УДК 504.454+504.4.054

МЕЖГОДОВАЯ И СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СТОКА РАСТВОРЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ДЕЛЬТОВЫХ РУКАВАХ РЕКИ КУБАНИ

О.С. Решетняк[1], Р.С. Комаров[2]

[1, 2] *Южный федеральный университет, Институт наук о Земле, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии*
[1] *Гидрохимический институт, лаборатория дистанционных и химико-биологических методов наблюдений за состоянием и загрязнением водных объектов, ст. науч. сотр.*
[2] *Гидрохимический институт, лаборатория экспериментальной гидрохимии, мл. науч. сотр.*

[1] *Доц., канд. геогр. наук; e-mail: olgare1@mail.ru*
[2] *Аспирант; e-mail: komarovroman128@yandex.ru*

Исследована многолетняя межгодовая и сезонная изменчивость химического стока по основным дельтовым рукавам Кубани. Проанализированы данные систематических наблюдений за водным стоком и концентрациями главных ионов, биогенных и органических веществ, фенолов, нефтепродуктов и тяжелых металлов за период с 2008 по 2018 г. Рассчитаны значения годовых и сезонных объемов стока растворенных химических веществ по основным рукавам дельты Кубани – рук. Протока и рук. Кубань. Химический состав воды в основных дельтовых рукавах Кубани практически одинаковый, а наибольшие различия наблюдаются по концентрациям хлоридов, соединений железа, меди и нефтепродуктов. Выявлены разнонаправленные тенденции изменения в ионном составе и содержании биогенных элементов. Происходило синхронное увеличение концентраций сульфатов и азота аммонийного в дельтовых рукавах Кубани, содержание нитратов и нитритов в воде рук. Кубань практически не менялось, а в рук. Протока – снижалось. При этом максимальная кратность превышения ПДК по всем компонентам невысокая, и формируется низкий уровень загрязненности воды. Объемы химического стока по дельтовым рукавам имеют близкие значения, особенно по объемам стока сульфатов, органических веществ и биогенных элементов. Наибольшие различия на 20–22% наблюдаются по стоку хлоридов, соединений железа и меди. Показано, что сток хлоридов, сульфатов, биогенных и органических веществ в большей степени взаимосвязан с водным стоком. В целом распределение химического стока по дельтовым рукавам равномерно, сезонная его изменчивость соответствует изменениям водности в основные сезоны, а некоторые различия наблюдаются только для хлоридов и соединений железа. В современных условиях климатических изменений и антропогенного воздействия выявленные особенности и тенденции изменчивости химического стока по основным рукавам дельты Кубани имеют большую практическую значимость. Полученные данные могут быть использованы для прогнозных оценок выноса химических веществ в прибрежную зону Азовского моря.

Ключевые слова: водный сток, химический состав воды, растворенные вещества, химический сток, основные дельтовые рукава, река Кубань, Азовское море

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.8

ВВЕДЕНИЕ

Исследование химического стока реки Кубань (или стока растворенных химических веществ с водным стоком) имеет важное значение, во-первых, в связи с изучением влияния происходящих климатических изменений и хозяйственной деятельности в дельте на процессы формирования химического состава и качества воды, во-вторых, для оценки возможного влияния речного стока на прибрежные акватории Азовского моря.

Как известно, любая устьевая область реки представляет собой «особый географический объект, охватывающий район впадения реки в приемный водоем (океан, море, озеро), обладающий специфическими морфологическим строением, гидрологическим режимом и экологическими условиями» [Гидрология…, 2017] и представляющий собой «промежуточную» и весьма специфическую природную систему, где взаимодействуют, смешиваются и трансформируются два принципиально различных водных потока (речной и морской) [Брызгало и др., 2013], который является своеобразным барьером между рекой и приемным водоемом. Вследствие замедления скоростей течения и обратных течений в нем создаются условия для задержки и накопления загрязняющих веществ [Брызгало и др., 2015; Коротаев и др., 2007].

Устьевая область реки Кубань относится к дельтовому типу (с многорукавной дельтой выдвижения и открытым приглубым взморьем). Состоит из дельты длиной 116 км и площадью 4190 км^2 и устьевого взморья площадью около 110 км^2 [Михайлов, 1997]. В вершине дельты (хутор Тиховский) река делится на два основных дельтовых рукава – Кубань и Протоку. Главным рукавом является Кубань, длина которой – 117,5 км, длина Протоки – 133,3 км [Лурье и др., 2005].

Дельта Кубани по гидроморфологическим признакам делится на две зоны – верхнюю и нижнюю (приморская). Верхняя зона ограничена основными рукавами дельты и превращена в поливные рисовые поля, а большая часть приморской зоны занята лиманами и плавнями. Всего в дельте насчитывается около 240 лиманов [Лурье и др., 2005; Kuban Delta…, 1997]. Бóльшая часть лиманов включена в список объектов Рамсарской конвенции – Дельта Кубани: Группа лиманов между реками Кубань и Протока [Водно-болотные…, 2021]. Водное питание системы лиманов происходит за счет рукавов дельты через каналы и за счет моря через гирла – дельтовые водотоки с переменным направлением течения воды [Магрицкий, Иванов, 2008].

Основное антропогенное воздействие на экосистему устьевой области и дельты Кубани происходит за счет поступления загрязненных сточных вод промышленных предприятий, смыва минеральных удобрений и органических веществ с сельхозугодий и территорий животноводческих ферм, пестицидов – с оросительных систем, влияния маломерного флота, безвозвратного изъятия воды и регулирования стока, а также транзитного переноса загрязненных сточных вод по течению реки [Никаноров и др., 2011]. Дельта Кубани интенсивно используется в хозяйственной деятельности человека. Для нормального функционирования рисовых полей и рыборазводных прудов с 1920–1930-х гг. сооружено несколько систем оросительных, водоотводных и опреснительных каналов [Гидрология…, 2010], которые значительно повлияли на гидрологические особенности и распределение стока в дельте.

Существенным является и влияние стихийных природных явлений гидрологического характера в бассейне р. Кубани, а также диффузное загрязнение нижних участков реки, доля которого по разным подсчетам может достигать 50% от общего поступления загрязняющих веществ в речную сеть [Схема…, 2014].

Сток растворенных химических веществ является одним из важнейших факторов формирования гидролого-экологического состояния прибрежной зоны Азовского моря [Никаноров и др., 2011]. Его формирование в бассейне реки Кубань происходит в специфических природно-климатических условиях (засушливый климат, сложность рельефа и наличие высотной зональности, разнообразие дренируемых горных пород и почв) при достаточно высокой антропогенной нагрузке и низкой водообеспеченности территории.

В комплексной монографии [Гидрология…, 2010] представлены особенности гидрохимического режима устьевой области Кубани и обобщенные оценки химического стока. В продолжение данных исследований нами проведена современная оценка изменчивости химического стока по основным дельтовым рукавам р. Кубани на основе анализа и обработки первичных данных наблюдательной сети и сравнения с ранее опубликованными результатами других авторов.

Все это и обусловливает актуальность и новизну нашего исследования, цель которого – изучить межгодовую и сезонную изменчивость химического стока р. Кубани в Азовское море (стока растворенных химических веществ дельтовыми рукавами) в современных условиях климатических изменений и антропогенного воздействия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использована многолетняя (2008–2018) гидрологическая и гидрохимическая информация государственной системы наблюдений (ГСН) Росгидромета в основных дельтовых рукавах р. Кубани: рук. Кубань – г. Темрюк и рук. Протока – хутор Слободка. Данные о химическом составе воды включали значения концентраций главных ионов (хлоридов и сульфатов), биогенных веществ (соединений азота аммонийного, азота нитритного и нитратного), органических соединений (по показателям ХПК и БПК$_5$), фенолов и нефтепродуктов, а также соединений отдельных тяжелых металлов (растворенных форм соединений железа, меди и цинка).

Периодичность гидрохимических наблюдений (и, соответственно, временное разрешение получаемых ежегодных данных) определяется категорией пунктов наблюдений и охватывает основные фазы водного режима реки. В дельте Кубани частота отбора проб составляла в пункте наблюдений хутора Слободка шесть раз в год по таким гидрохимическим показателям, как сульфаты, азот нитритный и соединения железа, и 12 раз в год по остальным показателям; в пункте наблюдений г. Темрюк – 12 и 24 раза в год соответственно.

Для анализа водного стока р. Кубани и последующего расчета объемов стока химических веществ использованы многолетние данные, представленные в Автоматизированной информационной системе государственного мониторинга водных объектов [АИС ГМВО, 2021].

На рис. 1 приведена схема района исследования – устьевая область р. Кубани и основные дельтовые рукава – Кубань и Протока.

На основе данных о концентрациях химических веществ и значениях годового (или месячного) стока воды выполнен расчет химического стока р. Кубани (стока растворенных веществ) за определенный временной период. Расчет проводили прямым способом по формуле [Никаноров и др., 2010]:

$$G = \sum_{i=1}^{m} W_i \overline{C}_i , \qquad (1)$$

где G – количество перенесенного вещества за расчетный период, тыс. т; m – число интервалов расчетного периода; W_i – объем стока воды за i-й интервал расчетного периода, км^3; $\overline{C_i}$ – средняя концентрация вещества за i-й интервал расчетного периода, мг/дм^3.

Для обработки многолетних данных о химическом составе и стоке воды, для расчета стока растворенных веществ и построения графиков были использованы MS Excel 2010 и пакет прикладных программ Statistica 13.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определяющим фактором в изменчивости химического стока является водный сток. Чем он больше, тем, соответственно, большее количество растворенных веществ может быть вынесено рекой [Брызгало и др., 2015]. В данной работе рассматривается сток растворенных химических веществ без стока взвешенных компонентов в химическом стоке реки.

Водный сток рек в большей мере определяется климатическими условиями. Однако из-за хозяйственной деятельности человека в совокупности с природными факторами сток р. Кубани претерпевал существенные изменения практически на протяжении большей части XX в. [Сорокина и др., 2006]. Колебания водного стока в дельте определяются общим стоком воды реки и в значительной мере попусками из Краснодарского водохранилища [Лурье и др., 2005]. Отмечается, что из-за зарегулирования сток Кубани стал более равномерно распределенным в течение года [Сорокина и др., 2006].

В многолетнем аспекте изменение водного стока происходило следующим образом: сначала наблюдалось снижение стока с 1930 по 1972 г. от 13,0 км^3/год (1930–1948) до 10,3 км^3/год (1949–1972) и было связано с изъятием воды на хозяйственные нужды и естественным уменьшением водных ресурсов. Далее в период зарегулирования стока Краснодарским водохранилищем с 1973 по 1986 г. «фактический приток воды в дельту, несмотря на некоторое увеличение климатического стока, снизился еще на 1,1 км^3/год и составил 9,2 км^3/год. <…> С 1987 г. наблюдается заметное увеличение средних годовых расходов воды в реке, что связано в первую очередь с климатическими причинами и в меньшей степени с уменьшением водохозяйственной нагрузки на реку» [Магрицкий, Иванов, 2008].

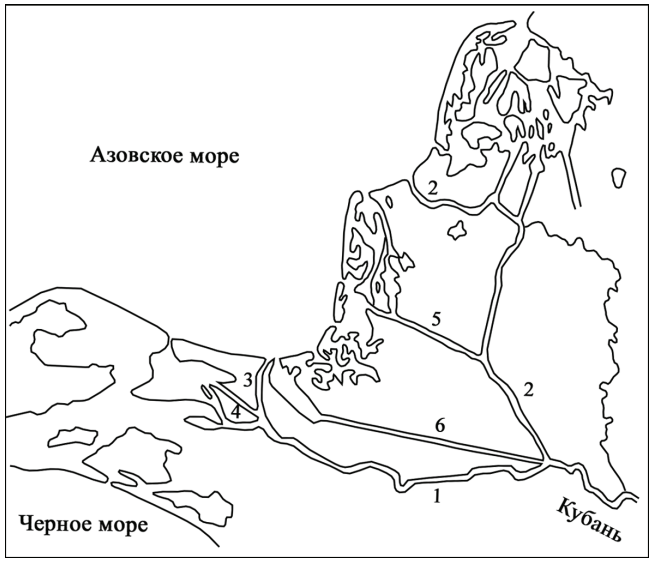

Рис. 1. Карта-схема дельты р. Кубани [Михайлов, 1997]:
1 – рук. Кубань; 2 – рук. Протока; 3 – рук. Петрушин; 4 – рук. Казачий Ерик; 5 – Чебургольский оросительный канал (ЧОК); 6 – Петровско-Анастасиевская оросительная система (ПАОС)

Fig. 1. Schematic map of the Kuban River delta [Mikhailov, 1997] numbers in the map indicate the branches and canals of the delta:
1 – the Kuban branch; 2 – the Protoka branch; 3 – the Petrushin branch; 4 – the Kazachiy Erik branch; 5 – the Cheburgol irrigation canal; 6 – the canal of the Petrovsk-Anastasievskaya irrigation system

Основная часть речного стока р. Кубани в нижнем течении делится по основным дельтовым рукавам (Кубань и Протока) примерно в равной степени и поступает в Азовское море. В период с 1973 по 1986 г. значения водного стока в устьях дельтовых рукавов составили 4,13 км^3/год (рук. Протока) и 3,94 км^3/год (рук. Кубань), а в 1987–2005 гг. – 6,22 км^3/год и 5,59 км^3/год соответственно [Гидрология…, 2010]. Таким образом, отмечалась тенденция роста водного стока после регулирования.

Далее распределение стока по рукавам р. Кубани стало еще более равномерным. За 2008–2018 гг. среднее значение годового водного стока составило 5,2 км^3/год в пункте наблюдений хутора Слободка (рук. Протока) и 5,3 км^3/год в пункте наблюдений г. Темрюк (рук. Кубань), что указывает на снижение речного стока и его более равномерное распределение по основным рукавам дельты. Во временной динамике отмечается синхронное изменение водного стока без наличия четких тенденций (рис. 2). Увеличение водности в 2010 и 2011 гг., скорее все-

го, было связано с ростом количества атмосферных осадков в этот период.

Для устьевой области реки Кубань характерно симбатное (синхронное) изменение стока по рукавам дельты в течение года с максимумом в мае–июне и минимумом в зимний период [Лурье и др., 2005]. Таким образом, в сезонном отношении преобладает весенний и летний сток (или сток в теплый период) (см. рис. 2).

Изменчивость водного стока будет определять содержание отдельных химических веществ (в основном главных ионов и соединений металлов), источником поступления которых в речную сеть являются процессы выщелачивания горных пород, катионный обмен с почвенным покровом и поверхностный смыв с водосборной территории. Речной сток в устьевую область отражает суммарный эффект процессов выветривания и стока растворенных веществ с водосборной площади бассейна реки, поэтому оценку химического стока часто проводят по замыкающему створу реки или по рукавам дельты для оценки выноса химических веществ с речными водами в прибрежные зоны морей [Брызгало и др., 2015].

Химический состав речных вод основных дельтовых рукавов Кубани. В многолетнем аспекте изменение химического состава воды в основных рукавах дельты р. Кубани происходило следующим образом.

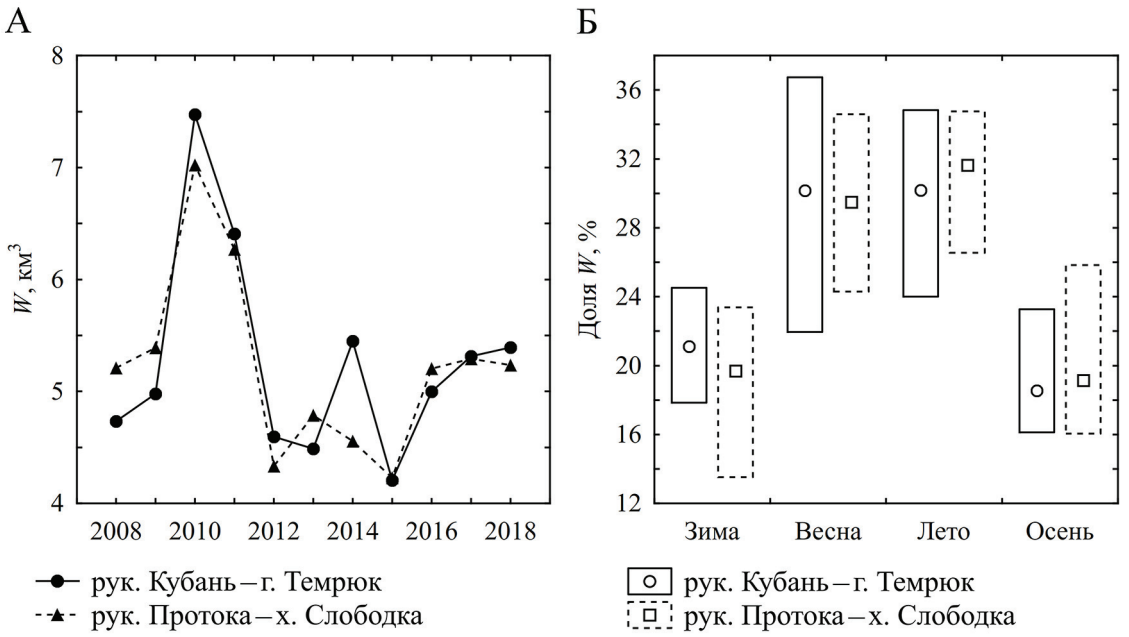

Рис. 2. Динамика изменения объемов речного стока (*W*) во времени (А) и сезонное распределение стока воды (Б) по основным дельтовым рукавам р. Кубани в 2008–2018 гг.

Fig. 2. Dynamics of changes in river runoff volumes (*W*) in time (A) and seasonal distribution of water runoff (Б) along the main deltaic branches of the Kuban River in 2008–2018

В период условно-естественного режима стока (до 1948 г.) воды дельтовых рукавов были среднеминерализованными (200–400 мг/дм^3) и по химическому составу относились к гидрокарбонатному классу и кальциевой группе. Хозяйственное освоение дельты Кубани и зарегулирование стока (в 1970-х гг.) способствовало изменению минерализации и ионного состава воды в нижнем течении и в дельте Кубани.

В 1980-х гг. наиболее значительной была трансформация ионного состава вод в рук. Протока, поскольку из него забиралось чистых вод приблизительно в 1,5–2,0 раза больше в сравнении с рук. Кубань, и сбрасывалось обратно коллекторно-дренажных вод также больше. Вследствие произошедших изменений воды в устье рук. Протока стали относиться к сульфатному классу и натриевой группе, а воды рук. Кубань – к гидрокарбонатно-сульфатному классу и кальциевой группе [Гидрология…, 2010].

Зарегулирование стока после строительства Краснодарского водохранилища и антропогенная нагрузка на дельтовые экосистемы также способствовали изменению режима биогенных элементов. Наибольшее влияние оказывали коллекторно-дренажные воды, отводимые в основные рукава дельты с мая по август и увеличивающие содержание соединений азота на 10–40%. К началу 2000-х гг. наблюдалось увеличение средних концентраций минеральных форм азота и фосфора в 1,2–2,0 раза [Гидрология…, 2010].

В многоводный период (с 1987 по 2005 г.) и на фоне снижения масштабов хозяйственной деятельности в бассейне р. Кубани и ее дельте отмечено снижение минерализации воды (на 32% в рук. Протока) и средних концентраций главных ионов.

Выявленные тенденции трансформации химического состава воды основных дельтовых рукавов Кубани не сохранились в последние годы. За период исследования (2008–2018) происходили разнонаправленные изменения в ионном составе и содержании биогенных элементов. Содержание хлоридов стабильно находилось на уровне 30 мг/дм^3 в воде рук. Кубань, в то время как в рук. Протока происходило снижение среднегодовых концентраций с 52 до 32 мг/дм^3. Отмечалось синхронное увеличение в водах основных дельтовых рукавов концентраций сульфатов (от 111 до 119 мг/дм^3 в рук. Кубань и от 117 до 126 мг/дм^3 в рук. Протока) и азота аммонийного (от 0,08 до 0,12 мг/дм^3 в обоих рукавах). Содержание нитратов и нитритов в воде рук. Кубань практически не менялось и находилось на уровне 2,4–2,5 и 0,012–0,014 мг/дм^3 соответственно, а в рук. Протока по данным показателям выявлено снижение их среднегодовых концентраций – азота нитратного с 3,4 до 2,4 мг/дм^3, а азота нитритного – с 0,012 до 0,018 мг/дм^3.

Сравнительный анализ химического состава воды исследуемых дельтовых рукавов Кубани в двух пунктах наблюдений (г. Темрюк и х. Слободка) показал, что в целом химический состав воды в рукавах одинаков как по диапазонам значений, так и по среднемноголетним значениям концентраций (табл. 1). Однако несколько выше содержание большинства химических веществ в воде рук. Протока. Наибольшие различия наблюдаются по содержанию в воде хлоридов (21,9%), соединений железа (22,2%), нефтепродуктов (25,0%) и соединений меди (50,0%).

Таблица 1

Химический состав воды в основных дельтовых рукавах реки Кубани (2008–2018)

Компонент химического состава воды	Значения концентраций, мг/дм^3						Относительные изменения средних значений, %
	рук. Кубань – г. Темрюк			рук. Протока – х. Слободка			
	Количество измерений	Диапазон значений	Среднее значение	Количество измерений	Диапазон значений	Среднее значение	
Cl^-	263	18,8–50,7	29,2	132	24,5–93,6	37,4	+21,9
SO_4^{2-}	132	**102,0–123,0**	**114,4**	66	**107,0–133,0**	**121,2**	+5,6
ОВ (по ХПК)	263	**18,3–36,0**	**26**	132	**18,5–35,4**	**26,2**	+0,8
ЛООВ (по $БПК_5$)	263	1,07–**2,11**	1,47	132	1,06–1,87	1,44	–2,1
NH_4^+	263	0,04–0,20	0,11	132	0,05–0,20	0,11	± 0
NO_2^-	263	0,003–**0,024**	0,012	126	0,007–**0,070**	0,014	+14,3
NO_3^-	132	1,11–4,65	2,62	66	1,52–4,46	2,78	+5,7
Fe^{2+} и Fe^{3+}	132	0,02–**0,18**	0,07	66	0,04–**0,22**	0,09	+22,2
Cu^{2+}	263	н.о.–**0,003**	0,001	132	н.о.–**0,003**	**0,002**	+50,0
Zn^{2+}	251	0,004–0,009	0,006	132	0,004–0,009	0,007	+14,2
Фенолы	263	н.о.–**0,003**	0,001	132	н.о.–**0,003**	0,001	± 0
Нефтепродукты	263	0,04–**0,11**	**0,06**	132	0,04–**0,13**	**0,08**	+25,0

Примечание. ОВ – органическое вещество; ЛООВ – легкоокисляемое органическое вещество; н.о. – ниже предела обнаружения метода; жирным шрифтом выделены значения концентраций, превышающие соответствующие $ПДК_{р/х}$.

Анализ временной изменчивости химического состава воды исследуемых дельтовых рукавов Кубани показал наличие разнонаправленных тенденций. Наиболее явный возрастающий тренд формируется в изменчивости содержания сульфатов и азота аммонийного в воде обоих рукавов (рис. 3), причем данные изменения очень синхронны. Это обстоятельство указывает на общие факторы формирования тренда в условиях усиления засушливости климата в бассейне Кубани. Для органических веществ и соединений железа, напротив, выявлена тенденция снижения их среднегодовых концентраций за исследуемый период. Одной из причин данного процесса может быть снижение водности реки после 2010 г. Для остальных гидрохимических показателей четкие тренды изменчивости выделить сложно.

Стоит отметить, что только для нефтепродуктов тренды имеют противоположные направления: в рук. Кубань отмечается рост концентраций нефтепродуктов, а в рук. Протока – снижение. При этом

наиболее высокие среднегодовые концентрации нефтепродуктов характерны для рук. Протока. Поступление нефтепродуктов происходит за счет смыва с вышерасположенных частей бассейна и высоким их содержанием в коллекторно-дренажных водах (в которых по данным [Гидрология…, 2010] содержится нефтепродуктов до 0,60 мг/дм^3), объемы сброса которых выше в рук. Протока.

С экологической точки зрения качество воды периодически нарушается в основных дельтовых рукавах Кубани по содержанию в воде органических веществ и сульфатов и эпизодически (по максимальным значениям концентраций) – по соединениям железа, меди и нефтепродуктам (см. табл. 1). На графиках рис. 3 представлены изменения концентраций только тех химических веществ, содержание которых эпизодически или постоянно превышает ПДК$_{р/х}$. Максимальная кратность превышения ПДК отмечается в обоих рукавах и достигает 2,4 ПДК для органических веществ (по ХПК), 3,0 ПДК для соединений меди, а также по нефтепродуктам: 2,2 ПДК на участке рук. Кубань – г. Темрюк и 2,6 ПДК на участке рук. Протока – х. Слободка. Такой уровень загрязненности водной среды по кратности превышения ПДК (согласно критериям, приведенным в [РД 52.24.643–2002]) характеризуется как низкий (на уровне 1,0–2,0 ПДК), но при наличии возрастающего тренда по сульфатам (в воде обоих дельтовых рукавов) и по нефтепродуктам (в рук. Кубань) это вызывает опасение из-за возможного ухудшения качества воды в ближайшей перспективе.

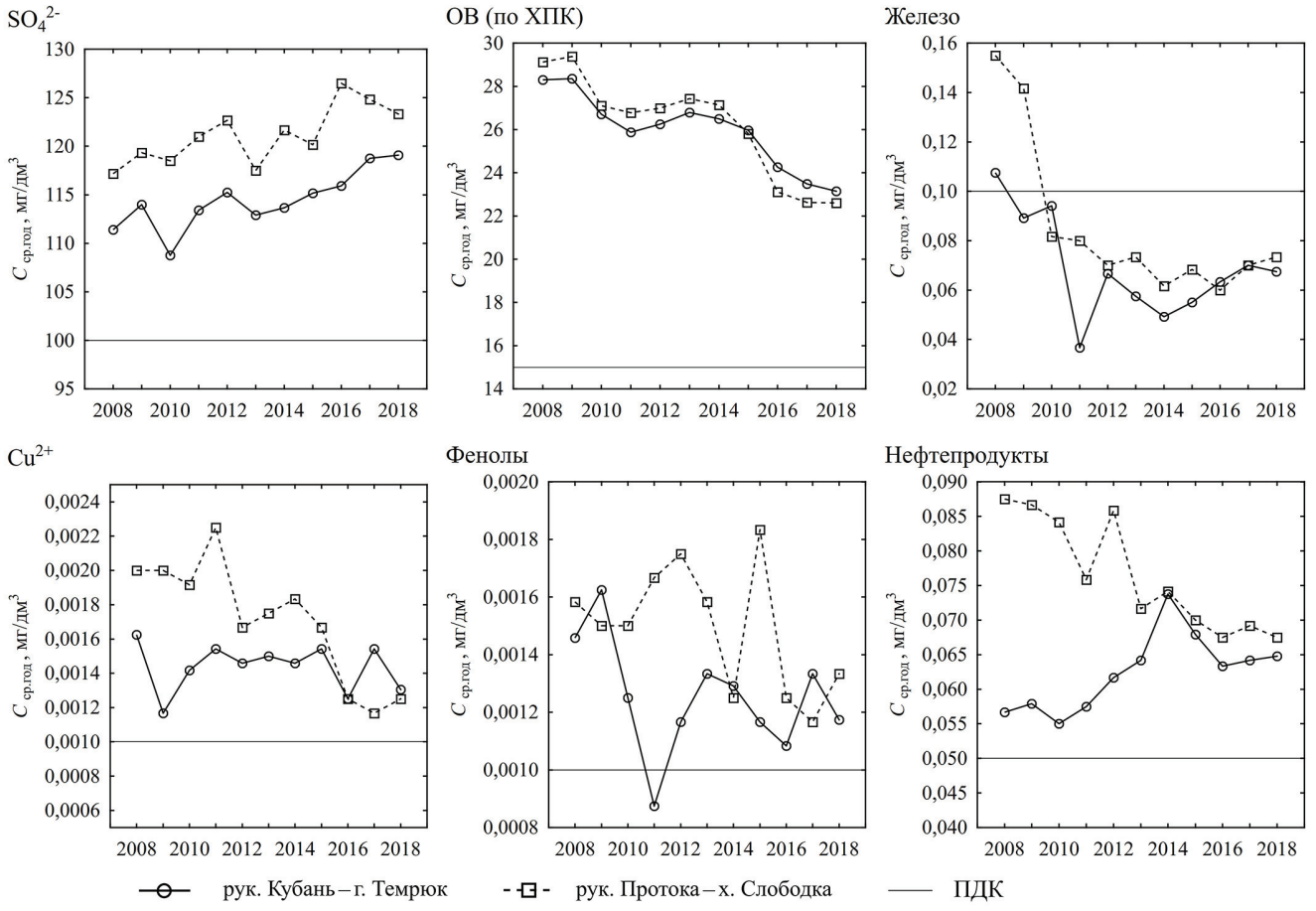

Рис. 3. Изменчивость среднегодовых концентраций отдельных компонентов химического состава воды в основных дельтовых рукавах р. Кубани

Fig. 3. Variability of average annual concentrations of individual components of the chemical composition of water in main deltaic branches of the Kuban River

Межгодовая и сезонная изменчивость стока растворенных веществ в дельте реки Кубани. Изменчивость химического стока отражает естественные и антропогенные механизмы формирования водного стока и химического состава воды рек. Изучение сезонной и межгодовой изменчивости химического стока дает интегральное представление о роли хозяйственной деятельности на водосборной территории [Заславская, Ефимова, 2015].

Изменчивость стока растворенных химических веществ в большей степени зависит от содержания в природных водах макрокомпонентов и собственно водности реки. Нарушение этой естественной зависимости будет указывать на влияние антропогенных или иных факторов. Как правило, ионный сток (сток главных ионов, в том числе сток хлоридов и сульфатов) прямо пропорционально связан с водностью реки. Сток биогенных и органических соединений не всегда пропорционален водному стоку, так как подвержен антропогенному влиянию сравнительно больше, чем ионный сток, но в отличие от последнего составляет заметно меньшую долю суммарного стока растворенных веществ.

Данные о диапазонах и среднемноголетних объемах химического стока в Азовское море через исследуемые рукава дельты (рук. Кубань – г. Темрюк и рук. Протока – х. Слободка) приведены в табл. 2. Сравнительный анализ полученных данных показал, что по многим компонентам химического стока выносимые объемы растворенных веществ через дельтовые рукава имеют близкие значения, особенно по объемам стока сульфатов (602 и 633 тыс. т/год через рук. Кубань и рук. Протока соответственно), органических веществ (137 и 138 тыс. т/год) и биогенных элементов. Наибольшие различия на 20–22% наблюдаются по объемам стока хлоридов (153 и 193 тыс. т/год), соединений железа (0,36 и 0,45 тыс. т/год) и меди (0,007 и 0,009 тыс. т/год).

Таблица 2

Изменчивость объемов стока растворенных веществ по основным дельтовым рукавам реки Кубани за 2008–2018 гг.

Компонент химического состава воды	Объем химического стока (тыс. т/год)				Относительные изменения средних значений, %
	рук. Кубань – г. Темрюк		рук. Протока – х. Слободка		
	Диапазон значений	Среднее значение	Диапазон значений	Среднее значение	
Cl^-	127,2–187,3	152,6	142,0–269,5	192,6	+20,8
SO_4^{2-}	483,3–812,8	602,4	508,0–832,1	633,2	+4,9
ОВ (по ХПК)	109,2–199,7	137,2	109,1–190,4	137,8	+0,4
ЛООВ (по $БПК_5$)	6,18–10,43	7,75	6,14–10,28	7,55	–2,6
NH_4^+	0,46–0,76	0,63	0,49–0,66	0,55	–14,5
NO_2^-	0,049–0,099	0,069	0,053–0,111	0,077	+10,4
NO_3^-	10,76–22,93	13,95	11,58–23,62	14,67	+4,9
Fe^{2+} и Fe^{3+}	0,23–0,70	0,36	0,28–0,81	0,45	+20,0
Cu^{2+}	0,006–0,011	0,007	0,006–0,014	0,009	+22,2
Zn^{2+}	0,025–0,043	0,033	0,030–0,052	0,036	+8,3
Фенолы	0,005–0,009	0,007	0,006–0,011	0,008	+12,5
Нефтепродукты	0,27–0,41	0,33	0,30–0,59	0,41	+19,5

Примечание. ОВ – органическое вещество; ЛООВ – легкоокисляемое органическое вещество.

Такие результаты вполне ожидаемы, поскольку среднемноголетние значения водного стока в рукавах практически идентичны (5,3 $км^3$/год – рук. Кубань и 5,2 $км^3$/год – рук. Протока). Но более высокие значения объемов стока растворенных веществ получены для рук. Протока, который несколько уступает в водности рук. Кубань, и поэтому обусловлены бóльшими различиями в значениях среднемноголетних концентраций химических веществ.

Во временной изменчивости объемов химического стока отмечена их высокая зависимость от водного стока (рис. 4). Незначительные расхождения в графиках изменчивости среднегодовых объемов стока выявлены для рук. Протока по стоку хлоридов и соединений железа. При рассмотрении стока соединений металлов важно учитывать соотношение форм миграции элементов. В дельте Кубани миграция железа происходит преимущественно во взвешенной форме, а для меди и цинка отмечается увеличение растворенных форм металлов [Ткаченко и др., 2017].

Сезонное распределение объемов стока растворенных веществ по исследуемым рукавам дельты Кубани также соответствует изменению их водности в основные сезоны года (табл. 3). С одной стороны, это подтверждает, что основной вклад в изменчивость химического стока вносят водность и содержание веществ в речной воде, а с другой –

показывает отсутствие значимого негативного воздействия в дельте Кубани. Как было показано ранее, по длине реки происходит заметная трансформация химического стока, и по течению р. Кубани в наибольших объемах транспортируются органические вещества, соединения железа и нефтепродукты [Никаноров и др., 2013] с последующим их снижением к устью реки.

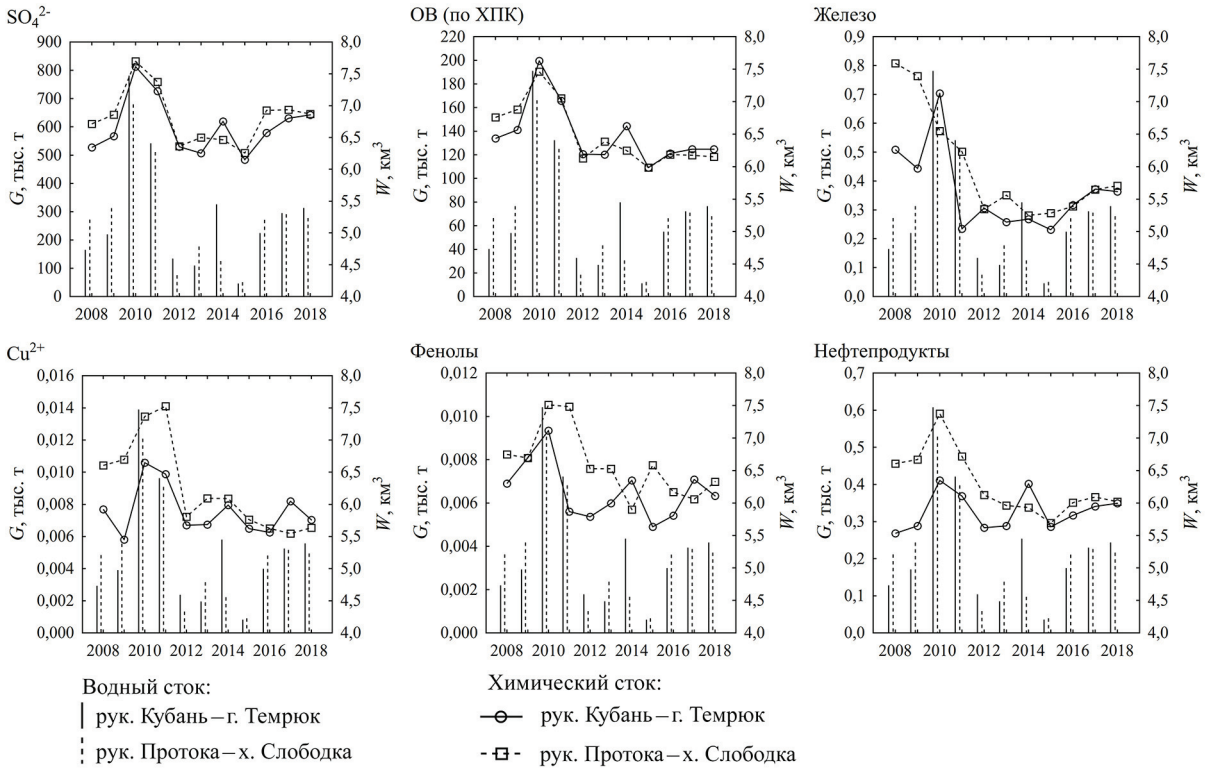

Рис. 4. Временная изменчивость водного стока (*W*) и среднегодовых значений объемов химического стока (*G*) в основных дельтовых рукавах р. Кубани

Fig. 4. Temporal variability of water runoff (*W*) and average annual volume of chemical runoff (*G*) in the main branches of the Kuban River delta

Таблица 3

Сезонное распределение объемов стока растворенных веществ по основным дельтовым рукавам реки Кубани за 2008–2018 гг.

Компонент химического стока	Объем химического стока, тыс. т							
	рук. Кубань – г. Темрюк				рук. Протока – х. Слободка			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
Водный сток, км³	1,12	1,60	1,58	0,97	1,04	1,53	1,64	0,99
Cl^-	32,5	46,5	46,3	27,3	38,1	59,3	59,6	35,6
ОВ (по ХПК)	25,0	39,1	45,9	27,2	22,9	38,0	49,0	27,9
ЛООВ (по $БПК_5$)	1,41	2,19	2,63	1,52	1,30	2,07	2,64	1,54
NH_4^+	0,10	0,21	0,20	0,12	0,08	0,14	0,21	0,12
NO_2^-	0,012	0,021	0,023	0,013	0,013	0,021	0,028	0,015
Cu^{2+}	0,001	0,002	0,003	0,001	0,002	0,003	0,003	0,001
Zn^{2+}	0,007	0,010	0,010	0,006	0,007	0,011	0,011	0,007
Фенолы	0,0009	0,0020	0,0029	0,0012	0,0013	0,0024	0,0027	0,0015
Нефтепродукты	0,07	0,10	0,10	0,06	0,07	0,12	0,14	0,08

ВЫВОДЫ

Для р. Кубани формирование стока растворенных химических веществ происходит в специфических природно-климатических условиях, таких как засушливый климат, разнообразие форм рельефа (наличие горной или равнинной части водосбора, высотной зональности) и дренируемых горных пород и почв, а также в условиях высокой антропогенной нагрузки и низкой водообеспеченности территории.

Результаты проведенных исследований по расчету химического стока по основным рукавам дельты Кубани (рук. Протока и рук. Кубань) и анализу его изменчивости за период с 2008 по 2018 г. позволили сделать ряд выводов.

Изменчивость химического стока реки отражает естественные и антропогенные факторы воздействия на различных участках водотока и в большей степени зависит от химического состава и водности реки. Нарушение этой естественной зависимости будет указывать на влияние различных факторов. За период исследования (2008–2018) происходили разнонаправленные изменения в ионном составе и содержании биогенных элементов. Содержание хлоридов было стабильно в воде рук. Кубань, а в рук. Протока происходило снижение среднегодовых концентраций. Выявлено синхронное увеличение в водах основных дельтовых рукавов концентраций сульфатов и азота аммонийного. Содержание нитратов и нитритов в воде рук. Кубань практически не менялось, а в рук. Протока по данным показателям выявлено снижение их среднегодовых концентраций. Тренд на снижение концентраций выявлен для органических веществ и соединений железа, что связано, скорее всего, со снижением водности реки. По остальным показателям четких тенденций не установлено.

Химический состав воды в дельтовых рукавах р. Кубани практически одинаковый, а наибольшие различия наблюдаются по концентрациям в воде хлоридов (21,9%), соединений железа (22,2%), нефтепродуктов (25,0%) и соединений меди (50,0%). При этом максимальная кратность превышения ПДК по всем компонентам невысокая, формируется низкий уровень загрязненности воды.

Показано, что основная составляющая химического стока – ионный сток (сток хлоридов и сульфатов) взаимосвязан с водностью реки. Сток биогенных и органических соединений также пропорционален водному стоку, но в отличие от последнего составляет заметно меньшую долю общего стока растворенных веществ. Сравнение химического стока, распределенного по исследуемым дельтовым рукавам, показало, что выносимые объемы имеют близкие значения, особенно по стоку сульфатов, органических веществ и биогенных элементов. Наибольшие различия на 20–22% наблюдаются по объемам стока хлоридов, соединений железа и меди.

Таким образом, выявленные особенности изменчивости химического стока по рукавам дельты Кубани и тенденции его изменчивости имеют большую практическую значимость и актуальность в современных условиях климатических изменений и антропогенного воздействия. Полученные данные могут быть использованы для прогнозных оценок выноса химических веществ в прибрежные зоны Азовского моря, а также при разработке экологически обоснованных рекомендаций по управлению водными ресурсами в дельте реки и в бассейне р. Кубани в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Брызгало В.А., Никаноров А.М., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние. Ростов н/Д.: Изд-во Южного федерального ун-та, 2015. 164 с.

Брызгало В.А., Никаноров А.М., Решетняк О.С. Изменчивость экологического состояния речных зон устьевых экосистем крупных рек России // Вода: химия и экология. 2013. № 12. С. 15–21.

Гидрология дельты и устьевого взморья Кубани / под ред. В.Н. Михайлова, Д.В. Магрицкого, А.А. Иванова. М.: ГЕОС, 2010. 728 с.

Гидрология: учебник для вузов / под ред. В.Н. Михайлова, С.А. Добролюбова. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. 752 с.

Заславская М.Б., Ефимова Л.Е. Сезонная изменчивость стока растворенных веществ в арктические моря России / Материалы научной конференции с международным участием «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод». Ч. 1: Ростов-на-Дону, 8–10 сентября 2015 г. Ростов н/Д., 2015. С. 44–48.

Коротаев В.Н., Бабич Д.Б., Михайлов В.Н. Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы. Геоморфология и прогноз развития. М.: ГЕОС, 2007. 445 с.

Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю. Река Кубань: гидрография и режим стока. СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. 498 с.

Магрицкий Д.В., Иванов А.А. Водный баланс дельты р. Кубань и его многолетние изменения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2008. № 5. С. 59–67.

Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.

Никаноров А.М., Брызгало В.А., Косменко Л.С., Кондакова М.Ю. Динамика притока растворенных химических веществ и антропогенная нагрузка на устьевую область

р. Кубань // Вода: химия и экология. 2011. № 9. С. 9–16.
Никаноров А.М., Брызгало В.А., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Роль химического речного стока в антропогенной трансформации состояния водной среды Енисейской устьевой области // Водные ресурсы. 2010. № 4. С. 434–444.
Никаноров А.М., Брызгало В.А., Решетняк О.С., Косменко Л.С., Кондакова М.Ю. Антропогенная трансформация экологического состояния и транспорт загрязняющих веществ по длине реки Кубани // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 2. С. 108–118.
РД 52.24.643–2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. 49 с.
Сорокина В.В., Ивлиева О.В., Лурье П.М. Динамика стока на устьевых участках рек Дон и Кубань во второй половине XX века // Вестник Южного научного центра РАН. 2006. Т. 2. № 2. С. 58–67.
Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Кубань. Кн. 2: Оценка экологического состояния и ключевые проблемы речного бассейна. Краснодар: Кубанское бассейновое водное управление, 2014. 133 с.
Ткаченко А.Н., Ткаченко О.В., Лычагин М.Ю. Потоки тяжелых металлов в аквальных системах дельт Дона и Кубани // Доклады Академии наук. 2017. Т. 474. № 2. С. 234–237.

Электронные ресурсы
АИС ГМВО. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов: URL: https://gmvo.skniivh.ru/ (дата обращения 09.01.2021).
Водно-болотные угодья России. URL: http://www.fesk.ru/wetlands/5.html (дата обращения 24.01.2021).
Kuban Delta: Group of limans between Kuban & Protoka Rivers: URL: https://rsis.ramsar.org/ris/674 (дата обращения 24.01.2021).

Поступила в редакцию 22.03.2021
После доработки 14.12.2021
Принята к публикации 27.06.2022

INTERANNUAL AND SEASONAL VARIABILITY OF CHEMICAL RUNOFF ALONG THE MAIN DELTA BRANCHES OF THE KUBAN RIVER

O.S. Reshetnyak[1], R.S. Komarov[2]

[1, 2] *Southern Federal University, Institute of Earth Sciences, Department of Geoecology and Applied Geochemistry*
[1] *Hydrochemical Institute, Laboratory of remote and chemical-biological methods of monitoring the state and pollution of water bodies, Senior Scientific Researcher*
[2] *Hydrochemical Institute, Laboratory of experimental hydrochemistry, Junior Scientific Researcher*

[1] *Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: olgare1@mail.ru*
[2] *Post-graduate student; e-mail: komarovroman128@yandex.ru*

The long-term interannual and seasonal variability of the chemical runoff along the main branches of the Kuban River delta was investigated. We analyzed the data of systematic observations on water runoff and the concentrations of the main ions, biogenic and organic substances, phenols, oil products and heavy metals for the period from 2008 to 2018. The annual and seasonal runoff of dissolved chemicals in the main branches of the Kuban River delta, i. e. the Protoka branch and the Kuban branch, was calculated. The chemical composition of water in the main branches of the Kuban River delta is practically the same, and the greatest differences are characteristic of the concentrations of chlorides, iron compounds, copper and oil products. Multidirectional trends of changes in the ionic composition and content of biogenic elements were revealed. There was a synchronous increase in the concentration of sulphates and ammonium nitrogen in both deltaic branches of the Kuban River; the content of nitrates and nitrites in the Kuban branch practically did not change, while it was decreasing in the Protoka branch. At the same time, the maximum frequency of exceeding the MPC for all components is rather low, and a low level of water pollution is typical. The chemical runoff along the delta branches is rather similar, especially in terms of the runoff of sulphates, organic substances and biogenic elements. The greatest differences by 20–22% are observed in the runoff of chlorides, iron and copper compounds. It is shown that the runoff of chlorides and sulphates, as well as biogenic and organic substances, is interconnected with water runoff. In general, the distribution of chemical runoff along the delta branches is uniform, its seasonal variability corresponds to changes in water amount during the principal seasons, while some differences are observed only for chlorides and iron compounds. Under actual climatic changes and anthropogenic impact, the revealed features and trends of variability of chemical runoff along the main branches of the Kuban River delta are of great practical importance. The data obtained can be used for predictive estimates of the removal of chemicals into the coastal zone of the Sea of Azov.

Keywords: water runoff, chemical composition, dissolved substances, chemical runoff, main delta branches, Kuban River, Sea of Azov

REFERENCES

Bryzgalo V.A., Nikanorov A.M., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. *Ust'evye ekosistemy krupnykh rek Rossii: antropogennaya nagruzka i ekologicheskoe sostoyanie* [Estuarine ecosystems of major rivers in Russia: anthropogenic load and ecological state], Rostov-on-Don, Southern Federal University Press, 2015, 164 p. (In Russian)

Bryzgalo V.A., Nikanorov A.M., Reshetnyak O.S. Izmenchivost' ekologicheskogo sostoyaniya rechnykh zon ust'evykh ekosistem krupnykh rek Rossii [Ecological state variability of mouth ecosystems of big rivers of Russia], *Voda: khimiya i ekologiya,* 2013, no. 12, p. 15–21. (In Russian)

Gidrologiya del'ty i ust'evogo vzmor'ya Kubani [Hydrology of the delta and estuarine coast of the Kuban River], V.N. Mikhailov, D.V. Magritsky, A.A. Ivanov (eds.), Moscow, GEOS, 2010, 728 p. (In Russian)

Gidrologiya: uchebnik dlya vuzov [Hydrology: textbook for universities], V.N. Mikhailov, S.A. Dobrolyubov (eds.), Moscow, Berlin, Direct Media, 2017, 752 p. (In Russian)

Korotaev V.N., Babich D.B., Mikhailov V.N. *Estuarno-del'tovye sistemy Rossii i Kitaya: gidrologo-morfologicheskie protsessy. Geomorfologiya i prognoz razvitiya* [Estuarine-deltaic systems of Russia and China: hydrological-morphological processes, geomorphology and forecast of evolution], Moscow, GEOS, 2007, 445 p. (In Russian)

Lurie P.M., Panov V.D., Tkachenko Yu.Yu. *Reka Kuban': gidrografiya i rezhim stoka* [The Kuban River: hydrography and flow regime], St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2005, 498 p. (In Russian)

Magritsky D.V., Ivanov A.A. Vodnyi balans del'ty r. Kuban' i ego mnogoletnie izmeneniya [Water balance of the Kuban River delta and its long-term fluctuations], *Vestn. Mosk. un-ta*, *Ser. 5, Geogr.,* 2008, no. 5, p. 59–67. (In Russian)

Mikhailov V.N. *Ust'ya rek Rossii i sopredel'nyh stran: proshloe, nastoyashchee i budushchee* [Estuaries of rivers in Russia and neighboring countries: past, present and future], Moscow, GEOS, 1997, 413 p. (In Russian)

Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Kosmenko L.S., Kondakova M.Yu. Dinamika pritoka rastvorennykh khimicheskikh veshchestv i antropogennaya nagruzka na ust'evuyu oblast' r. Kuban' [Dynamics of chemical substance inflow and anthropogenic load on the Kuban River mouth area], *Voda: khimiya i ekologiya*, 2011, no. 9, p. 9–16. (In Russian)

Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. Rol' khimicheskogo rechnogo stoka v antropogennoi transformatsii sostoyaniya vodnoi sredy Eniseiskoi ust'evoi oblasti [The role of chemical river runoff in the anthropogenic transformation of the state of the aquatic environment in the Enisei River mouth area], *Vodnye resursy*, 2010, no. 4, p. 434–444. (In Russian)

Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Reshetnyak O.S., Kosmenko L.S., Kondakova M.Yu. Antropogennaya transformatsiya ekologicheskogo sostoyaniya i transport zagryaznyayuschikh veshchestv po dline reki Kubani [Anthropgenic transformation of the ecological state and pollutants' transport along the Kuban River], *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2013, no. 2, p. 108–118. (In Russian)

RD 52.24.643–2002. Metodicheskie ukazaniya. Metod kompleksnoi otsenki stepeni zagryaznennosti poverkhnostnykh vod sushi po gidrokhimicheskim pokazatelyam [Guidance document 52.24.643–2002. Methodological guidelines. A method for complex assessment of the degree of contamination of land surface waters by hydrochemical indicators], St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2003, 49 p. (In Russian)

Skhema kompleksnogo ispol'zovaniya i okhrany vodnykh ob"ektov basseina reki Kuban', kn. 2, Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya i klyuchevye problemy rechnogo basseina [Scheme of integrated use and protection of water bodies in the Kuban River basin, book 2, Assessment of the ecological state and key problems of the river basin], Krasnodar, Kuban Basin Water Management, 2014, 133 p. (In Russian)

Sorokina V.V., Ivlieva O.V., Lurie P.M. Dinamika stoka na ust'evykh uchastkakh rek Don i Kuban' vo vtoroi polovine XX veka [River flow alteration within the mouth areas of the Don and Kuban rivers in the second half of the 20th century], *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN*, 2006, vol. 2, no. 2, p. 58–67. (In Russian)

Tkachenko A.N., Tkachenko O.V., Lychagin M.Yu. Potoki tyazhelyh metallov v akval'nyh sistemah del't Dona i Kubani [Fluxes of heavy metals in the aquatic systems of the Don and Kuban River deltas], *Doklady Akademii nauk,* 2017, vol. 474, no. 2, p. 234–237. (In Russian)

Zaslavskaya M.B., Efimova L.E. [Seasonal variability of dissolved-solid yield in the Arctic seas of Russia], *Materialy nauchnoj konferencii "Sovremennye problemy gidrohimii i monitoringa kachestva poverhnostnyh vod"* [Proceedings of the Scientific conference "Modern problems of hydrochemistry and surface water quality monitoring"], 2015, pt. 1, p. 44–48. (In Russian)

Web sources

AIS GMVO. Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob"ektov [Automated Information System for State Monitoring of Water bodies], URL: https://gmvo.skniivh.ru/ (access date 09.01.2021). (In Russian)

Kuban River Delta: Group of limans between Kuban & Protoka rivers, URL: https://rsis.ramsar.org/ris/674 (access date 24.01.2021).

Vodno-bolotnye ugodiya Rossii [Wetlands of Russia], URL: http://www.fesk.ru/wetlands/5.html (access date 24.01.2021). (In Russian)

Received 22.03.2021
Revised 14.12.2021
Accepted 27.06.2022