

УДК 556.54:550.43:550.47

СТОК ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ С РЕКОЙ ДОН В АЗОВСКОЕ МОРЕ В МАЛОВОДНЫЙ ПЕРИОД 2007–2020 гг.¹

© 2025 г. В. С. Герасюк*, Н. В. Лихтанская, В. В. Сорокина, С. В. Бердников

ЮНЦ РАН, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

*e-mail: gerasyuk.v@mail.ru

Поступила в редакцию 10.01.2024 г.

После доработки 04.03.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

На основе данных, полученных в период экспедиционных работ ЮНЦ РАН, с использованием статистического моделирования получены новые количественные оценки стока растворенного органического углерода, хлорофилла-*a*, общего взвешенного вещества, взвешенного органического углерода с водами р. Дон в Азовское море в маловодный период 2007–2020 гг. Статистические модели построены методом взвешенных регрессий по времени, расходу воды и сезону (Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season – WRTDS), который обеспечивает одну из самых точных количественных оценок концентраций и потоков веществ на сегодняшний день. Рассмотрены сезонные и межгодовые особенности концентраций рассматриваемых веществ в реке, показана их связь с расходами воды. Выполнено сравнение стока органических веществ и взвесей Дона в современный маловодный период и другие периоды XX в.

Ключевые слова: сток органических веществ, твердый сток, временная изменчивость, река Дон, маловодье, статистические методы.

DOI: 10.31857/S0321059625020061 EDN: UBXUVW

ВВЕДЕНИЕ

На фоне современных климатических изменений для многих рек умеренного и субтропического климатических поясов свойственно проявление признаков маловодья [46, 51]. Характер атмосферных осадков становится более изменчивым, все чаще наводнения перемежаются засухами. Так, сильные засухи (в 2015, 2020, 2022 гг.) в странах Европы оказали существенное влияние на площадь водоемов [44, 52]. Экстремально низкие уровни воды отмечены в крупнейших реках, включая Янцзы в Китае, Рейн в Западной Европе, Миссисипи в США и др. [50].

Изменения водного режима рек Российской Федерации имеют различный характер как по направленности, так и по степени выраженности. В целом, на Европейской территории России в последние десятилетия проявляется тенденция увеличения годовых величин речно-

го стока, связанная с общим ростом увлажненности территории [7]. Исключение – бассейны Дона, Оки и нижней Волги, где наблюдается статистически достоверный тренд снижения годового стока [15].

Текущий период (с 2007 г. по настоящее время) характеризуется маловодьем в бассейне нижнего Дона, оно самое продолжительное из наблюдавшихся в XX в. [19]. Вместе с изменением водности Дона происходит трансформация гидрохимического стока. Протекающие в последнее время в пределах водосбора Дона процессы все больше приобретают аномальные формы и еще мало изучены. Так, низкий уровень воды может способствовать эвтрофированию водных объектов. В годы пониженного стока фиксируют существенное увеличение концентрации фитопланктона [19]. Кроме того, дефицит речного стока приводит к увеличению общей минерализации вод. С ним связан неуклонный рост среднегодовой солености Азовского моря [5, 29].

На сегодняшний день существует немало работ, посвященных исследованию химического состава и качества вод Дона (например, [6, 9, 22,

¹ Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 22–27–00818 “Влияние длительного маловодья и изменений климата (на рубеже XX–XXI веков) на динамику взвешенного вещества в устьевой области Дона”).

23, 30, 31, 34, 39, 40]), в которых уделено внимание пространственно-временным особенностям гидрохимического режима реки. Однако в большинстве этих работ химический состав вод характеризуется относительными величинами (ПДК, проценты, соотношения, индексы); отбор проб проводился преимущественно в теплый период или системно раз в сезон; обработка проб осуществлялась по разным методикам. Все это существенно затрудняет использование представленных данных в расчетах и анализ химического стока.

Современные оценки стока веществ с водами р. Дон в Азовское море редки, так как требуют больших массивов первичных данных, которые отсутствуют в открытом доступе. В работе [38] на основе данных экспедиционных наблюдений ЮНЦ РАН, средних концентраций растворенного (DOC) и взвешенного (POC) органического углерода оценен вынос этих веществ с донским стоком за период 2007–2015 гг. Сток общего органического вещества (ТОМ), рассчитанный с использованием данных определения химического потребления кислорода (ХПК), опубликован в ежегодниках Росгидромета “Качество поверхностных вод Российской Федерации”. В Атласе [9] представлены карты распределения величин основных гидрохимических параметров стока. В работе [26] с использованием статистического моделирования оценен твердый сток р. Дон за 2009–2020 гг., отмечено существенное сокращение выноса взвешенных веществ (до 91%) по сравнению с условно-естественным периодом.

Гидрохимический сток служит важным показателем функционирования природно-территориальных комплексов, характеризует перемещение и трансформацию вещества и энергии в водосборном бассейне и необходим для объективной оценки геоэкологического состояния территорий и экосистем водных объектов. В современных условиях маловодья требуется системное представление о текущем стоке органических и минеральных веществ с р. Дон в Азовское море.

Цель настоящей работы — оценка стока органических веществ и взвесей с р. Дон в послед-

ний маловодный период. Решались следующие задачи: 1) заполнение пробелов в рядах данных, возникших из-за нерегулярности наблюдений, при помощи статистического моделирования; 2) определение сезонных и межгодовых особенностей стока веществ; 3) установление связи между концентрацией веществ и расходом воды; 4) сравнение современных оценок стока органических веществ, полученных с использованием данных прямых измерений и данных косвенного метода определения органического вещества (ОВ) по ХПК; 5) сравнение полученных величин стока веществ с оценками предшествующих исследований в периоды с различной водностью р. Дон.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования был участок нижнего Дона от плотины Цимлянского водохранилища до устья реки (рис. 1).

В результате планомерных исследований нижнего Дона, выполненных ЮНЦ РАН в течение 14 лет (2007–2020 гг.), накоплен массив данных о концентрации DOC, хлорофилла-*a* (Chl-*a*) и общего взвешенного вещества (TSS). Проведенные экспедиционные работы, которых за весь период наблюдений было свыше ста, охватывают все календарные месяцы и разные гидрологические сезоны. Инвентаризационные таблицы опубликованы в работах [21, 39, 49].

Методы анализа проб воды

Принцип подготовки и обработки проб сохранялся на протяжении всего периода исследований. Речную воду отфильтровывали через стекловолокнистые фильтры MGF (“Sartorius”) с порами диаметром 0.7 мкм. Полученный фильтр для определения DOC хранили при температуре +4°C не более месяца до момента анализа в стационарной междисциплинарной аналитической лаборатории ЮНЦ РАН (МАЛ ЮНЦ РАН). Полученный фильтр с осадком сразу же помещали в морозильную камеру, после транспортировки в МАЛ ЮНЦ РАН определяли концентрацию Chl-*a* спектрофотометрическим методом по ГОСТу [10] на двухлучевом спектрофотометре “Evolution 200”. Определение DOC выпол-

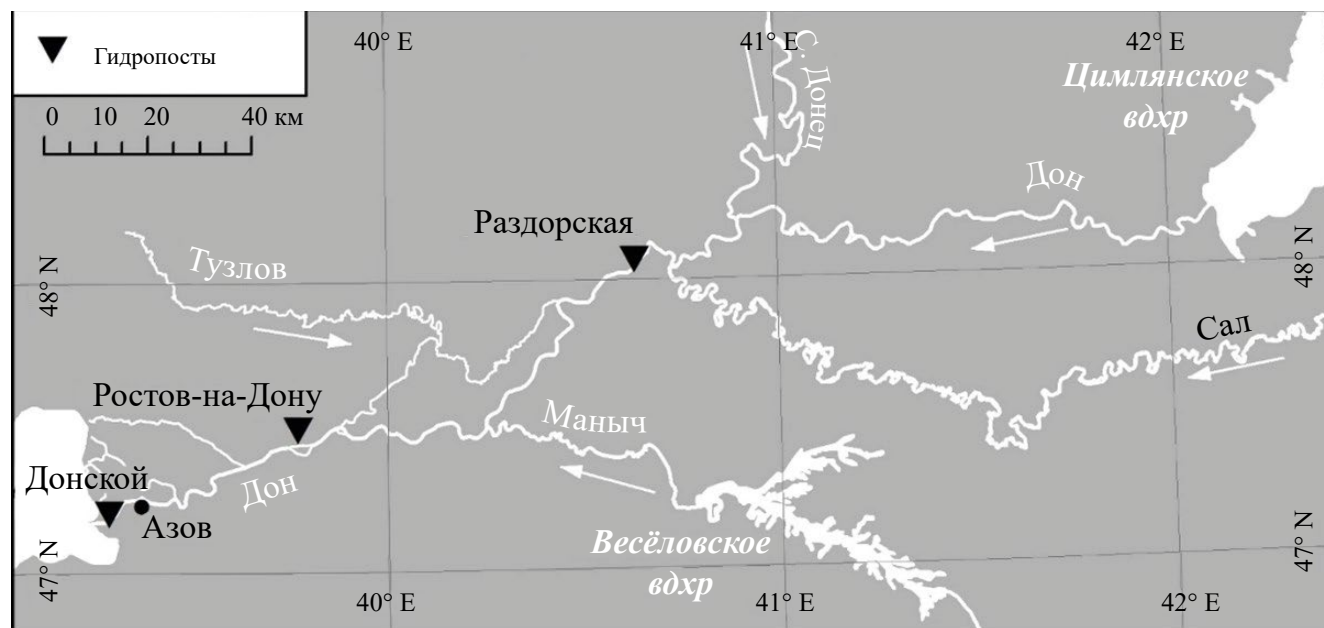


Рис. 1. Карта исследуемого участка.

няли методом высокотемпературного сжигания (800°C) в атмосфере чистого кислорода с применением катализатора оксида церия. Образующийся диоксид углерода определяли методом оптико-акустической регистрации в ИК-области с помощью ТОС-анализатора “multi-N/C 3100” (производство “Analytik Jena”, Германия).

Содержание TSS определяли путем фильтрации пробы через предварительно прокаленный при температуре 400°C стекловолнистый фильтр MGF (“Sartorius”) с порами диаметром 0.7 мкм, далее высушивали полученный осадок при температуре 105°C до постоянной массы, взвешивали и рассчитывали массу привеса [32]. Далее этот же фильтр со взвешенным осадком в тот же день использовали для определения РОС способом мокрого сжигания с бихроматом калия при нагревании в присутствии сернистого серебра. Концентрацию РОС определяли путем умножения полученной величины бихроматной окисляемости на коэффициент 0.36 для пересчета из единиц кислорода в углерод [36].

Метод получения модельных данных

Для получения количественных оценок стока DOC и Chl-*a* в Азовское море с донскими водами за периоды 2007–2020 гг. (для DOC) и 2008–

2019 гг. (для Chl-*a*) использованы результаты экспедиционных наблюдений [46] из базы данных гидрохимических показателей ЮНЦ РАН и результаты статистического моделирования, выполненного с целью заполнения пробелов в данных по концентрациям рассматриваемых веществ, возникших из-за нерегулярности сбора данных. Данных измерений РОС оказалось недостаточно, чтобы построить статистическую модель, поэтому использовались сделанные ранее [40] оценки концентрации РОС в водах нижнего Дона в период 2007–2014 гг.

Статистические модели строили методом взвешенных регрессий по времени, расходу воды и сезону (Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season – WRTDS) [45]. Этот метод был применен ранее авторами статьи для оценки потоков взвешенных веществ со стоком р. Дон [25]. Метод реализован в программном комплексе для исследования и графического отображения речных трендов (Exploration and Graphics for River Trends – EGRET) [42]. Метод WRTDS обеспечивает одну из самых точных количественных оценок концентраций и потоков веществ и на сегодняшний день является лучшим выбором [47, 48].

Основное преимущество метода WRTDS заключается в том, что для представления связи

между концентрацией рассматриваемого вещества и расходом воды, которая непостоянна во времени, в нем используется взвешенное сглаживание. Для каждого узла расчетной сетки на основе имеющихся натурных данных, наиболее “близких” к нему с точки зрения времени, расхода воды и сезона, подбираются уникальные коэффициенты регрессионного уравнения. Значения, попадающие в разряд “близких”, определяются с помощью величин трех полуокон сглаживания (по времени, расходу воды и сезону), которые являются входными параметрами модели и подбираются опытным путем по результатам проверки ее качества. При этом важно, что каждое “близкое” значение получает свой вес, который вычисляется на основе трех расстояний (по времени, расходу воды и сезону) между точкой оценки и точкой измерения. Регрессионное уравнение, используемое в этом методе, имеет следующий вид:

$$\ln(c) = \beta_0 + \beta_1 q + \beta_2 T + \beta_3 \sin(2\pi T) + \beta_4 \cos(2\pi T) + \varepsilon, \quad (1)$$

где c — концентрация, мг/л; $\beta_0 \dots \beta_4$ — коэффициенты регрессии; $q = \ln(Q)$, Q — среднесуточный расход воды, м³/с; T — время в десятичных годах; ε — ошибка (необъясненная вариация).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты применения метода WRTDS

Применимость метода WRTDS зависит от наличия среднесуточных значений расхода воды для каждого дня изучаемых периодов. Это условие оказалось выполнимым только для гидрологического поста в ст. Раздорской. Для построения моделей использовано 5114 значений ежедневных расходов воды за период 2007–2020 гг. (для оценки DOC) и 4383 значения за период 2008–2019 гг. (для оценки Chl-*a*) из Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [2] и Глобального центра данных о речных стоках (Global Runoff Data Centre — GRDS) [43].

Данные о концентрациях рассматриваемых веществ (108 значений концентрации DOC и 63 значения концентрации Chl-*a*), которые ис-

пользовали для построения моделей, получены в соответствии со следующим алгоритмом: сначала выбирали данные, полученные в ст. Раздорской, а затем выбирали и усредняли данные, собранные в точках измерения (далее — станциях), наиболее близких к ней территориально.

К построенным моделям применили фильтрацию Калмана, повышающую точность оценок концентраций рассматриваемых веществ [53]: в дни с измерениями оценки модели заменялись измеренными значениями, а в остальные дни — скорректированными после этого оценками.

Для каждой из построенных моделей рассчитали диагностические выходные данные, которые продемонстрировали, что результаты моделирования заслуживают доверия. В частности, для каждой модели рассчитали статистику смещения величин потоков изучаемого вещества B , которая в соответствии с [42] — ключевая характеристика качества модели и вычисляется по формуле (2):

$$B = (P - O)/P, \quad (2)$$

где P , O — суммы соответственно наблюдаемых и расчетных среднесуточных потоков изучаемых веществ в дни с измерениями.

Значения B , рассчитанные для DOC и Chl-*a*, составляют -0.001 и -0.09 соответственно. Это означает, что для концентрации DOC смещение составляет $\pm 0.1\%$, а для концентрации Chl-*a* — $\pm 9\%$, что демонстрирует приемлемый уровень потенциальной систематической ошибки в расчетных значениях потоков.

Таким образом, полученные результаты статистического моделирования позволили заполнить пробелы в значениях концентраций рассматриваемых веществ в дни без измерений и получить непрерывный ряд данных для последующей количественной оценки стока растворенных и взвешенных веществ с р. Дон в Азовское море.

Величины стока DOC (в 2007–2020 гг.), Chl-*a* (в 2008–2019 гг.) и TSS (в 2007–2020 гг.) для каждого месяца получены умножением ежедневных

расходов воды на концентрации веществ с последующим суммированием, что дало в итоге годовые объемы стока веществ (табл. 1). Табл. 1 дополнена значениями стока ТОМ по данным ежегодников Росгидромета “Качество поверхностных вод Российской Федерации” (<https://gidrohim.com/node/44>). Необходимо отметить, что сток ТОМ в этих серийных изданиях определен косвенным методом по значениям бихроматной окисляемости (ХПК) с использованием коэффициента ОВ/ХПК = 0.75 [36]. При этом не учитываются значения легкоокисляемого органического вещества по биохимическому потреблению кислорода (БПК).

Характеристика современного водного стока

Сток химических веществ определяется, главным образом, водным стоком, динамика которого на протяжении последнего маловодного периода представлена на рис. 2.

В 2020 г. величина водного стока Дона приблизилась к историческому минимуму — 10.3 км³ (рис. 2). Исключением из ряда маловодных лет стал 2018 г., когда объем годового стока составил

23.5 км³ при максимальных расходах ~1900 м³/с. Это стало ярким примером природно-техногенной аномалии на фоне многолетнего маловодья на Дону, когда избыток воды от весеннего паводка привел к аварийным попускам воды из Цимлянского водохранилища [28].

В годовом цикле для водосбора нижнего Дона характерны три гидрологических сезона: половодье, которое приходится на апрель—май, длительный период летней межени (июнь—октябрь) и зимняя межень, которая наступает в ноябре и длится до начала половодья. Границы гидрологических сезонов определены на основе многолетних гидрографов и данных о среднемноголетних датах начала и окончания половодья [14, 33].

Ранее за небольшой отрезок половодья проходило от 35 до 100% годового стока [20], и традиционно на это время приходился максимальный химический сток реки. В современный маловодный период на долю половодья в среднем приходится 20%, в то время как на летнюю и зимнюю межень — по 40% годового водного стока (рис. 2). В 2018 г. на апрель—май пришлась треть (33%) годового стока, а в самый маловодный

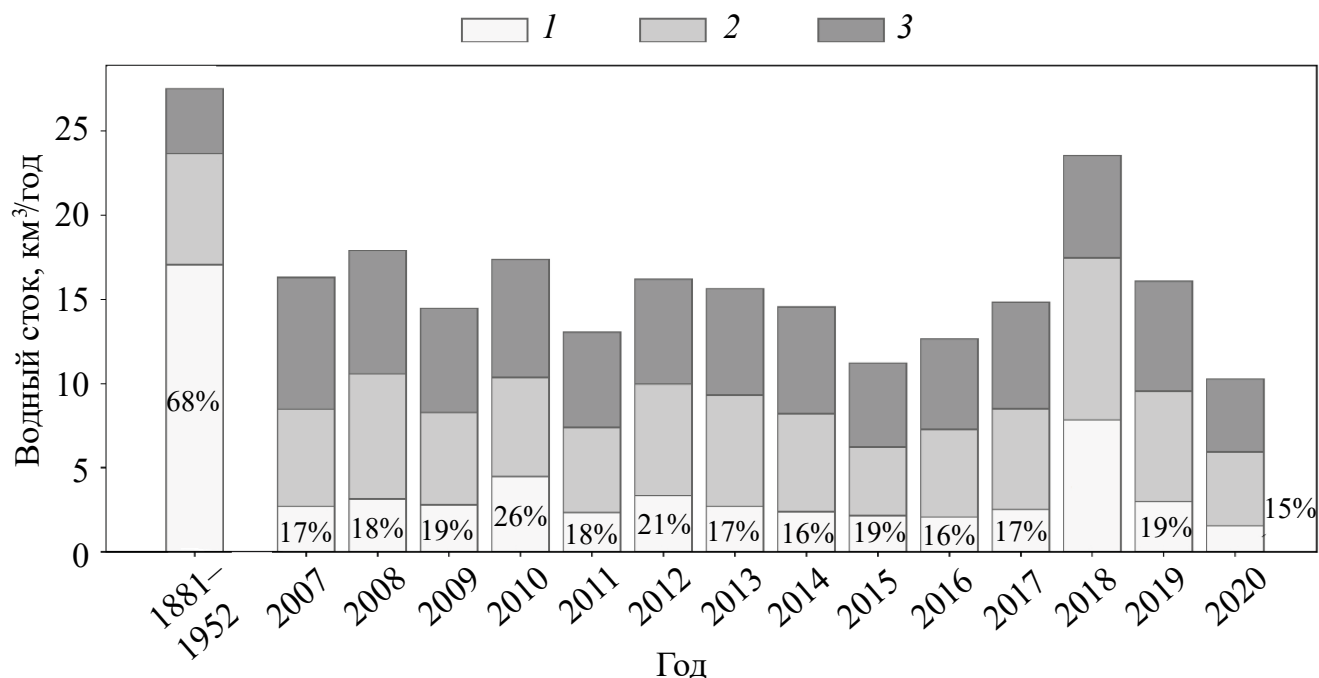


Рис. 2. Водный сток р. Дон (ст. Раздорская) в период 2007–2020 гг. в сравнении со средним годовым стоком в условно-естественный период 1881–1951 гг. 1 — половодье (значения в процентах показывают долю стока в апреле–мае от общего стока за год), 2 — летняя межень, 3 — зимняя межень.

Таблица 1. Сток DOM, POM, TOM, TSS, Chl-*a* и легкоокисляемого взвешенного органического вещества (LPOM) с водами р. Дон (прочерк – отсутствие данных)

Год	DOM		TOM		POM, тыс. T**	POM, мг/л (среднее)**	TSS, тыс. T***	TSS, мг/л (среднее)***	Chl- <i>a</i> , т	Chl- <i>a</i> , мкг/л (среднее)	LPOM, мг/л
	тыс. т	мг/л	тыс. т	мг/л*							
2007	377	23.1±2.4	–	–	9.7	0.6	90.4	–	–	–	–
2008	405	22.6±1.6	–	–	8.7	0.5	78.8	–	274.3	15±10.8	0.5
2009	325	22.5±2.4	310	19.4	4.0	0.3	36.7	2.5±1.7	125.3	8.6±6.3	0.3
2010	381	22.0±1.4	403	20.9	6.1	0.4	52.7	3.2±2.2	198.6	10.8±8.6	0.4
2011	301	23.1±1.6	297	20.5	42.0	3.2	360	29.4±21.2	97.0	7.5±6.3	0.3
2012	358	22.1±1.4	396	22.0	18.7	1.2	159.9	10.5±7.7	192.8	11.4±8.8	0.5
2013	358	22.9±2.0	453	26.2	12.0	0.8	108.8	7.0±6.5	192.9	12.2±9.2	0.5
2014	330	22.7±1.8	415	25.6	8.5	0.6	77.3	5.3±5.2	154.0	11.0±8.5	0.4
2015	254	22.7±1.8	320	25.6	7.6	0.7	65.2	6.2±5.5	112.0	10.4±7.4	0.4
2016	273	21.6±2.0	–	–	7.9	0.6	72.7	5.7±5.6	128.6	10.2±6.9	0.4
2017	314	21.2±3.0	–	–	38.9	2.6	356.8	23.9±20.6	164.3	11.1±6.0	0.4
2018	441	18.7±3.0	–	–	36.2	1.5	331.6	14.0±10.4	265.2	10.5±4.8	0.4
2019	350	21.8±2.8	–	–	54.9	3.4	496.6	31.0±26.6	179.6	11.0±4.7	0.4
2020	247	24.1±2.4	443	28.2	34.7	3.4	318.3	30.6±27.1	–	–	–
Среднее значение± стандартное отклонение	337±56	22.2±1.2	380±62	23.5±3.2	20.7±16.3	1.4±1.2	186±152	12.8±11	173.7±56	10.8±1.8	0.4±0.1

*Рассчитано по данным серии ежегодников “Качество поверхностных вод Российской Федерации” 2009–2015гг. и 2020 г.

**Рассчитано с использованием оценок среднего содержания РОС в TSS вод нижнего Дона [38].

***По данным работы [26].

2020 г. — всего 15%. Такие колебания водности в сочетании с изменениями концентраций растворенных и взвешенных веществ в воде требуют корректных оценок химического стока.

Оценка стока растворенных и взвешенных веществ с р. Дон в период 2007–2020 гг.

В период 2007–2014 гг. концентрация РОС в водах Нижнего Дона составила в среднем 0.7 мгС/л (0.5–0.9 мгС/л), по данным [40], или 1.4 мг/л (1–1.8 мг/л) взвешенного органического вещества (РОМ), если исходить из общепринятого мнения, что в природных водах на углерод приходится 50% веса органического вещества [36]. С учетом средней концентрации DOM (22.2 мг/л) (табл. 1) в рассматриваемый маловодный период получаем среднюю концентрацию ТОМ — 23.6 мг/л, которая сопоставима с оценкой 23.5 мг/л, полученной на основе данных ежегодников “Качество поверхностных вод Российской Федерации” (<https://gidrohim.com/node/44>).

Вынос DOM в период низкого стока (2007–2020 гг.) составил в среднем 337 тыс. т/год (табл. 1), что попадает в интервал значений 320–340 тыс. т/год, полученный в работе [38] для периода 2011–2015 гг. Исходя из оценок [38], среднее содержание РОС в общей взвеси вод нижнего Дона составляет 5.5%, РОМ — 11%. С учетом данных по твердому и водному стоку рассчитали средние значения и ежегодного поступления РОМ (табл. 1). Оценить сток РОМ в рассматриваемый период можно, также умножив среднегодовую величину водного стока (15.3 км³) на среднюю концентрацию РОМ (1.4 мг/л), при этом получим значение 21.4 тыс. т/год.

Таким образом, суммарный сток DOM и РОМ составил порядка 357 тыс. т/год. Для сравнения отметим, что в работе [38] сток органического вещества в растворенной и твердой формах оценен в ~ 360 тыс. т/год, а по данным ежегодников Росгидромета — 380 тыс. т/год.

Сток TSS и Chl-*a* по годам распределен неравномерно, причем четкой зависимости от водности не прослеживается. За весь маловодный период сток TSS в среднем составил

0.19±0.15 млн т/год. Поступление твердого стока сократилось более чем в 20 раз по сравнению с условно-естественным периодом (1940–1952 гг.) [38]. Диапазон среднегодовых концентраций TSS менялся от 2.5 до 31 мг/л при среднем значении 12.8, что более чем в 2 раза превышает среднее значение для рек мира — 5.75 мг/л [35]. Сток Chl-*a* за весь период составил 173 тыс. т/год, среднегодовая концентрация — 10.8 мкг/л при небольшой вариабельности (табл. 1).

*Внутригодовая динамика стока веществ.
Связь с расходами воды*

Во многих работах отмечена прямая зависимость концентраций и стока органических и взвешенных веществ от объемов водного стока. Однако в бассейне нижнего Дона эта закономерность нарушается в силу разных причин, а механизмы изменений еще мало изучены. В современный маловодный период половодье в низовьях Дона практически не выражено, а сток формируется за счет разных источников (попусков из Цимлянского водохранилища, талых, дождевых, подземных вод), доли которых меняются год от года, антропогенный фактор (забор и сброс воды) также вносит свой вклад.

Растворенное органическое вещество

На рис. 3 представлена динамика среднемесячного расхода воды и концентрации DOC в р. Дон в маловодный период 2007–2020 гг., за исключением 2018 г. (рис. 3а), и в 2018 г. с ярко выраженным половодьем (рис. 3б). Так, поступление талых вод весной 2018 г., обедненных DOM, привело к уменьшению в апреле концентраций DOC в водах нижнего Дона более чем в 2 раза. Концентрации DOC отрицательно коррелировали с расходом воды ($R^2 = 0.72$) (рис. 3б). Причина этого явления — обильное выпадение атмосферных осадков (снега) в переходной период 2017–2018 г. на водосборе р. Дон. После снеготаяния проявился весьма высокий уровень вод Дона и произошло заполнение Цимлянского водохранилища водами с пониженной минерализацией и обедненным органическим веществом (Дон по типизации рек относят к рекам со снеговым питанием). Опорные данные свидетельствуют о том, что в расто-

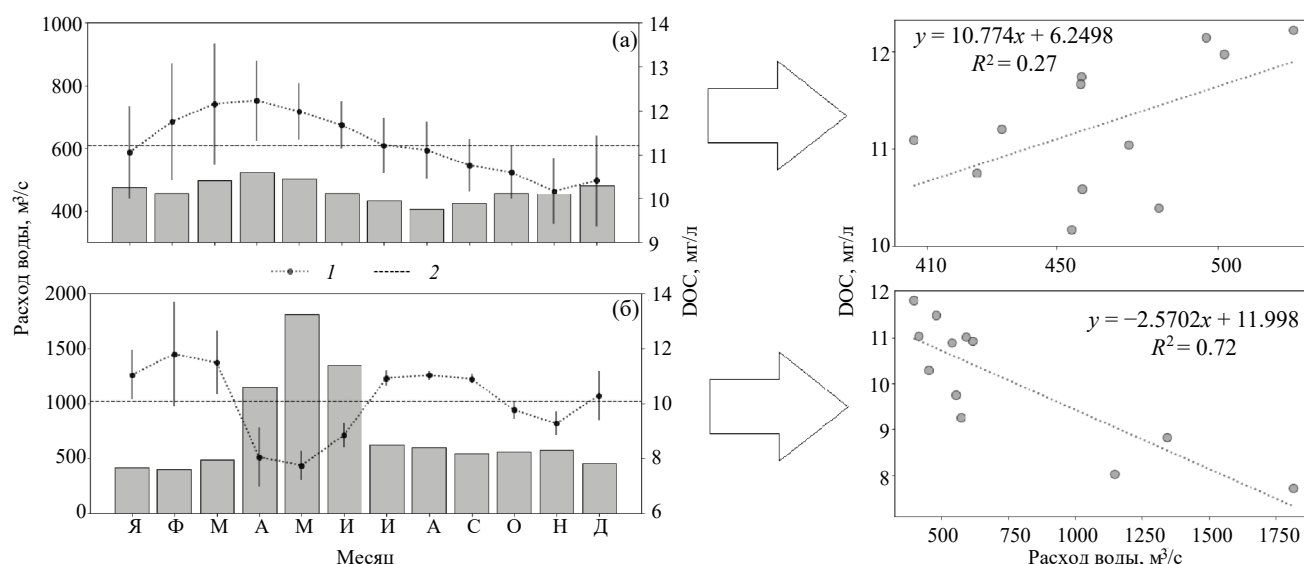


Рис. 3. Средние месячные величины расхода воды (столбцы) и средняя концентрация DOC (линия с маркерами) в р. Дон в маловодный период 2007–2020 гг., за исключением 2018 г. (а), и в 2018 г. с выраженным половодьем (б). Горизонтальная пунктирная линия — среднегодовое значение концентрации DOC. Графики справа отображают зависимость концентрации DOC от расхода воды.

племном снеге исследуемого района содержание DOC находится на низком уровне.

В остальные годы маловодного периода вариации концентраций DOC были значительно меньше, несколько повышены в весенний период (рис. 3а). Прямая зависимость средних концентраций DOC от расходов воды в целом выражена слабо. Если рассматривать все годы последнего маловодного периода, то можно проследить обратно пропорциональную связь между средними концентрациями DOC и величинами расхода воды в период половодья и летней межени (рис. 4а).

Среднегодовое значение DOC (без учета 2018 г.) составило 11.2 мг/л, в 2018 г. — 10.1 мг/л. Схожие оценки среднего содержания DOC в современный период характерны для равнинных рек восточной Европы (например, в водах Днестра содержится DOC 8.6–12.6 мг/л) [41].

Хлорофилл-а

Для внутригодовой динамики концентраций Chl-а характерны максимум в летние месяцы и минимум в холодный период года (рис. 5а). За

исследуемый период зависимости Chl-а от расхода воды не выявлено (рис. 4б). В 2018 г. с ярко выраженным половодьем пик цветения фитопланктона сместился ближе к календарной осени (рис. 5б).

Большая часть лабильного органического вещества (ЛОМ) продуцируется хлорофиллсодержащими организмами в самом водоеме в результате фотосинтеза и окисляется в водной толще; таким образом, доля данной фракции во внешнем балансе минимальна. Однако количественные данные Chl-а могут дать представление о содержании лабильного взвешенного органического вещества (LPOM), которое может оказывать значительное влияние на процессы седиментации в зоне смешения речных и морских вод [8]. Содержание Chl-а в биомассе фитопланктона (органическом веществе) для устья р. Дон составляет 2.5%, по данным [50]. Оценку концентрации LPOM для каждого года получили путем деления среднегодовой величины Chl-а на коэффициент 0.025 (табл. 1). Таким образом, по приближенным подсчетам среднегодовая концентрация LPOM составила 0.4 мг/л. Доля LPOM в составе POM в среднем — 30%, но может варьировать в широком диапазоне — от 10 до 100%.

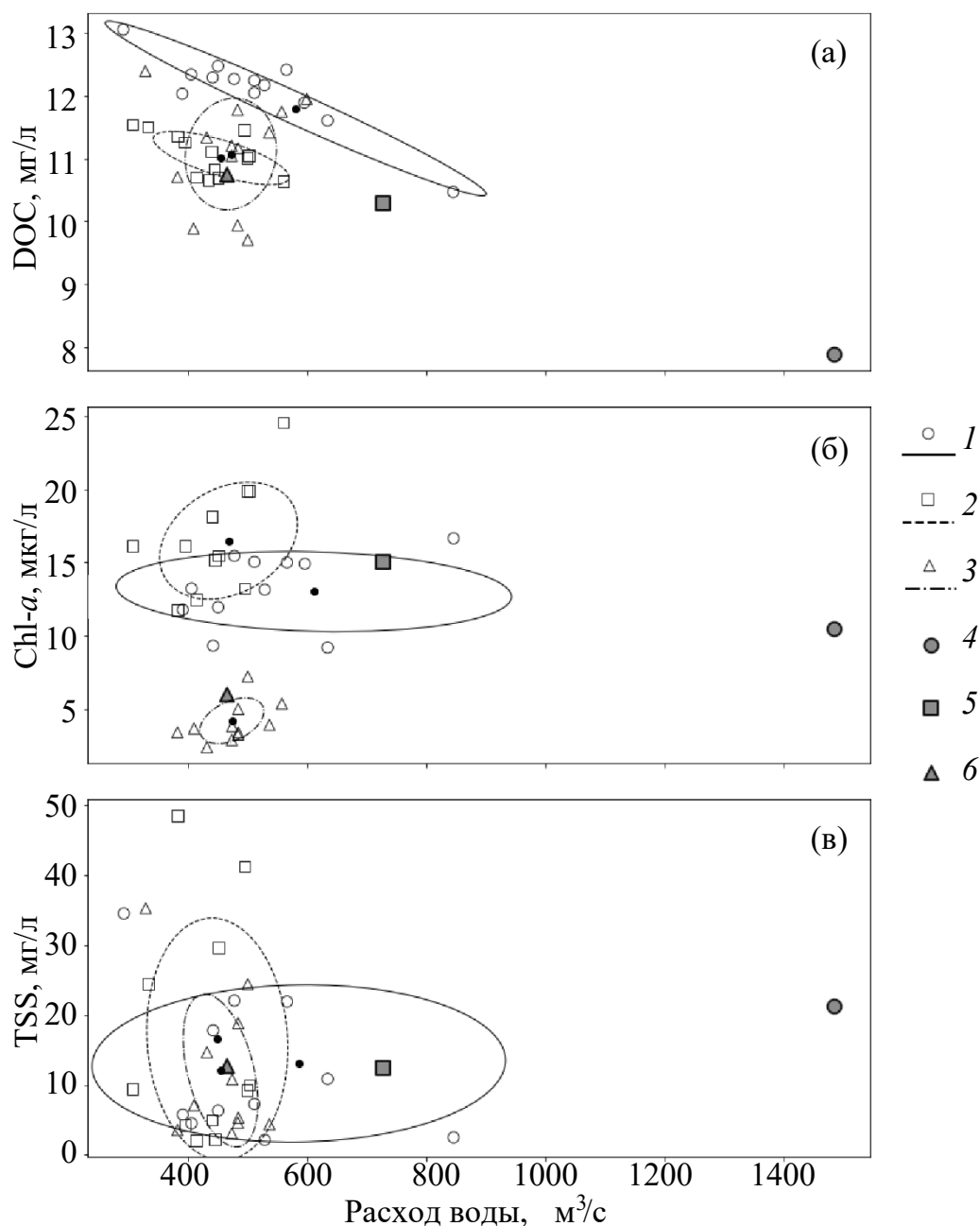


Рис. 4. Зависимость концентраций DOC в период 2007–2020 гг. (а), Chl-*a* в период 2008–2019 гг. (б) и TSS в период 2009–2020 гг. (в) от расхода воды в основные гидрологические сезоны: 1 – половодье (апрель–май), 2 – летняя межень (июнь–октябрь), 3 – зимняя межень (ноябрь–март), 4–6 – средние значения по каждому сезону в 2018 г. Полуоси эллипса соответствуют одному среднеквадратическому отклонению, центр эллипса (закрашенная точка) – среднему значению выборки, маркеры – средние значения по каждому сезону за весь исследуемый период.

Общее взвешенное вещество

Несмотря на высокую изменчивость средне-месячных концентраций TSS маловодного периода (за исключением 2018 г.), пик (20 мг/л) приходился на июнь, а минимальные значения

(9.3–11.3 мг/л) отмечались с декабря по апрель (рис. 5в). В 2018 г. максимум TSS зафиксирован в апреле (34.2 мг/л), а во время больших величин расхода воды (май, июнь) концентрация взвеси в речной воде была минимальна и находилась на уровне 5.5–8.9 мг/л (рис. 5г). По всей видимости,

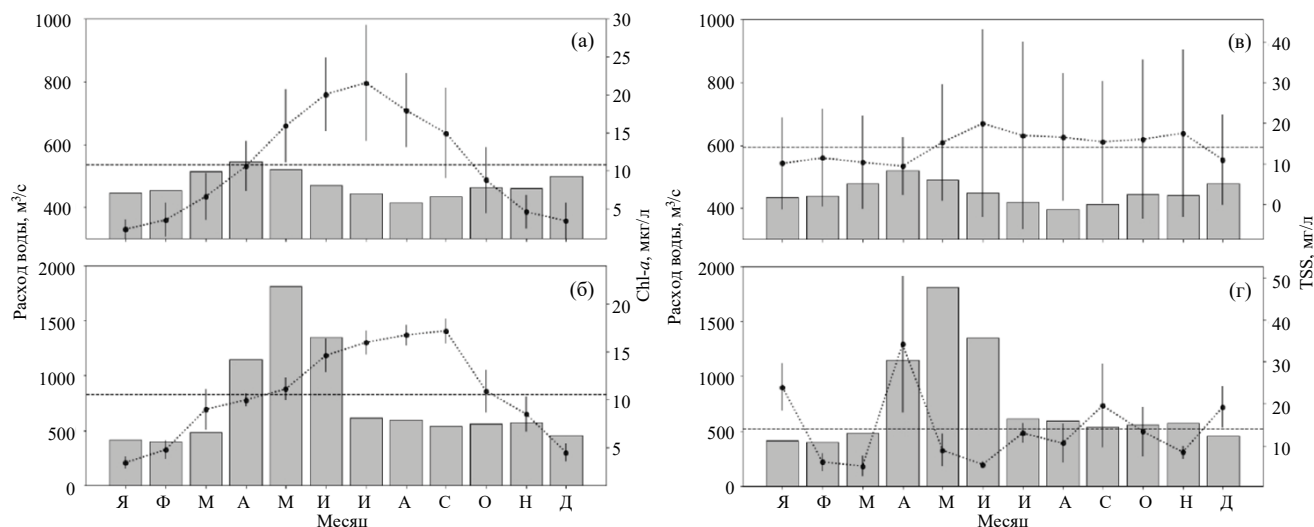


Рис. 5. Средние месячные величины расхода воды (столбцы) и средняя концентрация Chl-a (линия с маркерами) в р. Дон в маловодный период 2008–2019 гг., за исключением 2018 г. (а), и в 2018 г. с выраженным половодьем (б); средние месячные концентрации TSS (линия с маркерами) в р. Дон в маловодный период 2009–2020 гг., за исключением 2018 г. (в), и в 2018 г. с выраженным половодьем (г). Горизонтальной пунктирной линией показаны среднемноголетние концентрации Chl-a и TSS.

высокое содержание TSS в реке в первый месяц половодья (апрель) обусловлено поступлением взвесей в результате процессов плоскостного смыва тальными водами на местном водосборе. В последующие месяцы (май, июль) 2018 г. концентрация TSS в реке зависела в основном от объема попусков из Цимлянского водохранилища, где содержание взвесей меньше.

Концентрации TSS подвержены влиянию различных факторов и варьируют в широких пределах – от 2 до 50 мг/л – при одинаковых расходах воды (рис. 4в). Анализ данных демонстрирует существенную перестройку сезонного хода, обусловленную усилением регулирующего влияния Цимлянского водохранилища на сток р. Дон. Максимумы во внутригодовом распределении твердого стока в современный период приходятся на летнюю и зимнюю межень – 45 и 40% соответственно. На период половодья (апрель–май) приходится всего 15% годового стока наносов [21].

В работе [26] показано, что в отдельные маловодные годы объем взвешенного материала, приносимого со стороны моря, который потенциально мог оседать в дельте Дона, превышал годовой твердый сток.

Сопоставление полученных оценок с историческими данными

Первые работы, в которых сделаны количественные оценки содержания органического вещества в водах Дона, относятся к середине XX в. Нужно отметить, что за весь период инструментальных наблюдений выполнено сравнительно мало прямых определений органического вещества.

При сравнении полученных разными авторами величин DOM и DOC следует принимать во внимание использование разных методов лабораторных определений. При этом главной операцией по определению растворенного вещества в речной воде всегда была его минерализация различными способами. Больше всего данных получено с использованием методов перманганатной и бихроматной окисляемости, причем последний обеспечивает более полное окисление органического вещества, так как в этом случае окисляется еще и органическое вещество взвеси.

Б.А. Скопинцевым было эмпирически показано, что для речных вод значения перманганатной окисляемости (мгО/л) численно равно

содержанию углерода (мг/л) [36]. Однако позже эти оценки были уточнены, и для р. Дон среднегодовое значение $O_{\text{перм}}/O_{\text{орг}}$ было принято равным 0.88 [27].

Б.А. Скопинцев и Л.П. Крылова [37], используя поперманганатной окисляемости, вычислили величину выноса органических веществ р. Дон в период 1935–1936 гг. – 290 тыс. т/год.

По результатам шести определений за период 1949–1950 гг. [11], концентрации DOC менялись в интервале 5.7–15.6 мгС/л при среднем значении 10.9 мгС/л (применялся метод сжигания в плаве селитры), содержание углерода во взвеси менялось от 0.64 до 3.14 мгС/л (среднее – 1.77 мгС/л). Сток органических веществ Дона в этот период авторы оценили в 300–709 тыс. т/год. В весенних пробах паводковых вод из р. Дон (1952 г.) концентрация РОС составила в среднем 4 мгС/л, процентное содержание РОС в TSS – 2.6% [24].

В 1956–1957 гг. В.Г. Дацко и М.М. Гусейнов [13] систематически исследовали содержание органических веществ в водах Дона у ст. Аксайской (ныне г. Аксай) в течение года. Максимальные значения DOC фиксировали в пробах паводковых вод весной (14–48 мгС/л), в остальную часть года значения DOC менялись в интервале 5–9.9 мгС/л (среднее значение по результатам 16 определений, за исключением весенних проб, составило 7 ± 1.5 мгС/л). Сравнивая данные по перманганатной окисляемости и содержанию углерода в речных водах, полученные до зарегулирования стока Дона (1940–1941 гг.), с результатами определений (1950–1954 и 1956–1957 гг.), авторы пришли к выводу, что существенных изменений величин не произошло. Повышение окисляемости в период паводка авторы объясняли выносом талыми водами в реку органических веществ.

В 1958 г. В.Г. Дацко и В.Л. Васильева [12] показали, что концентрация DOC (полученная методом сжигания органического вещества в плаве селитры) менялась в пределах 5.2–19.1 мгС/л (среднее – 7.9 мгС/л), перманганатная окисляемость изменялась в пределах 3.3–24.8 мгС/л. Максимальное содержание углерода в речной воде (14.3–19.1 мгС/л) приходится на пик ран-

него паводка (февраль–март) и в 2–2.8 раза превышает концентрацию DOC в остальную часть года (среднегодовая концентрация углерода без учета паводка по результатам 16 определений – 6.8 ± 1.3 мгС/л).

В.Г. Дацко определил, что в 1956 г. с водами р. Дон в Азовское море поступило ~450 тыс. т органического вещества, а в 1958 г. – 370 тыс. т [12].

В работе [27] представлены наиболее полные многолетние данные по перманганатной окисляемости за длительный период (1936–1975 гг.), согласно которым сток органического вещества с р. Дон для периода 1936–1965 гг. составил 405.8 тыс. т/год, а для периода 1967–1975 гг. – 317.7 тыс. т/год при средних значениях DOC 9 и 9.3 мгС/л соответственно.

В работе [3] содержание DOC в устье Дона в 1980 г. оценено в среднем в 5.7 мгС/л при вариации от 4.7 до 6.5 мгС/л (применялся метод серно-хромового окисления с последующим кулонометрическим определением образовавшегося диоксида углерода), средняя концентрация РОС оценивалась в 1.7 мгС/л, а доля РОС от TSS – 5.6%. По данным [35], содержание РОС в составе TSS в воде Дона – 2.3%. В.Е. Артемьев [3] и В.С. Савенко [35] обращали внимание на неоднородность и большую изменчивость концентраций РОС на одном и том же участке русла р. Дон на протяжении всего нескольких километров.

По данным [30], в 1981–2000 гг. в Азовское море Доном транспортировалось 362–581 тыс. т органического вещества (рис. 6).

Современные оценки содержания органического углерода в р. Дон получены более совершенным методом высокотемпературного каталитического сжигания.

В работе [1] приведены средние концентрации DOC в устье Дона в июле и сентябре 2006 г.: 8.2 и 9.4 мгС/л соответственно при изменениях в пределах 8.1–9.7 мгС/л. РОС составлял в среднем 0.6 и 1.2 мгС/л, а доля РОС в составе TSS менялась в диапазоне 7–11%. Максимальный сток ОВ с водами р. Дон приходится на

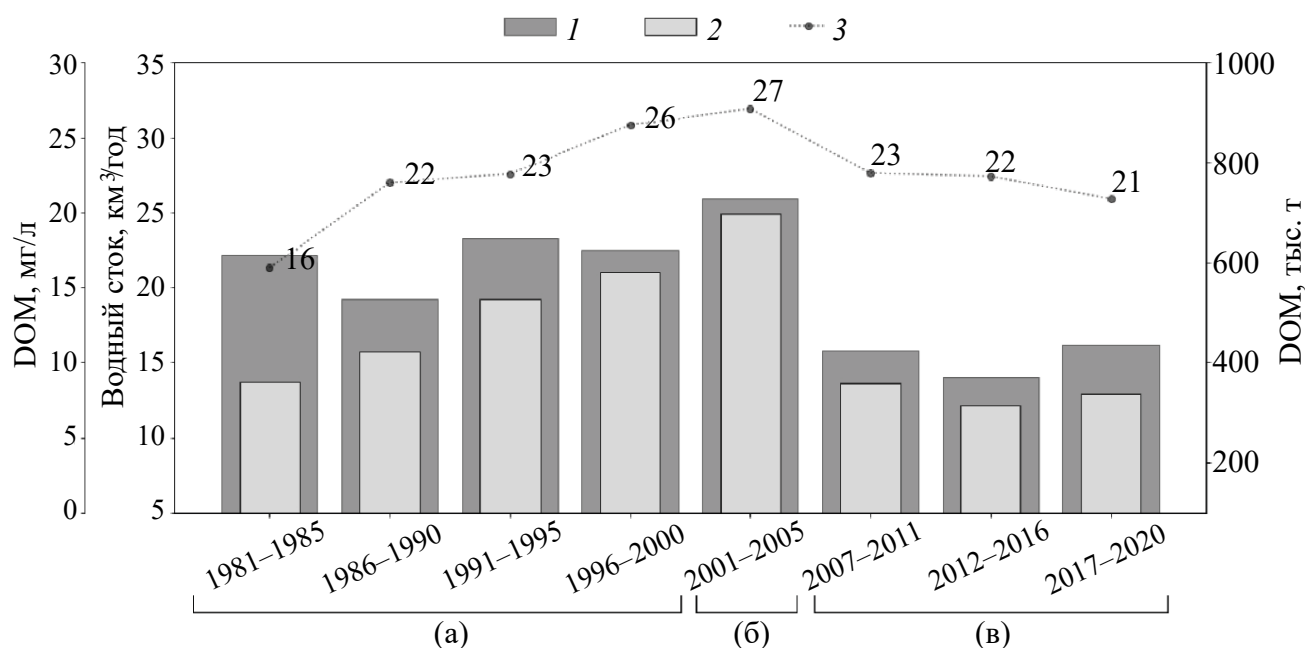


Рис. 6. Многолетний среднегодовой сток воды и растворенного органического вещества р. Дон (в нижнем течении) в период 1981–2020 гг. 1 – водный сток (км³/год), 2 – DOM (тыс. т), 3 – средняя концентрация DOM (мг/л) за период. а – по данным [30], б – по данным [18] для створа в районе г. Ростов-на-Дону, в – данные настоящего исследования.

период 2001–2006 гг. (по данным для гидропоста в районе г. Ростов-на-Дону) и составляет 697 тыс. т/год (рис. 6) при среднем значении DOC 13.5 мгС/л [18].

В маловодный период 2007–2020 гг. сток РОВ составил 337 тыс. т/год (рис. 6). Для сравнения, в предыдущий период маловодья (1972–1974 гг.) сток DOM был несколько больше – 416 тыс. т/год [17] и почти треть годового выноса органических веществ приходилась на период весенне-летнего половодья (например, в половодье в 1972 г. [17], годовой сток которого был рекордно низким (9.3 км³). В современный маловодный период значительных внутригодовых вариаций стока DOM не наблюдается.

По оценкам [38], концентрация РОС (2011–2015 гг.) менялась в диапазоне 0.05–3.72 мгС/л, а медиана всех измеренных значений составила 0.53 мгС/л. Среднее содержание РОС в общей взвеси составляло 4–5%. В данной работе удалось уточнить эту оценку для периода 2007–2020 гг., среднее содержание РОС находилось на уровне 0.7 ± 0.6 мгС/л.

ВЫВОДЫ

На основе данных экспедиционных исследований ЮНЦ РАН, выполненных в 2007–2020 гг. на нижнем Дону, с использованием современных методов статистического моделирования, позволивших заполнить пропуски в рядах наблюдаемых величин, получены новые количественные оценки стока растворенного органического углерода, хлорофилла-*a*, общего взвешенного вещества, взвешенного органического углерода с водами р. Дон в Азовское море.

В современный маловодный период (2007–2020 гг.) сток органических веществ нижнего Дона составил $357 (\pm 56)$ тыс. т/год, при этом в стоке доминирует растворенная форма (~95%). Сравнение полученной оценки с данными прошлых лет показало, что среднегодовые величины стока органического вещества мало менялись на протяжении всего периода инструментальных наблюдений. Повышенные его величины в 1980–2000-х гг. связаны с высокой антропогенной составляющей органического стока.

Сток РОМ находится в прямой зависимости от твердого стока, который радикально сократился во второй половине XX — начале XXI вв. (на 91% от величины в условно-естественный период), в его составе увеличилась доля мелко-дисперсных фракций взвеси. В последнее время можно наблюдать увеличение доли органики в составе TSS, что требует дополнительных исследований. Это обстоятельство приводит к тому, что абсолютная величина стока РОМ на протяжении XX в. и в современный период существенно не изменилась. Кроме того, при определении и расчете стока РОМ необходимо учитывать сезонность, так как органическое вещество во взвеси тесно коррелирует с жизненными циклами фитопланктона.

Отмечены изменения во внутригодовом распределении концентраций и стока органических веществ. Если в предыдущий маловодный период (1972–1975 гг.) до трети годового стока органического углерода происходило во время весеннего половодья, то в современный период внутригодовое распределение стока DOC относительно равномерно, при этом во время “высокой воды”, напротив, зафиксированы низкие концентрации DOC (половодье 2018 г.).

Значимых статистических зависимостей концентрации Chl-*a* от водности реки не обнаружено. Сделана оценка доли лабильного ОВ — при среднегодовом значении РОМ 1.4 ± 1.2 мг/л доля LROM может варьировать от 10 до 100% (среднее — 30%).

Авторы статьи выражают глубокую благодарность коллегам Кулыгину В.В., Клещенкову А.В. и Шевердяеву И.В. (ЮНЦ РАН) за ценные советы и помощь в оформлении графических изображений статьи, а также искреннюю признательность рецензенту и редколлегии за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агатова А.И., Аржанова Н.В., Лапина Н.М., Торгунова Н.И. Пространственно-временная изменчивость органического вещества Азовского моря // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 6. С. 703–714.
2. АИС ГМВО. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 10.10.2022)
3. Артемьев В.Е. Геохимия органического вещества в системе река—море. М.: Наука, 1993. 204 с.
4. Бердников С.В., Бухмин Д.А., Гуськов Г.Е., Григоренко К.С., Клещенков А.В., Московец А.Ю., Кренива К.В., Олейников Е.П., Рыбцова В.С., Савикин А.И., Саяпин В.В., Шевченко М.С., Степаньян О.В. Экспедиционная деятельность ЮНЦ РАН на НИС «Профессор Панов» и НИС «Денеб» в Азовском, Черном и Каспийском морях в 2020 году // Итоги экспедиционных исследований в 2020 году в Мировом океане и внутренних водах. Тез. докл. Всерос. науч. конф. / Под ред. Т.В. Дабизжа. Севастополь: Морской гидрофиз. ин-т РАН, 2021. С. 136–144.
5. Бердников С.В., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В. Новое состояние гидрологического режима Азовского моря в XXI веке // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 503. № 1. С. 65–70. <https://doi.org/10.31857/S2686739722030057>
6. Бердников С.В., Сорокина В.В., Поважный В.В., Ткаченко А.Н., Ткаченко О.В. Сезонная и пространственная динамика концентраций взвешенных веществ, биогенных элементов и тяжелых металлов в дельте Дона в 2012–2014 гг. // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод. Ростов-на-Дону: Гидрохим. ин-т, 2015. Т. 1. С. 141–145.
7. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментал. и приклад. климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79. <https://doi.org/10.21513/24108758.2021>
8. Герасюк В.С., Бердников С.В. Экспериментальная оценка скорости осаждения взвешенного вещества вод в устье Дона и Таганрогском заливе // Океанология. 2021. Т. 61. № 5. С. 780–790. <https://doi.org/10.31857/S0030157421040055>
9. Гидрохимический сток рек Европейской части России. Атлас / Под ред. Р.Г. Джамалова, О.С. Решетняк, М.М. Трофимчука. М.: ИВП РАН, 2020. 155 с.
10. ГОСТ 17.1.04.02.—90 Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. М.: Изд-во стандартов, 1990. 16 с.

11. Дацко В.Г. Органическое вещество в водах южных морей СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 271 с.
12. Дацко В.Г., Васильева В.Л. Ориентировочные величины привноса органических веществ р. Дон в Цимлянское водохранилище и их выноса из водохранилища // Гидрохимические материалы. М.: Изд-во АН СССР, 1961. Т. 33. С. 28–33.
13. Дацко В.Г., Гусейнов М.М. О содержании биогенных элементов и органического вещества в водах нижнего течения р. Дон по наблюдениям за 1956–1957 гг. // Гидрохимические материалы. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Т. 29. С. 54–67.
14. Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 205 с.
15. Джамалов Р.Г., Решетняк О.С., Галагур К.Г., Власов К.Г., Сафронова Т.И., Оботуров А.С. Гидрохимический сток рек Европейской части России // Недропользование XXI век. 2020. № 5 (88). С. 114–121.
16. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Рец Е.П., Сафронова Т.И., Бугров А.А., Телегина А.А., Телегина Е.А. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод европейской части России. М.: ГЕОС, 2015. 320 с.
17. Иванова А.А., Исаченко Б.Н., Каплин В.Т., Кузнецова Н.И., Вильдяева Л.А. Вынос растворенных веществ р.Дон в Азовское море // Гидрохимические материалы. М.: Изд-во АН СССР, 1975. Т. 7. С. 61–65.
18. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник / Гл. ред. А.М. Никанорова. Ростов-на-Дону: ГХИ, 2010. 571 с.
19. Киреева М.Б., Илич В.П., Гончаров А.В., Богачев А.Н., Фролова Н.Л., Пахомова О.М., Соловьева В.В. Влияние маловодья 2007–2015 гг. в бассейне р. Дон на состояние водных экосистем // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2018. № 5. С. 3–13.
20. Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколичина Н.Н., Суркова Г.В., Торпов П.А., Чернышев А.В., Чумаченко А.Н. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: Макс-Пресс, 2008. 292 с.
21. Клещенко А.В., Герасюк В.С., Кулыгин В.В., Бердников С.В. Взвешенное вещество вод от Цимлянского водохранилища до Таганрогского залива в период длительного маловодья 2006–2020 гг. // Наука Юга России. 2023. Т. 19. № 1. С. 29–39.
22. Косенко Ю.В. Основные аспекты баланса биогенных элементов в Азовском море // Вод. биоресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2. № 4. С. 24–37.
23. Косенко Ю.В., Баскакова Т.Е., Картамышева Т.Б. Роль стока реки Дон в формировании продуктивности Таганрогского залива // Вод. биоресурсы и среда обитания. 2018. Т. 1. № 3–4. С. 32–39.
24. Крылова Л.П., Скопинцев Б.А. Содержание органического углерода в водах рек и озер Подмоскovie и крупных рек Советского Союза // Гидрохим. материалы. 1959. Т. 28. С. 28–44.
25. Лихтанская Н.В., Бердников С.В. Использование программного комплекса EGRET для оценки потоков взвешенных веществ с речным стоком // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2022. Вып. 7. С. 32–37. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2022-1-7-32-37>
26. Лихтанская Н.В., Бердников С.В., Клещенко А.В. Твердый сток реки Дон и поступление взвеси в дельту при нагонах: статистическое моделирование и сопоставление в период маловодья // Rus. J. Earth Sci. 2023. Т. 23. ES4010. <https://doi.org/10.2205/2023es000856>
27. Мальцева А.В., Тарасов М.Н., Смирнов М.П. Сток органических веществ с территории СССР // Гидрохим. материалы. 1987. Т. 102. С. 76–97.
28. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. Динамический режим Азовского моря в условиях осолонения // ДАН. 2020. Т. 492. № 1. С. 107–11.
29. Матишов Г.Г., Клещенко А.В., Григоренко К.С., Московец А.Ю., Кириллова Е.Э. Изменение водного баланса в бассейне Нижнего Дона в условиях маловодья // Наука юга России. 2018. Т. 14. № 3. С. 45–55.
30. Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Косменко Л.С., Кондакова М.Ю., Решетняк О.С. Антропогенная нагрузка на устьевую область р. Дон в современных условиях техногенного воздействия // Вода: химия и экология. 2011. № 1. С. 4–10.
31. Никаноров А.М., Смирнов М.П., Клименко О.А. Многолетние тенденции общего и антропогенного выноса органических и биогенных веществ реками России в Балтийское, Черное, Азовское, Каспийское моря и в озеро Байкал // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 2. С. 209–217.
32. ПНД Ф 14.1:2.110–97 Методика выполнения измерений содержания взвешенных веществ и общего содержания примесей в пробах природных и очищенных сточных вод гравиметрическим методом. 1997. 12 с.

33. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 7. Донской район / Под ред. М.С. Протасьева. Л.: Гидрометиздат, 1973. 460 с
34. Решетняк О. С. Многолетняя изменчивость химического состава и качества воды в бассейне реки Дон // Грозненский естественнонауч. бюлл. 2023. Т. 8. № 1. С. 52–60.
35. Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: ГЕОС, 2006. 175 с.
36. Скопинцев Б.А. Органическое вещество в природных водах (водный гумус). Л.: Гидрометеоздат, 1950. 290 с.
37. Скопинцев Б.А., Крылова Л.П. Вынос органического вещества крупнейшими реками СССР // ДАН СССР. 1955. Т. 105. № 4. С. 770–773.
38. Сорокина В.В., Бердников С.В. Биогенная нагрузка Дона и Кубани на экосистему Азовского моря // Вод. ресурсы. 2018. Т. 45. № 6. С. 670–684. <https://doi.org/10.1134/S0321059618060147>
39. Сорокина В.В., Герасюк В.С. Вариации гидрохимических показателей в водном континууме Нижний Дон – Черное море // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2018. Т. 1. № 3. С. 251–257. <https://doi.org/10.23885/2500-395x-2018-1-3-251-257>
40. Сорокина В.В., Герасюк В.С., Сойер В.Г. Пространственная и временная изменчивость органического углерода в водах Нижнего Дона и Таганрогского залива в 2006–2018 гг. // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2019. Т. 1. № 4. С. 116–120. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2019-1-4-116-120>
41. Турега О.Н. Экологические обстановки Днестровского лимана и одноименного взморья // Уч. зап. Таврического нац. ун-та. Сер. География. 2010. Т. 23. № 1. С. 91–96.
42. EGRET, User Guide to Exploration and Graphics for RivEr Trends (EGRET). <https://pubs.usgs.gov/tm/04/a10/pdf/tm4A10.pdf> (дата обращения: 10.10.2022)
43. GRDS, Global Runoff Data Centre (Глобальный центр данных о речных стоках). https://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepage_node.html (дата обращения: 10.10.2022)
44. Groth S., Fichtner F., Wieland M., Mandery N., Shankar S., Martinis S., Riedlinger T. Mapping changes in surface-water extent during the 2022 hydrological drought in Germany using Sentinel-2 data // EGU General Assembly 2023. Vienna, Austria, 24–28 April 2023. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-9541>
45. Hirsch R.M., Douglas L. Moyer, Stacey A. Archfield. Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season (WRTDS), With an Application to Chesapeake Bay River Inputs // J. Am. Water Resour. Association (JAWRA). 2010. V. 46. P. 857–880. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00482.x>
46. Laaha G., Gauster T., Tallaksen L.M., Vidal J.-P., Stahl K., Prudhomme C., Heudorfer B., Vlnas R., Ionita M., Van Lanen H.A.J., Adler M.-J., Caillouet L., Delus C., Fendekova M., Gailliez S., Hannaford J., Kingston D., Van Loon A.F., Mediero L., Osuch M., Romanowicz R., Sauquet E., Stagge J.H., Wong W.K. The European 2015 drought from a hydrological perspective // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2017. V. 21. P. 3001–3024. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3001-2017>
47. Lee C.J., Hirsch R.M., Crawford C.G. An evaluation of methods for computing annual water-quality loads: U.S // Geol. Survey Sci. Investigations Rep. 2019. 59 p. <https://doi.org/10.3133/sir20195084>
48. Lee C.J., Hirsch R.M., Schwarz G.E., Holtschlag D.J., Preston S.D., Crawford C.G., Vecchia A.V. An evaluation of methods for estimating decadal stream loads // J. Hydrol. 2016. V. 542. P. 185–203.
49. Lychagina Y.M., Berdnikov S.V., Gerasyuk V.S. Development of online version of the guidebook “Organic matter of the Azov sea and of the adjacent areas of the Black sea” // Indicators of climatic changes in marine ecosystems. Collection of articles of the IV Int. Conf. GeoiD’2016. Southern Scientific Centre of the Russian Acad. Sci. 2016. P. 28–35.
50. Muñoz S.E., Dee S.G., Luo X., Haider M.R., O'Donnell M., Parazin B., Remo J.W. Mississippi River low-flows: context, causes, and future projections // Environ. Res. Climate. 2023. V. 2. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/acd8e3>
51. Plyaka P., Glushchenko G., Gerasyuk V., Kleshchenkov A., Grigorenko K., Shevchenko M., Yurasov Y., Valov G., Tron I., Popovyan G., Berdnikov S. Investigation on the chlorophyll-a content of phytoplankton in the sea of Azov and the Don river by the fluorescence method // Fluorescence Methods for Investigation of Living Cells and Microorganisms IntechOpen. / Ed. N. Grigoryeva. 2020. P. 139–152.
52. Van Lanen H., Laaha G., Kingston D., Gauster T., Ionita M., Vidal J.-P., Vlnas R., Tallaksen L., Stahl K,

- Hannaford J., Delus C., Fendekova M., Mediero L., Prudhomme C., Rets E., Romanowicz R., Gailliez S., Wong W.K., Adler M.-J., Blauhut V., Caillouet L., Chelcea S., Frolova N., Gudmundsson L., Hanel M., Haslinger K., Kireeva M., Osuch M., Sauquet E., Stagge J.H., Van Loon A.* Hydrology needed to manage droughts: the 2015 European case // *Hydrol. Process.* 2016. V. 30. P. 3097–3104. <https://doi.org/10.1002/hyp.10838>
53. *Zhang Q., Hirsch R.M.* River water-quality concentration and flux estimation can be improved by accounting for serial correlation through an autoregressive model // *Water Resour. Res.* 2019. V. 55. № 11. P. 9705–9723. <https://doi.org/10.1029/2019WR025338>

Organic matter runoff from the Don River into the Sea of Azov in the low water period 2007–2020

V. S. Gerasyuk*, N. V. Likhtanskaya, V. V. Sorokina, S. V. Berdnikov

SSC RAS, Rostov-on-Don, 344006 Russia

**e-mail: gerasyuk.v@mail.ru*

Based on data from expeditionary studies of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, using statistical modeling, new quantitative estimates of the runoff of dissolved organic carbon, chlorophyll-a, total suspended solids, particulate organic carbon with the waters of the Don River into the Sea of Azov during the low water period 2007–2020 were obtained. Statistical models were constructed using Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season (WRTDS), which provides some of the most accurate quantitative estimates of concentrations and fluxes to date. Seasonal and interannual features of the relevant substances' concentrations in the river are considered, and their relationship with water discharges is shown. A comparison was made of the runoff of organic matter and suspended solids of the Don in the modern low water period and other periods of the 20th century.

Keywords: organic matter runoff, solid runoff, temporal variability, the Don River, low water period.