

УДК 551.464
DOI: 10.7868/25000640230104

ВЗВЕШЕННОЕ ВЕЩЕСТВО ВОД ОТ ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ДО ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА В ПЕРИОД ДЛИТЕЛЬНОГО МАЛОВОДЬЯ 2006–2020 гг.

© 2023 г. А.В. Клещенко¹, В.С. Герасюк¹, В.В. Кулыгин¹, С.В. Бердников¹

Аннотация. Приведены результаты анализа массива многолетних натуральных наблюдений и дана оценка содержания взвешенного вещества в водном континууме Цимлянское водохранилище – Нижний Дон – дельта Дона – Таганрогский залив в период длительного маловодья 2006–2020 гг.

По материалам экспедиций с 2006 по 2020 г. выполнена оценка пространственного распределения концентрации общего взвешенного вещества по районам совместно с сопутствующими параметрами, представляющими органическую компоненту природных вод, такими как содержание растворенного органического углерода, взвешенного органического углерода и хлорофилла *a*. Дана оценка межгодовому и сезонному изменению взвешенного вещества, рассмотрены соотношения между содержанием взвешенного вещества и взвешенными органическими компонентами вод. Определены характерные значения концентраций взвеси и ее гранулометрического состава для целей гидродинамического моделирования динамики взвеси в устьевой области Дона.

Концентрации взвешенного вещества изменяются по районам водного континуума и в целом увеличиваются при движении от Цимлянского водохранилища к Таганрогскому заливу Азовского моря. Годовой ход содержания взвешенного вещества обусловлен влиянием гидродинамики и активным цветением микроводорослей.

Результаты анализа многолетних данных гранулометрического состава взвешенных наносов в весенне-летний период на гидропосту в станице Раздорской свидетельствуют о значительной изменчивости состава взвеси, которая проявляется преимущественно в изменении соотношения мелкодисперсных фракций – пелита и алеврита. Приведены сведения, показывающие, что гранулометрический состав взвеси подвержен влиянию ветрового взмучивания и росту сдвиговых напряжений в условиях формирования значительных уклонов водной поверхности. Для руслового участка реки до вершины дельты характерно преобладание алевритовой фракции. Взвесь, наблюдающаяся в период штормов, преимущественно состоит из пелита.

Ключевые слова: взвешенное вещество, водный континуум, зона смешения, гранулометрический состав, маловодный период.

SUSPENDED MATTER OF THE WATER FROM THE TSIMLYANSK RESERVOIR TO THE TAGANROG BAY IN THE PERIOD OF LONG LOW WATER IN 2006–2020

A.V. Kleshchenkov¹, V.S. Gerasyuk¹, V.V. Kulygin¹, S.V. Berdnikov¹

Abstract. The paper presents the results of an analysis of an array of long-term field observations and an estimate of the content of suspended matter in the water continuum Tsimlyansk Reservoir – Lower Don – Don Delta – Taganrog Bay during the period of prolonged low water in 2006–2020.

Based on materials from expeditions from 2006 to 2020 the nature of the spatial distribution of the concentration of total suspended matter in areas, together with related parameters representing the organic

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: geo@ssc-ras.ru

component of natural waters, such as the content of dissolved organic carbon, suspended organic carbon and chlorophyll *a* was evaluated. An estimate of interannual and seasonal changes in suspended matter is given. The characteristic values of suspended matter concentrations and particle size distribution were determined for the purposes of hydrodynamic modeling of suspended matter dynamics in the mouth area of the Don River.

It is shown that the concentration of suspended matter varies across the regions of the water continuum and generally increases when moving from the Tsimlyansk reservoir to the Taganrog Bay of the Sea of Azov. A similar spatial course has the concentration of chlorophyll *a* and suspended organic matter in water. The annual variation of the content of suspended matter is due to the influence of hydrodynamics and active blooming of microalgae.

Analysis of long-term data on the granulometric composition of suspended sediments in the spring-summer period at the gauging station in Razdorskaya village indicates a significant variability in the composition of suspension, which manifests itself mainly in a change in the ratio of fine fractions – pelite and silt. The paper provides information indicating that the granulometric composition of the suspension is subject to the influence of wind turbulence and the growth of shear stresses in the conditions of the formation of significant slopes of the water surface. The channel section of the river up to the delta head is characterized by the predominance of the silty fraction. Suspension observed during storms mainly consists of pelite.

Keywords: suspended matter, water continuum, mixing zone, particle size, dry period.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение твердого стока р. Дон, поступающего в устьевую область, служит фундаментальной основой для понимания глобальных биогеохимических циклов и имеет практическую значимость в части управления качеством окружающей среды. Гидротехнические мероприятия по преобразованию водной системы Нижнего Дона и, прежде всего, введение в эксплуатацию в 1952 г. Цимлянского водохранилища значительно изменили не только величину, но и закономерности внутригодового распределения твердого стока. Поступление терригенного материала в море сократилось в 2–2,5 раза, внутригодовое распределение по сезонам стало более равномерным, увеличилась доля мелкодисперсных частиц [1]. В структуре баланса терригенного осадконакопления в замыкающем водоеме – Азовском море – произошли значительные изменения: уменьшился вклад рек и эолового фактора (в виде пыльных бурь) и увеличился вклад абразии [2]. В то же время ретроспективный анализ многолетней изменчивости содержания взвешенных веществ и прозрачности вод Азовского моря, данные экспедиционных наблюдений за последние 20 лет и анализ спутниковых снимков выявили ряд противоречивых тенденций: ожидаемого снижения концентрации взвеси не наблюдается, прозрачность вод уменьшается [3; 4].

В условиях маловодья и изменения климата граница взаимодействия речных и морских вод все чаще смещается вглубь дельты [5], а во время сгонно-нагонных явлений мигрирует в противополо-

ложных направлениях, в связи с чем необходима оценка состояния взвешенного вещества в барьерной зоне дельты Дона и Таганрогского залива. Требуется детально изучить сезонный ход взвешенного вещества, его межгодовые различия, а также содержание взвеси относительно пространственного положения зон с различными условиями седиментации в зависимости от гидролого-морфологических условий (ширины и рельефа дна рукавов и предустьевого взморья, интенсивности и частоты повторяемости сгонно-нагонных явлений, скоростей направлений течений на отдельных участках водного континуума и т.д.).

С 2006 г. Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН) ежегодно проводит экспедиционные исследования на участке Цимлянское водохранилище – Нижний Дон – дельта Дона – Таганрогский залив Азовского моря, что позволило накопить базу данных для изучения закономерностей и особенностей динамики взвешенного вещества (и связанных с ним химических соединений) в период длительного маловодья (2006–2020 гг.). Исключением стал 2018 г., близкий по объему стока к среднемноголетним значениям, а не к маловодным годам.

Целью настоящей работы является анализ массива многолетних натурных наблюдений и оценка содержания взвешенного вещества водного континуума Цимлянское водохранилище – Нижний Дон – дельта Дона – Таганрогский залив в рассматриваемый период как в пространственном, так и во временном отношении с учетом гидрохимических параметров, которые могут оказывать влия-

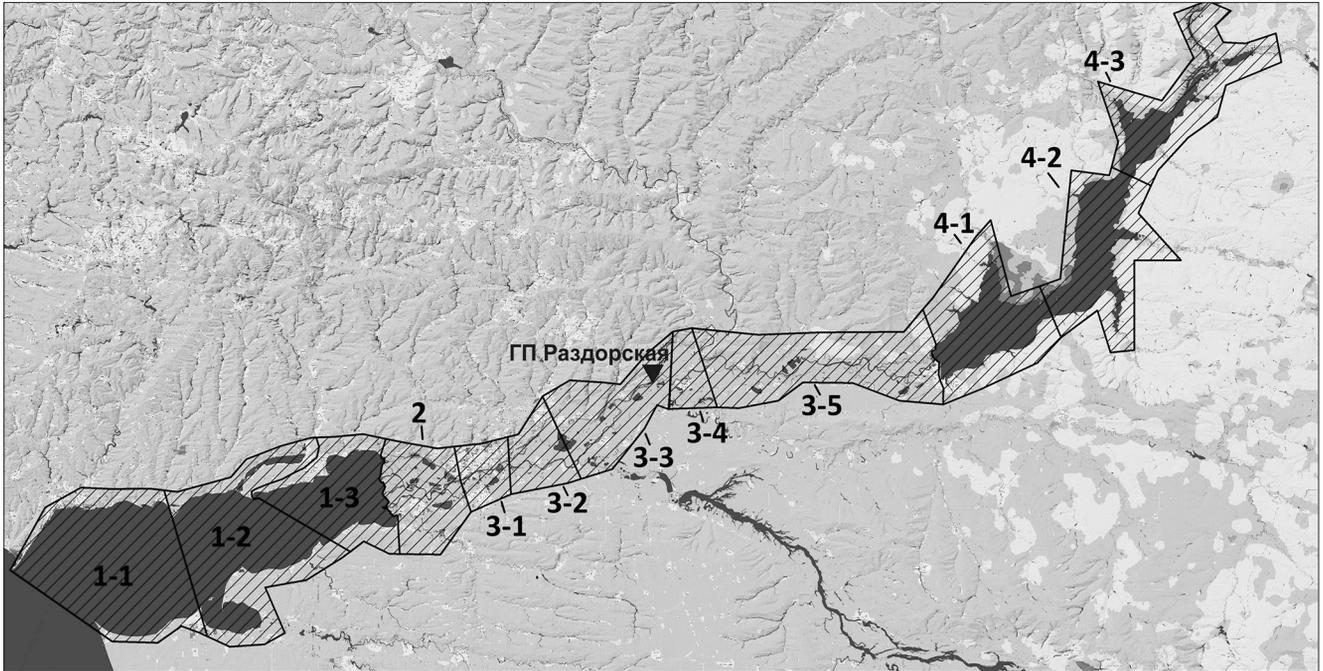


Рис. 1. Карта-схема деления объекта исследования на районы: район 1 – Таганрогский залив: 1-1 – западная часть, 1-2 – центральная часть, 1-3 – восточная часть; район 2 – дельта р. Дон; район 3 – Нижний Дон: 3-1 – от устья р. Аксай до вершины дельты Дона, 3-2 – между устьем р. Маныч и устьем р. Аксай, 3-3 – между устьем р. Сал и устьем р. Маныч, 3-4 – между устьем р. Северский Донец и устьем р. Сал, 3-5 – ниже Цимлянского водохранилища до устья р. Северский Донец; район 4 – Цимлянское водохранилище: 4-1 – приплотинный участок, 4-2 – центральный участок, 4-3 – верхний (Чирский) участок.

Fig. 1. Zones of the studied water continuum: zone 1 – Taganrog Bay: 1-1 – western part, 1-2 – central part, 1-3 – eastern part; zone 2 – the Don River delta; zone 3 – Lower Don: 3-1 – from the mouth of the Aksay River to the top of the Don River delta, 3-2 – between the mouth of the Manych River and the mouth of the Aksay River, 3-3 – between the mouth of the Sal River and the mouth of the Manych River, 3-4 – between the mouth of the Severskiy Donets River and the mouth of the Sal River, 3-5 – below the Tsimlyansk Reservoir to the mouth of the Severskiy Donets River; zone 4 – Tsimlyansk Reservoir: 4-1 – dam area, 4-2 – central area, 4-3 – upper (Chir) area.

ние на концентрацию взвеси в воде (хлорофилл *a*, органическое вещество). В задачу входит описание гранулометрического состава взвеси на различных участках и в конечном итоге определение тех характерных значений концентраций взвеси и гранулометрического состава, которые могут в дальнейшем быть использованы для целей гидродинамического моделирования динамики взвеси в устьевой области.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является водный континуум от Цимлянского водохранилища до Таганрогского залива, разделенный на четыре основных района: Таганрогский залив, дельта Дона, Нижний Дон, Цимлянское водохранилище (рис. 1). Для более детального анализа каждый район разделен на

Таблица 1. Объем выполненных определений по каждому району исследованного водного континуума
Table 1. Volume of performed determinations for each zone of the studied water continuum

Параметр Parameter	Район Zone											
	1-1	1-2	1-3	2	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3
TSS, мг/л / mg/l	95	130	242	149	14	7	23	6	15	55	1	12
POC, мг/л / mg/l	26	32	56	51	3	–	–	–	–	–	–	–
DOC, мг/л / mg/l	54	79	159	119	39	6	21	7	17	35	4	11
Chl-A, мкг/л / µg/l	112	198	225	121	7	4	12	6	10	33	4	4

Примечание. TSS – общее взвешенное вещество в воде; POC – взвешенное органическое вещество в воде; DOC – растворенное органическое вещество в воде; Chl-A – содержание хлорофилла *a* в воде.
Note. TSS – total suspended solids in water; POC – suspended organic matter in water; DOC – dissolved organic matter in water; Chl-A – content of chlorophyll *a* in water.

Таблица 2. Внутригодовая изменчивость общего взвешенного вещества по районам исследованного водного континуума
Table 2. Intra-annual variability of total suspended matter in each zone of the studied water continuum

Район Zone	Период Period	Месяц Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1-1	2006–2020	–	–	–	35±28 3–70 (5)	14±4 9–22 (7)	27±16 15–64 (11)	17±10 6–45 (14)	22±9 14–31 (3)	19±10 7–36 (9)	18±6 6–28 (13)	–	–
	2018	–	–	–	–	46±16 33–104 (27)	33±16 10–53 (11)	–	–	–	–	58±40 13–125 (8)	–
1-2	2006–2020	–	–	15±4 7–24 (10)	24±23 5–80 (19)	18±5 10–24 (8)	28±15 19–79 (15)	24±8 16–50 (17)	33±20 11–50 (3)	23±11 10–53 (19)	22±5 14–27 (5)	25±2 24–28 (3)	80±19 64–100 (3)
	2018	–	–	–	–	112±32 81–145 (3)	40±7 30–48 (8)	–	–	–	–	101±42 48–179 (10)	–
1-3	2006–2020	–	–	13±8 4–35 (26)	33±17 15–91 (24)	21±17 3–57 (19)	21±8 10–52 (27)	59±111 3–555 (26)	40±31 1–103 (35)	31±20 19–120 (29)	17±4 12–20 (3)	43±19 13–95 (31)	50±28 19–86 (4)
	2018	–	–	–	35±10 18–47 (9)	–	–	68±40 21–171 (16)	37±21 2–81 (26)	–	32±5 24–39 (7)	195±100 105–299 (4)	–
2	2006–2020	13±19 3–65 (10)	5±2 3–8 (5)	8±5 3–20 (14)	23±8 11–41 (13)	26±12 16–51 (15)	27±14 14–49 (5)	28±11 6–48 (28)	29±10 15–48 (15)	25±13 1–51 (29)	31±14 12–67 (22)	23±18 4–69 (34)	–
	2018	–	–	–	30±9 25–46 (5)	–	–	–	–	–	12±4 7–20 (6)	–	–
3-1	2006–2020	–	–	–	19±14 9–41 (5)	–	–	–	–	19±10 7–26 (3)	30±13 16–43 (3)	35±29 2–68 (4)	–
3-2	2006–2020	–	–	–	13±3 12–16 (3)	–	–	–	–	39±41 14–87 (3)	–	53±38 2–108 (5)	–
	2018	–	–	–	–	–	–	–	–	–	8±3 5–10 (3)	–	–
3-3	2006–2020	–	–	–	13±4 8–18 (9)	–	–	27±13 18–46 (4)	–	8±5 3–16 (9)	17±5 11–26 (9)	5±3 2–8 (10)	–
	2018	–	–	–	22±9 9–27 (4)	–	–	–	–	–	5±2 3–10 (8)	–	–
3-4	2006–2020	–	–	–	9±2 7–12 (4)	–	–	18±8 11–26 (3)	–	5±2 2–8 (4)	36±45 7–88 (3)	–	–
3-5	2006–2020	–	–	–	–	–	–	10±3 5–13 (4)	–	5±2 2–11 (10)	10±8 4–29 (11)	5±3 2–12 (9)	–
	2018	–	–	–	–	–	–	–	–	6±3 3–9 (4)	8±13 1–43 (9)	–	–

Окончание табл. 2

Район Zone	Период Period	Месяц Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4-1	2006–2020	–	–	–	–	10±16 0–61 (19)	–	–	12±9 2–38 (24)	7±7 1–24 (11)	–	11±15 2–76 (25)	–
	2018	–	–	–	–	4±3 1–11 (22)	–	–	–	18±36 2–136 (23)	25±28 3–79 (7)	–	–
4-2	2018	–	–	–	–	–	–	–	–	–	13±3 10–16 (4)	–	–
4-3	2006–2020	–	–	–	–	21±10 12–35 (4)	–	–	12±1 11–13 (3)	–	–	–	–
	2018	–	–	–	–	11±6 6–19 (4)	–	–	–	–	24±6 13–28 (5)	–	–

Примечание. Верхняя строка – средние значения ± стандартное отклонение, средняя строка – минимум и максимум, в скобках – количество определений.

Note. Top line – mean values ± standard deviation, middle line – minimum and maximum values, in brackets – the number of determinations.

подрайоны. В пределах Таганрогского залива выделены западная, центральная и восточная части согласно классификации районов, принятой в работе [6], в Цимлянском водохранилище – приплотинный, центральный и верхний участки [7], а Нижний Дон разделен на подрайоны по устьям основных впадающих притоков.

Отбор проб осуществлялся во время экспедиций на научно-исследовательских судах «Профессор Панов» и «Денеб» [8; 9], а также с использованием маломерного флота во время наземных экспедиций. Для гидрохимических исследований образцы воды отбирали в соответствии с требованиями «Наставления...» [10] батометром из поверхностного, придонного и промежуточных горизонтов.

В настоящей работе представлены результаты только для поверхностного слоя (до 0,5 м). Концентрацию общего взвешенного вещества в воде определяли гравиметрическим методом [11], содержание органического вещества во взвеси анализировали по методу Тюрина в модификации ЦИНАО [12], хлорофилл *a* определяли спектрофотометрическим методом по ГОСТу [13], определение растворенного органического вещества выполняли методом высокотемпературного сжигания (800 °С) в атмосфере чистого кислорода и с применением катализатора – оксида церия. Образующийся диоксид углерода определяли методом оптико-акустической

регистрации в ИК-области с помощью прибора multi-N/C 3100 (Германия). Результат измерений растворенного органического вещества выражали по общепринятому химическому параметру – органическому углероду.

Отбор проб донных отложений в Таганрогском заливе проводили дночерпателем Петерсена, пробы для определения гранулометрического состава грунта отбирали из поверхностного горизонта. Сбор осадочного материала в дельте Дона выполняли путем установки и экспозиции в придонном горизонте в период с октября 2020 по январь 2021 г. цилиндрической седиментационной ловушки диаметром 110 мм и высотой 568 мм, отношение высоты к диаметру 5,2. Данные о гранулометрическом составе взвешенного вещества были предоставлены Северо-Кавказским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и получены в результате обработки проб взвеси, отобранных в рейсах ЮНЦ РАН, на анализаторе частиц «ЛАСКА». Измерения проводили на базе междисциплинарной аналитической лаборатории ЮНЦ РАН.

Наибольшее количество данных имеется для дельты Дона и восточной части Таганрогского залива (табл. 1), где в условиях нестационарного гидродинамического режима происходит взаимодействие морских и речных вод с существенной биогеохимической трансформацией речного стока.

Всего в базу данных включено 5280 станций, в том числе 749 определений общего взвешенного вещества в воде (TSS), 168 – взвешенного органического вещества в воде (POC), 551 – растворенного органического вещества в воде (DOC) и 736 – хлорофилла *a* в воде (Chl-A). Единообразие методов определения параметров и неизменность приборной базы позволяет минимизировать погрешности в определении, связанные с использованием разных измерительных приборов и методов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сезонная изменчивость. Для понимания внутригодового хода концентрации TSS для всех рассматриваемых регионов недостаточно собранных данных, наиболее представлены три подрайона Таганрогского залива и дельта Дона (табл. 2).

Начало года (январь, февраль) характеризуется низкими значениями концентрации TSS. Небольшое повышение зарегистрировано в весеннее время и в августе, последнее может быть связано с активным цветением микроцистиса. Высокие концентрации TSS в осенне-зимний период могут быть обусловлены сильными ветрами и, как следствие, перемешиванием водных масс.

Обращают на себя внимание выделяющиеся из общей массы данных повышенные концентрации взвешенного вещества в 2018 г., что связано с высоким половодьем в череде маловодных лет. Интересно, что в этом году было отмечено два пика: весной и в начале лета (май – июнь) и осенью (ноябрь), при этом максимальный расход воды, регистрируемый на гидропосту в станции Раздорской, был зафиксирован только в мае. Большие значения TSS в ноябре 2018 г. обусловлены штормовыми ветрами (20–23 м/с) в этот период. Ситуация, когда взмучивание донных отложений при повышенной ветровой активности в осенне-зимний период может быть основным источником взвеси, является нередкой [14].

Межгодовая изменчивость. Межгодовое распределение концентрации TSS не имеет четкой закономерности, однако для западной и центральной частей Таганрогского залива максимальные медианные значения были отмечены в 2018 г. (рис. 2). Не обнаружено какой-либо связи между величиной твердого стока, измеренного на гидропосту в станции Раздорской, и концентрациями TSS.

Анализ многолетних данных гранулометрического состава (ГМС) взвешенных наносов в весенне-летний период на гидропосту в станции Раздор-

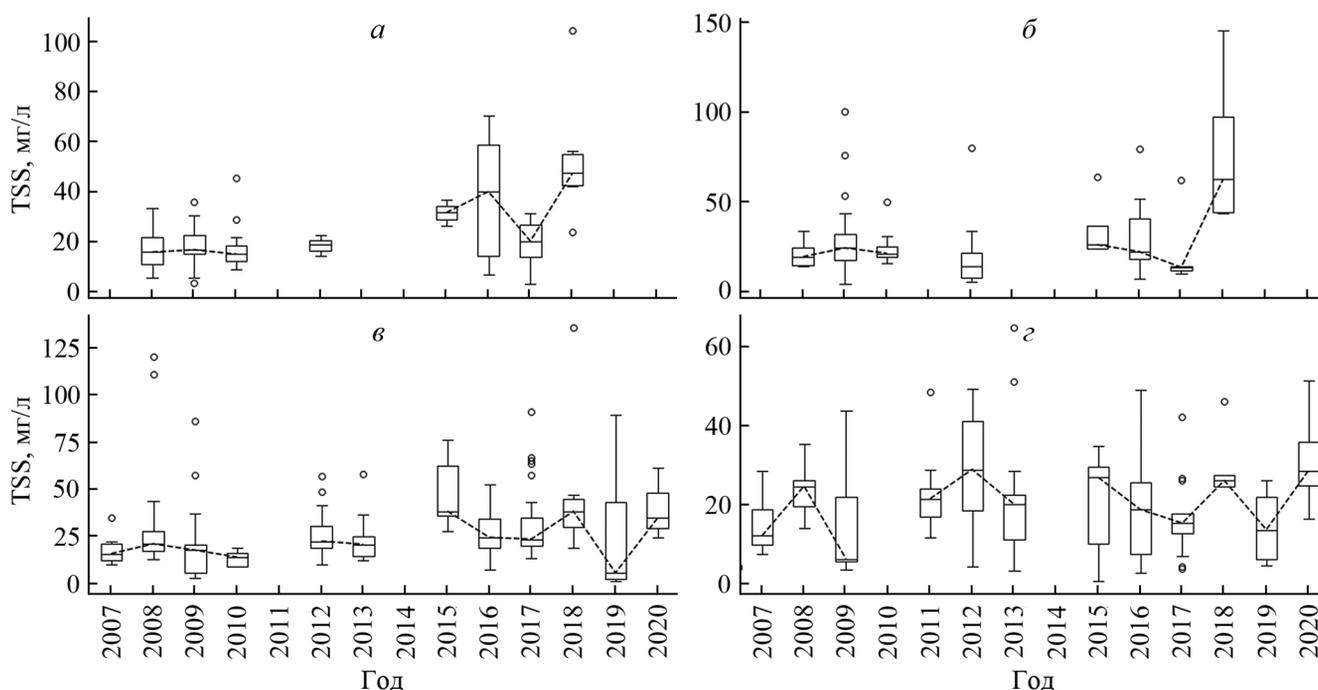


Рис. 2. Межгодовая изменчивость взвешенного вещества для западной (*a*), центральной (*б*), восточной (*в*) части Таганрогского залива и дельты Дона (*г*).

Fig. 2. Interannual variability of suspended matter for the western (*a*), central (*б*), eastern (*в*) part of the Taganrog Bay and the Don River delta (*г*).

ской [15] свидетельствует о значительной изменчивости состава взвеси по годам (рис. 3), что проявляется преимущественно в изменении соотношения мелкодисперсных фракций – пелита и алеврита. При этом стоит отметить, что ГМС практически не зависит от расходов воды, за исключением 2018 г., когда при расходе 1930 м³/с было четко выражено превалирование алевритовой фракции над остальными и рост песчаной фракции по сравнению с предшествующими годами. В остальные годы рассматриваемого ряда взаимосвязь между расходами воды и соотношением фракций не прослеживается. Также обращает на себя внимание рост доли песчаной фракции с 2010 по 2020 г., никак не связанный с межгодовым изменением расходов воды в период половодья. В целом же за маловодный период 2007–2020 гг. модальные значения содержания различных фракций таковы: пелит – 66,8 %, алеврит – 47,4 %, песок – 0,8 %; средние: пелит – 45,8 %, алеврит – 49,7 %, песок – 4,5 %.

Сопоставляя гранулометрический состав донных отложений Таганрогского залива около с. Маргаритово (Азовский район), взвеси в воде, отобранной в восточной части Таганрогского залива во время сильного шторма в июле 2018 г. и в мелководной северной, кутовой части залива в сентябре

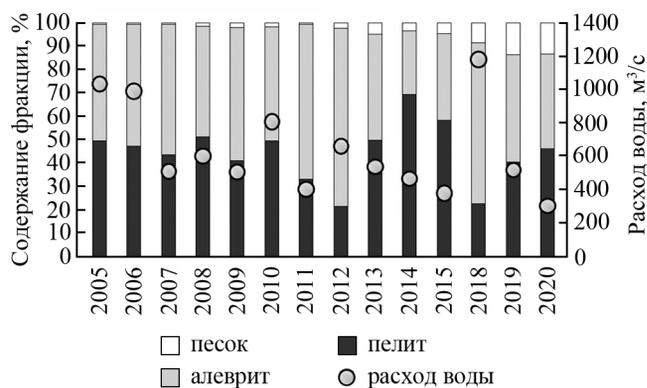


Рис. 3. Межгодовая изменчивость гранулометрического состава взвеси на гидропосту в станции Раздорской в 2005–2020 гг. Приведены усредненные данные по расходам воды, соответствующие датам отбора проб на гранулометрический анализ, выполняемого в течение весеннего периода каждого года.

Fig. 3. Interannual variability of particle size distribution of particulate matter at the hydropost in Razdorskaya village in 2005–2020. The averaged data on water consumption are given corresponding to the dates of sampling for granulometric analysis, performed during the spring period of each year.

2020 г., а также осадочного материала, накопленного в седиментационной ловушке, установленной в х. Донском (Азовский район) в период с 23.10.2020 по 21.01.2021 г., можно отметить их значительную схожесть (коэффициент корреляции выше 0,98) (рис. 4).

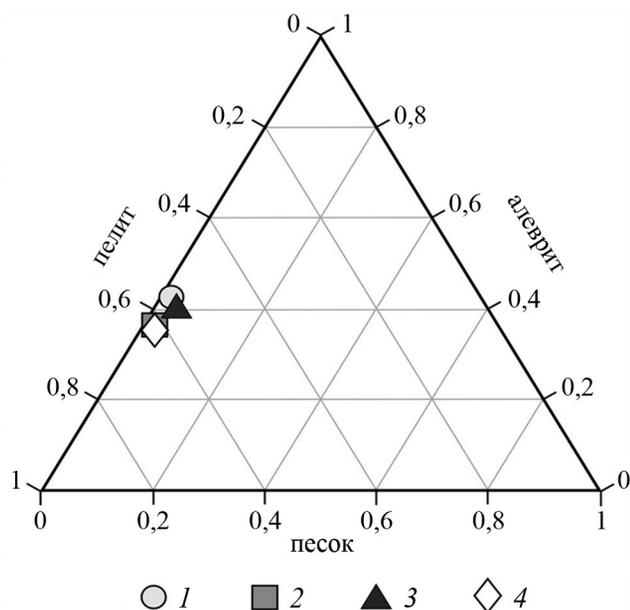


Рис. 4. Гранулометрический состав донных отложений Таганрогского залива, взвеси Таганрогского залива и осадка седиментационной ловушки из дельты Дона. 1 – взвесь в шторм (станция 12), 2 – взвесь в воде кутовой части в условиях взмучивания (станция 5), 3 – поверхностный слой донных осадков около с. Маргаритово, 4 – осадок в седиментационной ловушке (х. Донской).



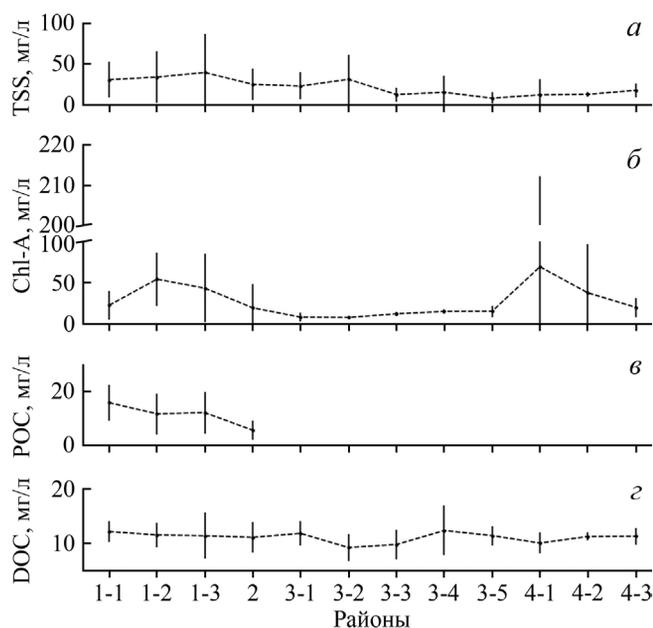


Рис. 5. Медианное распределение TSS (а), Chl-A (б), POC (в), DOC (г) по районам исследованного водного континуума за период 2006–2020 гг.

Fig. 5. Median distribution of TSS (а), Chl-A (б), POC (в), DOC (г) in each zone of the studied water continuum in 2006–2020.

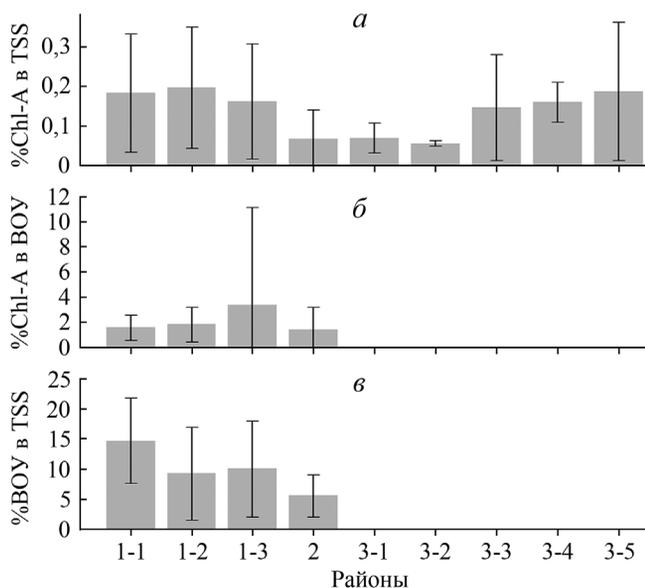


Рис. 6. Доля хлорофилла *a* от общего взвешенного вещества (а) и от взвешенного органического углерода (б), доля взвешенного органического углерода от общего взвешенного вещества (в).

Fig. 6. The proportion of chlorophyll *a* from the total suspended matter (а) and from the suspended organic carbon (б), and the proportion of suspended organic carbon from the total suspended matter (в).

Пространственная изменчивость. По материалам экспедиций 2007–2020 гг. выполнена оценка пространственного распределения TSS по районам совместно с параметрами, представляющими орга-

ническую компоненту природных вод, – DOC, POC и Chl-A (рис. 5).

Показано, что изменение ионной силы воды является одним из основных процессов, ответственных за формирование эстуарной зоны максимальной мутности, и во многих эстуариях эта зона наблюдается на фронте солености менее 5 psu [16; 17]. Максимальные значения TSS характерны для восточной части Таганрогского залива (район 1-3), в то время как максимумы Chl-A фиксируются немного западнее – в центральной части залива (район 1-2). В дельте Дона происходит уменьшение содержания Chl-A. Второй пик концентрации Chl-A отмечается в приплотинной части Цимлянского водохранилища, что, вероятно, связано с формированием здесь благоприятных условий для «цветения» воды за счет привноса фитопланктона из вышележащих участков ветрами восточных румбов. Содержание общей взвеси постепенно уменьшается от Чирского участка (район 4-3) и имеет свой минимум на выходе из Цимлянского водохранилища (район 3-5), а затем постепенно увеличивается и имеет резкий подъем в районе 3-1 (от устья р. Аксай до вершины дельты), что может быть связано, с одной стороны, с более значительными по сравнению с вышележащими участками колебаниями уровня воды и, как следствие, скоростей и направлений течения, а с другой стороны – с дополнительным поступлением взвеси с урбанизированной территории правобережья Дона на участке от Аксая до западных границ Ростова-на-Дону.

Концентрация POC равномерна на всем протяжении Таганрогского залива и резко понижается в дельте Дона. Заслуживает внимания тот факт, что при изменении концентрации TSS в заливе содержание POC остается постоянным. Из всех биотических параметров только лишь концентрация DOC не имеет прямой взаимосвязи с TSS и сохраняет однородность на протяжении всего исследованного водного континуума с небольшим минимумом в районах 3-2 и 3-3 (между устьем р. Аксай и устьем р. Сал) (рис. 5).

Соотношения между содержанием TSS и взвешенными органическими компонентами вод являются одними из ключевых характеристик условий седиментации [18; 19]. На протяжении всего Таганрогского залива и р. Дон средняя доля Chl-A в общем взвешенном веществе не превышает 0,3 %, высокая вариабельность, вероятно, обусловлена сезонным ходом фитопланктона (рис. 6). Содержание Chl-A в составе BOY – 1,5–3,5 %, максималь-

ные значения и их наибольшая изменчивость отмечены в восточной части залива – зоне смешения морских и речных вод. Средняя доля ВОУ в составе общего взвешенного вещества уменьшается от 15 до 5 % от западной части залива к дельте Дона (район 2).

Оценки оказались схожими с данными, полученными в зоне смешения морских и речных волжских вод в Северном Каспии [20]. В частности, на основе анализа восьми проб для интервала солености 0,23–10,2 епс были получены следующие значения: содержание хлорофилла *a* в составе ВОУ 0,2–0,6 %, содержание ВОУ во общей взвеси 7,6–15,6 %, что свидетельствует об идентичности условий, определяющих процессы биологической седиментации в аридных и семиаридных бассейнах. Полученные результаты требуют более детального анализа и интерпретации.

ВЫВОДЫ

Концентрации взвешенного вещества изменяются по районам водного континуума и в целом увеличиваются при движении от Цимлянского водохранилища к Таганрогскому заливу Азовского моря. Годовой ход содержания TSS обусловлен влиянием гидродинамики и активным цветением мик-

роводорослей. На содержание общего взвешенного вещества оказывает влияние органическая компонента вод – взвешенное органическое вещество и хлорофилл *a*. Отмечено сходство в соотношениях между вышеперечисленными параметрами для зон смешения донских вод с азовоморскими и речных волжских вод с морскими в Северном Каспии.

Гранулометрический состав взвеси подвержен влиянию ветрового взмучивания и росту сдвиговых напряжений в условиях формирования значительных уклонов водной поверхности. Для руслового участка реки до вершины дельты характерно преобладание алевритовой фракции. Взвесь, наблюдающаяся в период штормов, преимущественно состоит из пелита.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)» № 501994. Публикация подготовлена в рамках реализации научного проекта РФФ № 22-27-00818 «Влияние длительного маловодья и изменений климата (на рубеже XX–XXI веков) на динамику взвешенного вещества в устьевой области Дона».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокина В.В., Бердников С.В. 2008. Математическое моделирование терригенного осадконакопления в Азовском море. *Океанология*. 48(3): 456–466.
2. Сорокина В.В., Ивлиева О.В., Лурье П.М. 2006. Динамика стока на устьевых участках рек Дон и Кубань во второй половине XX века. *Вестник Южного научного центра*. 2(2): 58–67. doi: 10.23885/1813-4289-2006-2-2-58-67
3. Сорокина В.В., Кулыгин В.В. 2013. Долговременная изменчивость относительной прозрачности вод Азовского моря. *Океанология*. 53(3): 324–331. doi: 10.7868/S003015741303012X
4. Sorokina V.V., Kulygin V.V., Berdnikov S.V. 2014. Total suspended solids, particulate organic matter and Secchi depth in the Sea of Azov. In: *Geoinformation Sciences and Environmental Development: New Approaches, Methods, Technologies. Collection of articles of the II International conference (May 5–9, 2014, Limassol, Cyprus)*. [Электронный ресурс, CD-R]. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 93–96.
5. Клещенко А.В., Московец А.Ю. 2021. Интрузии соленых вод в дельту Дона: закономерности развития и последствия. *Наука Юга России*. 17(3): 30–37. doi: 10.7868/S25000640210304
6. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том V. Азовское море*. 1991. СПб., Гидрометеоздат: 235 с.
7. *Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Цимлянское, водораздельные и Маньчжунские водохранилища*. 1977. Л., Гидрометеоздат: 204 с.
8. Бердников С.В., Бухмин Д.А., Гуськов Г.Е., Григоренко К.С., Клещенко А.В., Московец А.Ю., Кренева К.В., Олейников Е.П., Рыбцова В.С., Савикин А.И., Саяпин В.В., Шевченко М.С., Степаньян О.В. 2021. Экспедиционная деятельность ЮНЦ РАН на НИС «Профессор Панов» и НИС «Денеб» в Азовском, Черном и Каспийском морях в 2020 году. В кн.: *Итоги экспедиционных исследований в 2020 году в Мировом океане и внутренних водах: Тезисы докладов всероссийской научной конференции (Москва, 24–26 февраля 2021 г.)*. Севастополь, Морской гидрофизический институт РАН: 136–144.
9. Бердников С.В., Клещенко А.В., Григоренко К.С., Олейников Е.П., Московец А.Ю., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В., Сорокина В.В., Сойер В.Г. 2019. Результаты морских научных исследований Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) в Азовском море в 2003–2018 гг. Часть 1: гидрология и гидрохимия. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2(3): 7–19.
10. *Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях. Часть III. Гидрометеорологические наблюдения, проводимые штурманским составом на морских судах*. 1999. М., Гидрометеоздат: 198 с.

11. РД 52.24.468-2005. Взвешенные вещества и общее содержание примесей в водах. Методика выполнения измерений массовой концентрации гравиметрическим методом. 2005. Ростов н/Д, изд-во ГХИ: 14 с.
12. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. 1992. М., Издательство стандартов: 8 с.
13. ГОСТ 17.1.4.02-90. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла – а. М., Издательство стандартов: 15 с.
14. Соколов Д.И., Кременецкая Е.Р., Ломова Д.В., Аракельянц А.Д., Филиппова П.С. 2011. Особенности режима мутности в долинном водохранилище при низком уровне воды. *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 3: 27–32.
15. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=1> (дата обращения: 10.11.2022).
16. Lancelot L., Schäfer J., Blanc G., Coynel A., Bossy C., Baudrimont M., Glé C., Larrose A., Renault S., Strady E. 2013. Silver behavior along the salinity gradient of the Gironde estuary. *Environmental Science and Pollution Research*. 20(3): 1352–1366. doi: 10.1007/s11356-012-1045-3
17. Cai H., Savenije H.N.G., Toffolon M. 2014. Linking the river to the estuary: influence of river discharge on tidal damping. *Hydrology and Earth System Sciences*. 18: 287–304. doi: 10.5194/hess-18-287-2014
18. Кравчишина М.Д., Ключиткин А.А., Паутова Л.А., Политова Н.В., Леин А.Ю., Лисицын А.П. 2015. Хлорофилл «а» во взвеси Каспийского моря как показатель условий биогенной седиментации. *Доклады Академии наук*. 465(3): 357–362. doi: 10.7868/S0869565215330208
19. Герасюк В.С., Бердников С.В. 2021. Экспериментальная оценка скорости осаждения взвешенного вещества вод в устье Дона и Таганрогском заливе. *Океанология*. 61(5) 780–790. doi: 10.31857/S0030157421040055
20. Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Паутова Л.А., Ключиткин А.А., Политова Н.В., Новигатский А.Н., Силкин В.А. 2016. Вертикальное распределение взвешенных веществ в Каспийском море в начале лета. *Океанология*. 56(6): 901–918. doi: 10.7868/S0030157416050063
21. *Environmental Development: New Approaches, Methods, Technologies. Collection of articles of the II International conference (May 5–9, 2014, Limassol, Cyprus)*. [Electronic resource, CD-R]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 93–96.
22. Kleshchenkov A.V., Moskovets A.Yu. 2021. [Salt water intrusions into the Don River delta: development patterns and consequences]. *Nauka Yuga Rossii*. 17(3): 30–37. (In Russian). doi: 10.7868/S25000640210304
23. *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morey SSSR. Tom V. Azovskoe more. [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Volume V. Sea of Azov]*. 1991. St Petersburg, Gidrometeoizdat: 235 p. (In Russian).
24. *Gidrometeorologicheskii rezhim ozer i vodokhranilishch SSSR. Tsimlyanskoe, vodorazdel'nye i Manychskie vodokhranilishcha. [Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR. Tsimlyansk, watershed and Manych reservoirs]*. 1977. Leningrad, Gidrometeoizdat: 204 p. (In Russian).
25. Berdnikov S.V., Bukhmin D.A., Gus'kov G.E., Grigorenko K.S., Kleshchenkov A.V., Moskovets A.Yu., Kreneva K.V., Oleynikov E.P., Rybtsova V.S., Savikin A.I., Sayapin V.V., Shevchenko M.S., Stepan'yan O.V. 2021. [Expedition activities of the SSC RAS on the R/V “Professor Panov” and R/V “Deneb” in the Azov, Black and Caspian seas in 2020]. In: *Itogi ekspeditsionnykh issledovaniy v 2020 godu v Mirovom okeane i vnutrennikh vodakh: Tezisy dokladov vserossiyskoy nauchnoy konferentsii. [Results of field research in the World Ocean and internal waters in 2020: Abstracts of the All-Russian scientific conference (Moscow, Russia, 24–26 February 2021)]*. Sevastopol, Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences: 136–144. (In Russian).
26. Berdnikov S.V., Kleshchenkov A.V., Grigorenko K.S., Oleynikov E.P., Moskovets A.Yu., Dashkevich L.V., Kulygin V.V., Sorokina V.V., Soier V.G. 2019. Results of marine scientific research of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (SSC RAS) in the Sea of Azov in 2003–2018. Part 1: hydrology and hydrochemistry. *Aquatic Bioresources & Environment*. 2(3): 7–19.
27. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vyp. 9. Gidrometeorologicheskie nablyudeniya na morskikh stantsiyakh. Chast' III. Gidrometeorologicheskie nablyudeniya, provodimye shturmanskim sostavom na morskikh sudakh. [Instructions for hydrometeorological stations and posts. Issue 9. Hydrometeorological observations at sea stations. Part III. Hydrometeorological observations carried out by the navigation staff on ships]*. 1999. Moscow, Gidrometeoizdat: 198 p. (In Russian).
28. РД 52.24.468-2005. Взвешенные вещества и общее содержание примесей в водах. Методика выполнения измерений массовой концентрации гравиметрическим методом. [RD 52.24.468-2005. Suspended solids and total content of impurities in waters. Methodology for performing measurements of mass concentration by the gravimetric method]. 2005. Rostov-on-Don, Hydrochemical Institute: 14 p. (In Russian).
29. GOST 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. [GOST 26213-91. Soils. Methods for determining organic matter]. 1992. Moscow, Izdatel'stvo standartov: 8 p. (In Russian).

REFERENCES

1. Sorokina V.V., Berdnikov S.V. 2008. Mathematical modeling of the terrigenous sedimentation in the Sea of Azov. *Oceanology*. 48(3): 418–427. doi: 10.1134/S0001437008030144
2. Sorokina V.V., Ivlieva O.V., Lourie P.M. 2006. [River flow alteration in the Don and the Kuban mouth, the second part of XX century]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 2(2): 58–67. (In Russian). doi: 10.23885/1813-4289-2006-2-2-58-67
3. Sorokina V.V., Kulygin V.V. 2013. Long-term variability of the water transparency (Secchi depth) in the Sea of Azov. *Oceanology*. 53(3): 287–293. doi: 10.1134/S0001437013030107
4. Sorokina V.V., Kulygin V.V., Berdnikov S.V. 2014. Total suspended solids, particulate organic matter and Secchi depth in the Sea of Azov. In: *Geoinformation Sciences and*

13. GOST 17.1.4.02-90. *Metodika spektrofotometricheskogo opredeleniya khlorofilla a*. [GOST 17.1.4.02-90. *Method of spectrophotometric determination of chlorophyll a*]. 1990. Moscow, Izdatel'stvo standartov: 15 p. (In Russian).
14. Sokolov D.I., Kremenetskaya E.R., Lomova D.V., Arakel'yants A.D., Filippova P.S. 2011. [Specific features of turbidity regime in a valley reservoir under low water level]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. 3: 27–32.
15. *Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob'ektov (AIS GMVO)*. Available at: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=1> (accessed 10 November 2022). (In Russian).
16. Lancelot L., Schäfer J., Blanc G., Coynel A., Bossy C., Baudrimont M., Glé C., Larrose A., Renault S., Strady E. 2013. Silver behavior along the salinity gradient of the Gironde estuary. *Environmental Science and Pollution Research*. 20(3): 1352–1366. doi: 10.1007/s11356-012-1045-3
17. Cai H., Savenije H.H.G., Toffolon M. 2014. Linking the river to the estuary: influence of river discharge on tidal damping. *Hydrology and Earth System Sciences*. 18: 287–304. doi: 10.5194/hess-18-287-2014
18. Kravchishina M.D., Klyuvitkin A.A., Pautova L.A., Politova N.V., Lein A.Yu., Lisitzin A.P. 2015. Chlorophyll *a* in suspended particulate matter of the Caspian Sea as an indicator of biogenic sedimentation conditions. *Doklady Earth Sciences*. 465(1): 1200–1205. doi: 10.1134/S1028334X15110173
19. Gerasyuk V.S., Berdnikov S.V. 2021. Experimental estimation of the deposition rate of water suspended particulate matter in the mouth of the Don River and in Taganrog Bay. *Oceanology*. 61(5): 687–696. doi: 10.1134/S0001437021040056
20. Kravchishina M.D., Lein A.Yu., Pautova L.A., Klyuvitkin A.A., Politova N.V., Novigatsky A.N., Silkin V.A. 2016. Vertical distribution of suspended particulate matter in the Caspian Sea in early summer. *Oceanology*. 56(6): 819–836. doi: 10.1134/S0001437016050064

Поступила 08.12.2022