	Коэффициент корреляции для		
		ЛОВ	ТОВ	нефтепродуктов
Бассейн Карского моря				
Обь	г. Салехард	0,32	0,28	– 0,54
Надым	г. Надым	м.д.	–	– 0,53
Пур	пос. Самбург	м.д.	0,44	–
Таз	пос. Красноселькуп	–	–	– 0,37
Енисей	г. Игарка	–	0,26	–
Бассейн моря Лаптевых				
Анабар	с. Саскылах	–	0,26	–
Лена	с. Кюсюр	–	– 0,33	– 0,32
Бассейн Восточно-Сибирского моря				
Яна	п. ст. Юбилейная	– 0,39	0,30	–
Индигирка	пос. Чокурдах	– 0,49	0,36	–
Колыма	с. Колымское	0,46	–	– 0,61
Статистически значимые тенденции (при $p<0,05$ и выше): зелёный – убывающая тенденция; розовый – возрастающая тенденция; прочерк – отсутствие статистически значимого тренда; м.д. – мало данных для оценки тенденции.				

Источник: составлено авторами

Выявлены статистически достоверные тенденции снижения стока нефтепродуктов для половины исследуемых участков рек. Данная связь характеризуется как *сильная* для рек Оби, Надым и Колымы или как *связь умеренной силы* – для рек Таз и Лены. Такое одновременное снижение стока нефтепродуктов на значительной территории может быть обусловлено как уменьшением общей антропогенной нагрузки, так и за счёт увеличения ресурсов поверхностных вод (водного стока рек на территории Сибири) за счёт увеличения атмосферных осадков, оттаивания мёрзлых пород и уменьшения ледового покрова рек [14] и, как следствие, за счёт усиления разбавляющей способности рек.

В случае модулей стока ТОВ, напротив, наблюдается статистически значимое возрастание умеренной силы для большинства исследуемых рек (Оби, Пур, Енисей, Анабар, Яны и Индигирки). Статистически значимое снижение модулей стока ТОВ характерно только на устьевом участке р. Лены ($r = -0,33$).

На рисунке 2 продемонстрирован статистически значимый тренд снижения стока нефтепродуктов на устьевых участках рек Оби и Лены (коэффициенты корреляции соответственно равны ($r = -0,54$) и ($r = -0,32$), что подтверждает зависимость сильной и умеренной силы).

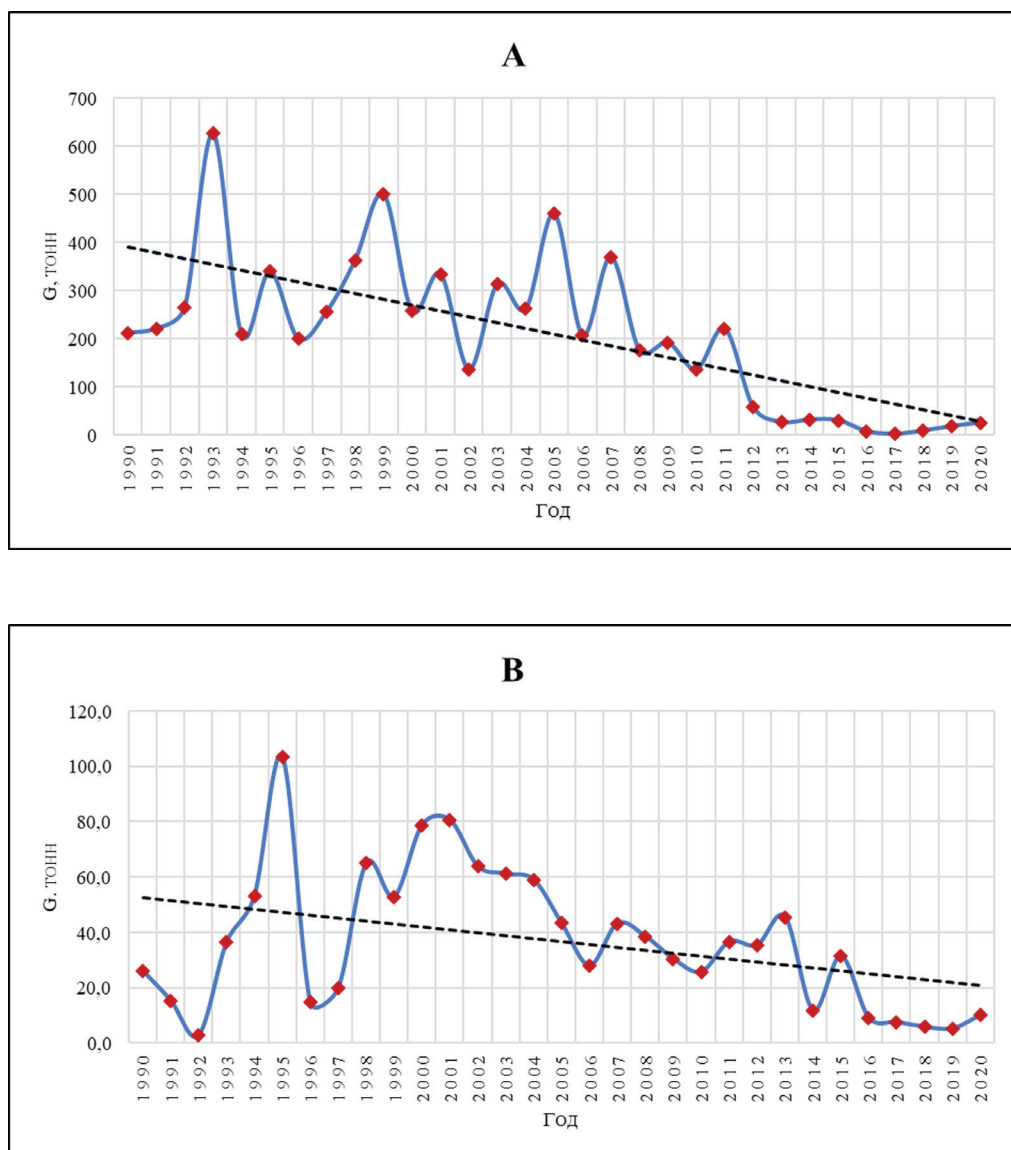
На рисунке 3 представлены статистически значимые тенденции снижения стока ТОВ на замыкающем створе р. Лена и роста содержания ТОВ на устьевом участке р. Яна (коэффициенты корреляции соответственно равны ($r = -0,33$) и ($r = +0,30$), что указывает на связь умеренной силы).

Одним из значимых факторов возрастающего тренда стока ТОВ является усиление процессов протаивания многолетнемёрзлых пород, вымывания органических веществ (в т. ч. гумусовых) из верхних почвенных горизонтов и других явлений, активизация которых происходит в связи с климатическими изменениями на водосборах арктических рек [12; 16]. Тенденция снижения стока ТОВ для р. Лены выделяется на фоне возрастания стока ТОВ для большинства исследуемых рек и требует дополнительного исследования.

Оценка уровня антропогенной нагрузки на устьевые участки рек Сибири по стоку ОВ

Антропогенная нагрузка на устьевые области рек Сибири обуславливается поступлением химических веществ с речным стоком. Оценка антропогенной нагрузки целесообразно проводить по модулю стока химических веществ в замыкающем створе, отражающем суммарный эффект речного переноса и трансформации химического состава воды по длине реки [13].

Результаты балльной оценки уровня нагрузки по стоку органических веществ на устьевые участки исследуемых рек Сибири представлены в *таблице 5*. Для исследуемых рек бассейна Карского моря нагрузка по стоку ОВ меняется от низкой (для полноводных рек Оби и Енисея) до высокой (для рек Пур и Таз). Для рек Восточной Сибири нагрузка оценена как низкая, за исключением реки Анабар. Пространственное изменение общей нагрузки по стоку ОВ представлено на картосхеме (рис. 4).

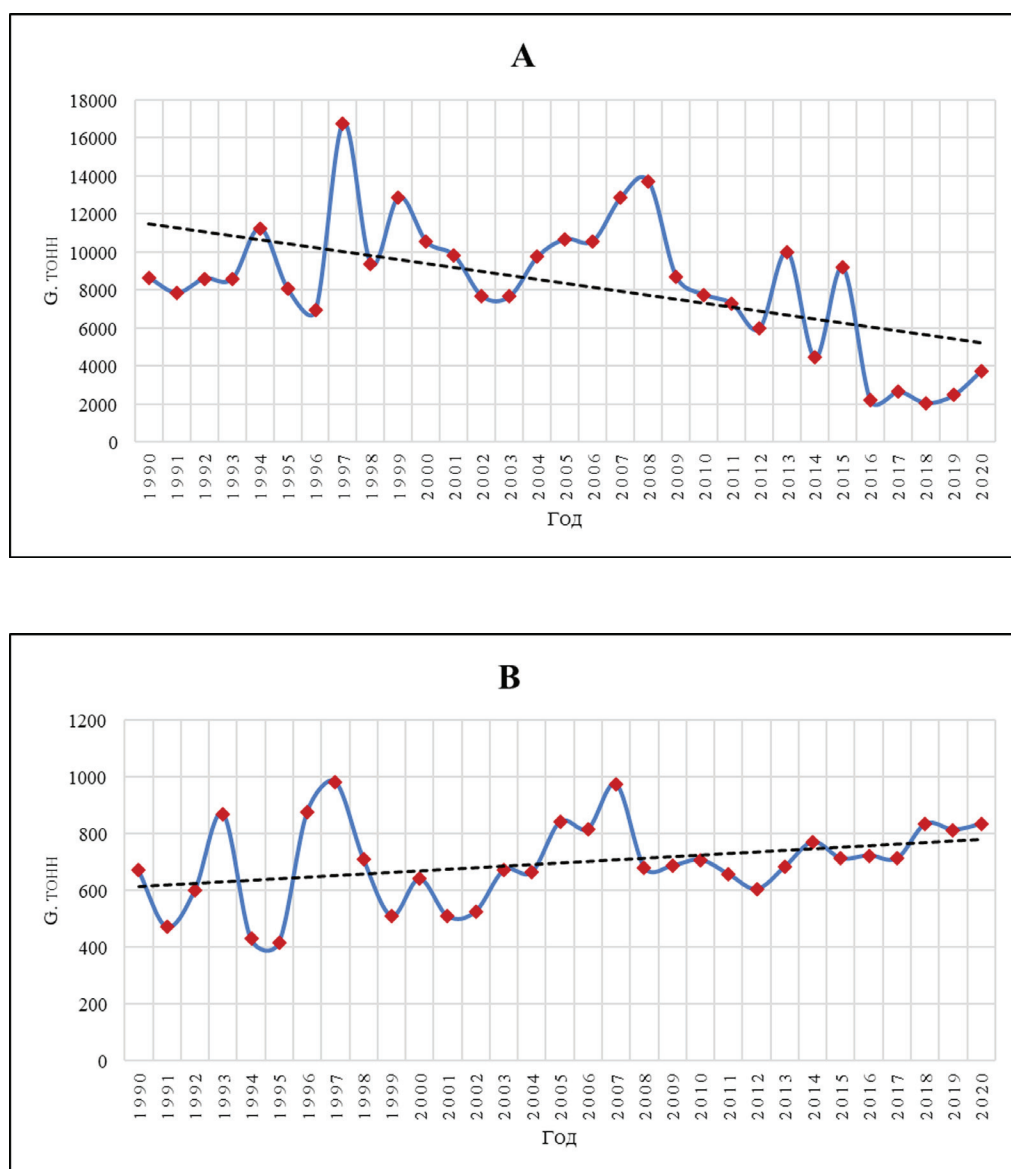


Условные обозначения:

A – р. Обь, г. Салехард; **B** – р. Лена, с. Кюсюр

Рис. 2 / Fig. 2. Тенденции стока нефтепродуктов на замыкающих створах отдельных рек Сибири / Trends in the oil products runoff in the mouth sections of the large Siberian rivers

Источник: составлено авторами



Условные обозначения:

А – р. Лена, с. Кюсюр; **Б** – р. Яна, п.ст. Юбилейная

Рис. 3 / Fig. 3. Тенденции стока трудноокисляемых органических веществ на замыкающих створах отдельных рек Сибири / Trends in the runoff of hardly oxidizable organic substances in the mouth sections of the large Siberian rivers

Источник: составлено авторами

Таблица 5 / Table 5

Балльная оценка уровня нагрузки по стоку органических веществ на замыкающих створах крупных рек Сибири / Scoring of the load level by the organic matter runoff in the mouth sections of the large Siberian rivers

Река	Пункт наблюдений	Условный балл по модулю стока			Нагрузка по стоку ОВ	
		ЛОВ	ТОВ	НФ	средний балл	уровень
Бассейн Карского моря						
Обь	г. Салехард	1	1	1	1,0	низкий
Надым	г. Надым	–	1	2	1,5 => 2,0	средний
Пур	пос. Самбург	–	2	3	2,5 => 3,0	высокий
Таз	пос. Красноселькуп	3	3	3	3,0	высокий
Енисей	г. Игарка	1	1	2	1,3 => 1,0	низкий
Бассейн моря Лаптевых						
Анабар	с. Саскылах	3	2	1	2,0	средний
Лена	с. Кюсюр	1	1	1	1,0	низкий
Яна	п. ст. Юбилейная	1	1	1	1,0	низкий
Бассейн Восточно-Сибирского моря						
Индиگیرка	пос. Чокурдах	1	1	1	1,0	низкий
Колыма	с. Колымское	2	1	1	1,3 => 1,0	низкий

Источник: составлено авторами

По среднемноголетним значениям модуля стока ОВ наибольшую нагрузку испытывают низовья рек Пур и Таз, расположенные в наиболее техногенно напряжённом районе Западной Сибири – Надым-Пур-Тазовском междуречье, – которое является одним из крупнейших нефтедобывающих районов России.

В целом прослеживается снижение уровня нагрузки по стоку ОВ в направлении с запада на восток. Полученные результаты вполне согласуются с выполненной ранее оценкой уровня антропогенной нагрузки по модулям стока приоритетных химических веществ (азота аммонийного, ЛОВ и нефтепродуктов).

В частности, было установлено, что наименьшую антропогенную нагрузку испытывают устьевые участки рек

Восточной Сибири, а более значительная антропогенная нагрузка характерна для устьев рек Западной Сибири (в силу большей освоенности территории и, соответственно, более высокой техногенной составляющей). При этом в последние годы наблюдается снижение уровня антропогенной нагрузки для большинства рек арктической зоны России [9].

Заключение

Изучена многолетняя динамика стока органических веществ на замыкающих створах крупных рек бассейнов Карского моря, моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря и оценена нагрузка по стоку ОВ.

Результаты проведённого исследования позволили выделить следующие закономерности:



Рис. 4 / Fig. 4. Картограмма распределения уровня нагрузки на замыкающих створах крупных рек Сибири по стоку органических веществ / A map of the load level on the river mouth sections of the large Siberian rivers according to the runoff of organic matter

Источник: составлено авторами

1. наблюдается значительная пространственно-временная изменчивость стока ОВ. По абсолютным значениям наибольшие величины стока растворённых ОВ характерны для наиболее полноводных рек арктической зоны России. По удельному показателю – модулю химического стока – картина иная: наибольшие значения модуля стока ЛОВ характерны для рек Таз, Анабар и Колымы, модуля стока ТОВ – для рек Пур, Таз и Анабар, а по нефтепродуктам – для всех исследуемых рек бассейна Карского моря, кроме р. Обь;

2. оценка направленности тенденций изменения стока ОВ с использо-

ванием коэффициента корреляции Кендалла показала, что в динамике стока ЛОВ нет общих однонаправленных тенденций в пределах исследуемых бассейнов рек. Для стока ТОВ установлено статистически значимое возрастание модулей стока на устьевых участках рек Оби, Пур, Енисея, Анабар, Яны и Индигирки, в динамике стока нефтепродуктов выявлен статистически значимый тренд снижения для рек Оби, Надым, Таз, Лены и Колымы;

3. оценка уровня нагрузки по стоку ОВ на замыкающих створах крупных рек Сибири на основе балльного подхода показала, что для исследуемых

рек бассейна Карского моря нагрузка по стоку ОВ меняется от «низкой» до «высокой». Для рек Восточной Сибири нагрузка оценена как низкая, за исключением р. Анабар.

Стоит отметить, что в устьевых областях рек, по данным различных авторов, осаждается порядка 80–90% взвешенного и около 20–40% растворённого вещества, выносимого речным потоком. Поэтому данные о стоке органических веществ на замыкающих створах исследуемых рек мо-

гут использоваться только в первом приближении для оценки их выноса в прибрежные акватории арктических морей.

Полученные данные могут быть использованы также для оценки изменчивости антропогенной нагрузки по стоку химических веществ, качества воды на устьевых участках рек и возможного влияния речного стока на гидрохимический режим прибрежных морских акваторий арктических морей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Изменение интенсивности химической денудации на водосборе Печоры в условиях нестационарного климата и хозяйственной деятельности / А. О. Даниленко, О. С. Решетняк, Л. С. Косменко, М. Ю. Кондакова // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 4. С. 38–49.
2. Никаноров А. М., Иванов В. В., Брызгалов В. А. Реки Российской Арктики в современных условиях антропогенного воздействия. Ростов-на-Дону: НОК, 2007. 280 с.
3. Никаноров А. М., Смирнов М. П., Клименко О. А. Многолетние тенденции общего и антропогенного выноса органических и биогенных веществ реками России в Арктические и Тихоокеанские моря // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 3. С. 318–328.
4. Особенности химического состава и качества воды в бассейне реки Лена / Р. Г. Джамалов, О. С. Решетняк, К. Г. Власов, К. Г. Галагур, А. С. Оботуров, Т. И. Сафронова // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 3. С. 33–43.
5. Предпосылки техногенной метаморфизации ионного состава воды р. Надым в условиях глобальных климатических изменений / А. О. Даниленко, Л. С. Косменко, О. С. Решетняк, М. Ю. Кондакова // Известия РАН. Серия Географическая. 2020. № 1. С. 127–137.
6. Решетняк О. С. Многолетняя изменчивость ионного стока крупных рек арктической зоны России // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2021. № 3. С. 80–86.
7. Решетняк О. С. Оценка уровня экологического риска в речных экосистемах арктической зоны России // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2020. № 3. С. 69–78.
8. Решетняк О. С. Трансформация речных экосистем Европейского Севера России в условиях антропогенного воздействия: дис. ... канд. геогр. наук. Ростов-на-Дону, 2010. 178 с.
9. Решетняк О. С., Косменко Л. С., Коваленко А. А. Антропогенная нагрузка по модулю химического стока и качество воды на замыкающих створах рек арктической зоны России // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2022. № 3. С. 3–17.
10. Роль химического речного стока в антропогенной трансформации состояния водной среды Енисейской устьевой области / А. М. Никаноров, В. А. Брызгалов, Л. С. Косменко, О. С. Решетняк // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 4. С. 434–444.

11. Сток растворенных химических веществ для рек Западно- и Восточно-Сибирской частей Российской Арктики: пространственная неоднородность и основные тенденции многолетней изменчивости / М. Ю. Кондакова, А. О. Даниленко, О. С. Решетняк, Л. С. Косменко, А. А. Коваленко // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод: сб. статей. Ч. 1 / М. М. Трофимчук. Ростов-на-Дону, 2020. С. 70–74.
12. Тенденции изменчивости химического состава речных вод Западно-Сибирской части Арктической зоны России / О. С. Решетняк, А. О. Даниленко, Л. С. Косменко, М. Ю. Кондакова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2019. № 3. С. 70–79.
13. Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние / В. А. Брызгалов, А. М. Никаноров, Л. С. Косменко, О. С. Решетняк. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2015. 164 с.
14. Dzhamalov R. G., Safronova T. I. Effect of permafrost rocks on water resources formation in Eastern Siberia: case study of some rivers in Eastern Siberia // Water Resources. 2018. Vol. 45. № 4. P. 455–465.
15. Characteristics of colored dissolved organic matter (CDOM) in the Arctic outflow in the Fram strait: assessing the changes and fate of terrigenous CDOM in the Arctic Ocean / M. A. Granskog, C. A. Stedmon, P. A. Dodd, R. M. W. Amon, A. K. Pavlov, L. de Steur, et al. // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2012. Vol. 17. № 12. P. C12021.
16. Identifying Drivers of Seasonality in Lena River Biogeochemistry and Dissolved Organic Matter Fluxes / B. Juhls, C. A. Stedmon, A. Morgenstern, H. Meyer, J. Hagemann, B. Heim, V. Povazhnyi, et al. // Frontiers in Environmental Science. 2020. Vol. 8. DOI: 10.3389/fenvs.2020.00053
17. Pegau W. S. Inherent optical properties of the central Arctic surface waters // Journal of Geophysical Research. 2002. Vol. 107. № C10. P. 8035. DOI: 10.1029/2000jc000382

REFERENCES

1. Danilenko A. O., Reshetnyak O. S., Kosmenko L. S., Kondakova M. Yu. [Changes in the intensity of chemical denudation in the Pechora catchment under conditions of non-stationary climate and economic activity]. In: *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and ecology: problems and solutions], 2020, no. 4, pp. 38–49.
2. Nikanorov A. M., Ivanov V. V., Bryzgalov V. A. *Reki Rossiyskoy Arktiki v sovremennykh usloviyakh antropogenного vozdeystviya* [Rivers of the Russian Arctic under modern conditions of anthropogenic impact]. Rostov-on-Don, NOK Publ., 2007. 280 p.
3. Nikanorov A. M., Smirnov M. P., Klimenko O. A. [Long-term trends in the general and anthropogenic removal of organic and biogenic substances by Russian rivers into the Arctic and Pacific seas]. In: *Vodnyye resursy* [Water Resources], 2010, vol. 37, no. 3, pp. 318–328.
4. Dzhamalov R. G., Reshetnyak O. S., Vlasov K. G., Galagur K. G., Oboturov A. S., Safronova T. I. Features of the chemical composition and quality of water in the Lena River basin. In: *Osobennosti khimicheskogo sostava i kachestva vody v bassejne reki Lena* [Water and ecology: problems and solutions], 2021, no. 3, pp. 33–43.
5. Danilenko A. O., Kosmenko L. S., Reshetnyak O. S., Kondakova M. Yu. [Prerequisites for technogenic metamorphization of the ionic composition of the river water. Nadym in the context of global climate change]. In: *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya* [Izvestia RAS. Geographical series], 2020, no. 1, pp. 127–137.
6. Reshetnyak O. S. [Long-term variability of the ion flow of large rivers in the Arctic zone of Russia]. In: *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Yestestvennyye nauki* [News of universities. North Caucasus region. Series: Natural Sciences], 2021, no. 3, pp. 80–86.

7. Reshetnyak O. S. [Assessment of the level of environmental risk in river ecosystems of the Arctic zone of Russia]. In: *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Yestestvennyye nauki* [News of universities. North Caucasus region. Natural Sciences], 2020, no. 3, pp. 69–78.
8. Reshetnyak O. S. *Transformatsiya rechnykh ekosistem Yevropeyskogo Severa Rossii v usloviyakh antropogennogo vozdeystviya : dis. ... kand. geogr. nauk* [Transformation of river ecosystems of the European North of Russia under conditions of anthropogenic influence: Cand. Sci thesis in Geographical sciences.]. Rostov-on-Don, 2010. 178 p.
9. Reshetnyak O. S., Kosmenko L. S., Kovalenko A. A. [Anthropogenic load modulo chemical runoff and water quality at the outlet sections of rivers in the Arctic zone of Russia]. In: *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Episode 5: Geography], 2022, no. 3, pp. 3–17.
10. Nikanorov A. M., Bryzgalo V. A., Kosmenko L. S., Reshetnyak O. S. [The role of chemical river runoff in the anthropogenic transformation of the state of the aquatic environment of the Yenisei estuary region]. In: *Vodnyye resursy* [Water Resources], 2010, vol. 37, no. 4, pp. 434–444.
11. Kondakova M. Yu., Danilenko A. O., Reshetnyak O. S., Kosmenko L. S., Kovalenko A. A. [Runoff of dissolved chemicals for rivers of the West and East Siberian parts of the Russian Arctic: spatial heterogeneity and main trends of long-term variability]. In: Trofimchuk M. M., ed. *Sovremennyye problemy gidrokhimii i Diptikhi kachestva poverkhnostnykh vod. Ch. 1* [Modern problems of hydrochemistry and monitoring of surface water quality. Part 1]. Rostov-on-Don, 2020, pp. 70–74.
12. Reshetnyak O. S., Danilenko A. O., Kosmenko L. S., Kondakova M. Yu. [Trends in the variability of the chemical composition of river waters in the West Siberian part of the Arctic zone of Russia]. In: *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Yestestvennyye nauki* [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural Sciences], 2019, no. 3, pp. 70–79.
13. Bryzgalo V. A., Nikanorov A. M., Kosmenko L. S., Reshetnyak O. S. *Ustyevye ekosistemy krupnykh rek Rossii: antropogennaya nagruzka i ekologicheskoye sostoyaniye* [Estuary ecosystems of large rivers in Russia: anthropogenic load and ecological state]. Rostov-on-Don, Izd-vo Yuzhnogo federalnogo universiteta Publ., 2015. 164 p.
14. Dzhamalov R. G., Safronova T. I. Effect of permafrost rocks on water resources formation in Eastern Siberia: case study of some rivers in Eastern Siberia. In: *Water Resources*, 2018, vol. 45, no. 4, pp. 455–465.
15. Granskog M. A., Stedmon C. A., Dodd P. A., Amon R. M. W., Pavlov A. K., de Steur L., et al. Characteristics of colored dissolved organic matter (CDOM) in the Arctic outflow in the Fram Strait: assessing the changes and fate of terrigenous CDOM in the Arctic Ocean. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, vol. 117, no. 12, pp. C12021.
16. Juhls B., Stedmon C. A., Morgenstern A., Meyer H., Hupelmann J., Heim B., Povazhnyi V., et al. Identifying Drivers of Seasonality in Lena River Biogeochemistry and Dissolved Organic Matter Fluxes. In: *Frontiers in Environmental Science*, 2020, vol. 8. DOI: 10.3389/fenvs.2020.00053
17. Pegau W. S. Inherent optical properties of the central Arctic surface waters. In: *Journal of Geophysical Research*, 2002, vol. 107, no. C10, pp. 8035. DOI: 10.1029/2000jc000382

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Решетняк Ольга Сергеевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник Гидрохимического института, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды; доцент Института наук о Земле, Южный федеральный университет;

e-mail: olgare1@mail.ru

Коваленко Арина Андреевна – лаборант-исследователь Гидрохимического института, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды; аспирант Института наук о Земле, Южный федеральный университет;

e-mail: arinaa.kov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olga S. Reshetnyak – PhD (Geography), Senior Researcher, Hydrochemical Institute, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring; Assoc. Prof., Institute of Earth Sciences, Southern Federal University;

e-mail: olgare1@mail.ru

Arina A. Kovalenko – Research laboratory assistant, Hydrochemical Institute, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring; Postgraduate student, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University;

e-mail: arinaa.kov@gmail.com

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Решетняк О. С., Коваленко А. А. Пространственно-временная динамика стока органических веществ на замыкающих створах крупных рек Сибири // Географическая среда и живые системы. 2023. № 3. С. 26–43.

DOI: [10.18384/2712-7621-2023-3-26-43](https://doi.org/10.18384/2712-7621-2023-3-26-43)

FOR CITATION

Reshetnyak O. S., Kovalenko A. A. Long-term trends of organic matter runoff from large Siberian Rivers watersheds. In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2023, no. 3, pp. 26–43.

DOI: [10.18384/2712-7621-2023-3-26-43](https://doi.org/10.18384/2712-7621-2023-3-26-43)