

Водные биоресурсы и среда обитания
2023, том 6, номер 1, с. 34–47
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
doi: 10.47921/2619-1024_2023_6_1_34
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



Aquatic Bioresources & Environment
2023, vol. 6, no. 1, pp. 34–47
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
doi: 10.47921/2619-1024_2023_6_1_34
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

УДК 551.464.6/7(262.54.04)

ВЛИЯНИЕ СОЛЕННОСТИ ВОДЫ НА РАЗВИТИЕ ПРИДОННОЙ ГИПОКСИИ И УРОВЕНЬ ПЕРВИЧНОГО ПРОДУЦИРОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ

© 2023 Ю. В. Косенко, Т. Е. Баскакова, С. В. Жукова,
Т. О. Барабашин, М. М. Пятинский

*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»),
Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), Ростов-на-Дону 344002, Россия
E-mail: kosenko_y_v@azniirkh.ru*

Аннотация. В современный период экосистема Азовского моря функционирует в условиях снижения объема материкового стока и роста солености воды, достигшей в 2020–2021 гг. рекордных значений за весь период наблюдений с 1962 г. Повышение солености воды неизбежно приводит к трансформации структуры биологических сообществ, что имеет важное экологическое и рыбохозяйственное значение. В работе изучена связь солености воды с развитием придонной гипоксии, а также уровнем первичного продуцирования органического вещества фитопланктоном в воде Таганрогского залива в летний период года в многолетнем аспекте (1962–2021 гг.). Выполнен экосистемный статистический анализ, отражающий вклад ключевых гидролого-гидрохимических факторов в развитие гипоксии в придонном горизонте Таганрогского залива. Показано, что распреснение вод Таганрогского залива в период 1993–2008 гг. сопровождалось увеличением площадей гипоксии в придонном горизонте. В современный период осолонения с 2009 г. по настоящее время в Таганрогском заливе отмечается снижение масштабов формирования дефицита кислорода. Наибольший вклад в развитие гипоксии в Таганрогском заливе оказывают устойчивость водных масс, температура воды, концентрация органической формы азота и соленость воды (за счет влияния солености на устойчивость водных масс). В периоды осолонения Таганрогского залива отмечено снижение устойчивости водных масс и содержания в воде органической формы азота и фосфора — ключевых факторов, приводящих к формированию зон гипоксии. Максимум интенсивности первичного продуцирования органического вещества фитопланктоном отмечался в период распреснения 1962–1968 гг., минимум — в периоды осолонения Таганрогского залива. Уровень первичной продукции в Таганрогском заливе достоверно зависит от величин среднегодового стока р. Дон, солености воды и концентрации минерального азота.

Ключевые слова: Таганрогский залив, соленость, сток р. Дон, зоны гипоксии, первичная продукция, биогенные вещества, устойчивость вод, экосистемный анализ

THE INFLUENCE OF WATER SALINITY ON GENERATION OF NEAR-BOTTOM HYPOXIC PHENOMENA AND THE LEVEL OF PRIMARY PRODUCTION OF ORGANIC MATTER IN TAGANROG BAY

Yu. V. Kosenko, T. E. Baskakova, S. V. Zhukova,
T. O. Barabashin, M. M. Piatinskii

*Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI "VNIRO"),
Azov-Black Sea Branch of the FSBSI "VNIRO" ("AzNIIRKH"), Rostov-on-Don 344002, Russia
E-mail: kosenko_y_v@azniirkh.ru*

Abstract. At present, the Azov Sea ecosystem exists in the context of continuously decreasing continental runoff and increasing water salinity, which reached in 2020–2021 the highest values for the entire period of observations since 1962. The increase in water salinity inevitably leads to the transformation in the composition of biological communities, which has a pronounced effect on the environment and fisheries. This paper discusses the long-term impact of water salinity on the development of near-bottom hypoxic phenomena and on the volume of primary production of organic matter by phytoplankton in Taganrog Bay during the summer season (1962–2021). A statistical ecosystem analysis describing the contribution of the major hydrological and hydrochemical factors into the processes of hypoxia formation in the bottom water layer of Taganrog Bay has been performed. It is shown that the desalinization of the waters of Taganrog Bay in 1993–2008 was accompanied by the increase in the size of hypoxic zones in the bottom water layer. During the modern period of salinization extending from 2009 to the present, there has been recorded a decrease in the scale of oxygen deficiency in Taganrog Bay. The most crucial contribution to the hypoxic processes in Taganrog Bay is provided by the stability of water masses, water temperature, organic nitrogen concentration, and the water salinity (due to the effect of salinity on the stability of water masses). During the streaks of Taganrog Bay salinization, the decrease in the stability of water masses and in the content of organic nitrogen and phosphorus in the water (crucial factors in the formation of hypoxic zones) has been recorded. The highest rates of the primary production of organic matter by phytoplankton in Taganrog Bay were observed during the desalinization period of 1962–1968, and the lowest ones were recorded during the salinization periods. The results of this assessment have exposed the significant relationship: the primary production of organic matter depends on the average annual runoff of the Don River, the water salinity, and the concentration of mineral nitrogen.

Keywords: Taganrog Bay, salinity, Don River runoff, hypoxic zones, primary production, biogenic substances, water stability, ecosystem analysis

ВВЕДЕНИЕ

После смены многоводной фазы в формировании речного стока экосистема Азовского моря с 2007 г. функционирует в условиях снижения годовых объемов материкового стока, обусловившего (наряду с другими причинами) рост солености воды [1].

Ход изменения среднегодовой солености Азовского моря в период 1960–2021 гг. свидетельствует о том, что установленные в 2017 г. рекордные средневзвешенные показатели солености Таганрогского залива, собственно моря и всего моря (соответственно 10,51, 14,04 и 13,76 ‰) ежегодно обновлялись. В 2021 г. средневзвешенные значения солености распределялись следующим образом: Таганрогский залив — 11,35 ‰, собственно море — 15,29 ‰, все море — 14,97 ‰.

Соленость воды является одной из важнейших гидролого-гидрохимических характеристик, непосредственно влияя на осморегулирующие функции водных организмов. Повышение солености воды неизбежно приводит к трансформации структуры биологических сообществ, что имеет важное экологическое и рыбохозяйственное значение.

Предметом наших исследований явилось состояние водных компонентов экосистемы Таганрогского залива, для которого характерна неустойчивость и чрезвычайно большая амплитуда вариации солености — от 1 ‰ в восточной части до 8–10 ‰ и более в западной части [2]. Критическая соленость, являющаяся пограничной для морских и пресноводных ценозов, составляет 5–8 ‰ [3]. Рядом исследователей уже выяв-

лены глобальные изменения флоро-фаунистического комплекса акватории Таганрогского залива в современный период [4]. В работе Л.М. Сафроновой и О.Л. Лужняк [5] показано, что увеличение солености воды в Таганрогском заливе выразилось в сокращении ареалов пресноводно-солонатоводного видового комплекса фитопланктона, который оказался прижат к восточной части залива, а зоны максимального развития фитопланктона сместились на восток. В 2014 г. увеличение солености воды в восточном районе до уровня выше 6–7 ‰ и дальнейший ее рост в 2015 г. привели к вытеснению пресноводных форм водорослей из этой зоны и сокращению видового разнообразия фитопланктона. Аналогичная тенденция отмечается и в отношении зоопланктона — вытеснение пресноводного комплекса видов с распространением морской копеподы *Acartia tonsa* [6]. В зависимости от солености воды видовой состав основных групп зообентоса и уровень их количественного развития в современный период также меняются [7]. Как следствие, отмечается изменение не только количественного, но и качественного состава ихтиофауны и промысловых уловов. Согласно исследованиям П.А. Балыкина с соавт. [8], в восточной части Таганрогского залива впервые зарегистрированы сингиль *Chelon aurata*, лобан *Mugil cephalus* и камбала-калкан *Scophthalmus maeoticus*, а численность аборигенных полупроходных форм многократно сократилась в связи с ухудшением условий обитания и воспроизводства.

Другим аспектом осолонения Таганрогского залива является изменение гидрохимических условий среды обитания водных биологических ресурсов. Стратификация водных масс по солености является важнейшим фактором возникновения зон гипоксии. Вероятность развития придонной гипоксии на акватории Таганрогского залива ниже, чем в собственно море, поскольку в заливе более выражен горизонтальный перенос водных масс, вызываемый стоковыми течениями и сгонно-нагонными явлениями. Тем не менее, придонный дефицит кислорода в воде Таганрогского залива — явление не исключительное. Несмотря на мелководность Таганрогского залива, динамические факторы не всегда обеспечивают должный вертикальный обмен вод в толще, что проявляется в высокой устойчивости вод. Это в наибольшей степени относится к летнему периоду, когда большая часть вод залива может оказаться резко

стратифицированной [2]. Прогноз придонной гипоксии имеет важное рыбохозяйственное значение при осуществлении мелиоративного лова бычка. Известно также, что формирование дефицита кислорода приводит к обогащению воды биогенными элементами вследствие выхода из илистых донных осадков в восстановительных условиях аммонийного азота, фосфатов и кремниевой кислоты [9]. Кроме того, в настоящее время остается неизученным вопрос о влиянии сниженного речного стока, продолжающегося беспрецедентного осолонения Таганрогского залива и смены доминирующих групп фитопланктона на уровень первичной продукции. Представляется также актуальным проведение на основе многолетних рядов данных статистического экосистемного анализа, отражающего связь ключевых гидролого-гидрохимических факторов на масштабы развития гипоксии в придонном горизонте Таганрогского залива в летний период года.

В силу вышесказанного, целью нашего исследования явилось изучение связи солености воды с развитием придонной гипоксии и уровнем первичного продуцирования органического вещества фитопланктоном, а также вклада гидролого-гидрохимических факторов в формирование зон дефицита кислорода в воде Таганрогского залива.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами для исследования явились многолетние данные по солености, объему стока р. Дон, устойчивости водных масс, площади гипоксии, биогенным элементам и уровню первичной продукции на акватории Таганрогского залива в летний период (июль–август) 1962–2020 гг. Отбор проб воды проводили батометром с поверхностного и придонного горизонтов (верхний и нижний 0,5 м слой) согласно ГОСТ 17.1.5.05-85 и ГОСТ 31861-2012 по стандартной сетке станций, охватывающей всю акваторию залива (рис. 1).

Соленость воды определяли аргентометрическим методом по РД 52.10.243-92, устойчивость водных масс — по Океанографическим таблицам (1975) с учетом коррекции на солевой состав вод Азовского моря. Данные по годовому стоку р. Дон получены в Северо-Кавказском Управлении по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в рамках двусторонних договоров.

При определении гидрохимических показателей использовали общепринятые методы, пред-

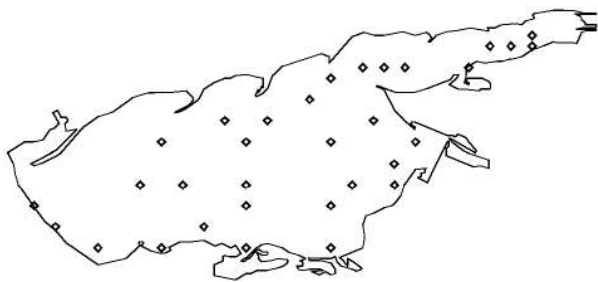


Рис. 1. Схема станций отбора проб воды на акватории Таганрогского залива

Fig. 1. Outline map of the water sampling stations in Taganrog Bay area

ставленные в руководящих документах, принятых и утвержденных на федеральном уровне. Концентрацию минерального азота рассчитывали по сумме аммонийного (РД 52.24.523-2018), нитритного (РД 52.24.518-2008) и нитратного (РД 52.24.523-2009) азота. Минеральный фосфор определяли по РД 52.24.382-2019. Концентрации органического азота и фосфора определяли путем разницы между их валовой (РД 52.24.364-2007; РД 52.24.387-2019) и минеральной формами. Определение содержания растворенного кислорода в воде проводили методом йодометрического титрования по Винклеру (РД 52.24.419-2019). Величину первичной продукции определяли по методу С.В. Бруевича (1936) в модификации В.Г. Дацко (1959).

В качестве критерия гипоксии принимал содержание растворенного в воде кислорода менее 6 мг/дм³ (ниже уровня ПДК для рыбохозяйственных водоемов согласно Приказу № 552 Минсельхоза РФ). Площадь гипоксии оценивали с использованием программы Surfer 8.0.

Результаты исследований подвергали статистической обработке с использованием программ Statistica 10.0 и Excel. Перед выполнением экосистемного анализа собранные многолетние данные подвергались процедуре нормализации. В ходе нормализации данных исключались строки, содержащие пропуски. Все значения во входной таблице пересчитывались из абсолютных значений в относительную шкалу 0...1 (деление каждого значения ряда на его максимум). Процедура стандартизации необходима для устранения влияния фактора размерности величины на результаты моделирования.

Предварительный анализ данных состоял из процедуры определения наличия (или отсутствия) линейной связи между нормализованными рядами данных при помощи корреляционного теста Пирсона. В случае обнаружения признаков мультиколлинеарности факторы исключались из построения модели множественной регрессии. Связь некоторых факторов между собой подвергалась более глубокому исследованию при помощи кросс-корреляционного теста с временными сдвигами (лагами) [10].

На основе результатов предварительного анализа были построены несколько моделей множественной регрессии с различным набором предикторов (гидрологические и гидрохимические показатели) и зависимой переменной — площадь гипоксии в среде R [11]. Множественная линейная регрессия в генеральном представлении имеет форму:

$$f(x) = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + \varepsilon,$$

где

x_1, x_2, \dots, x_n — гидролого-гидрохимические факторы среды;

b_1, b_2, \dots, b_n — регрессионный коэффициент при факторе;

ε — свободный член уравнения (математическое ожидание, смещение относительно оси факторов).

Значимость вклада каждого фактора среды x_1, x_2, \dots, x_n в изменчивость площади гипоксии $f(x)$ определялась величиной коэффициента b_1, b_2, \dots, b_n при данном факторе, значения которых были перенесены на относительную нормализованную шкалу собственных значений. Достоверность построения модели множественной регрессии определялась при помощи вероятностного теста сопоставления отклонений теоретических значений от наблюдаемых на шкале распределения Стьюдента [10]. Предсказательная надежность модели множественной регрессии проверялась при помощи диагностики невязок модели к теоретическому ожиданию их распределения — тест Шапиро–Уилка [12]. Выбор модели, наиболее полно описывающей зоны гипоксии, выполнен на основе значений коэффициента детерминации (R^2) в условии минимизации среднеквадратичной накопительной ошибки (RMSE).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с разностной интегральной кривой среднегодовой солености Таганрогского

залива за период наблюдений с 1962 г. по настоящее время (рис. 2) выделены следующие основные этапы динамики солености воды:

1962–1968 гг. — 1-й период распреснения Таганрогского залива;

1969–1977 гг. — 1-й период осолонения Таганрогского залива;

1978–1992 гг. — период стабилизации солености Таганрогского залива;

1993–2008 гг. — 2-й период распреснения Таганрогского залива;

2009–2021 гг. — 2-й период осолонения Таганрогского залива.

Динамика солености на акватории Таганрогского залива связана с внутривековой цикличностью климата (30, 60 лет) и наложившимися деструктивными обстоятельствами, нараставшими после перекрытия долины Дона Цимлянской плотиной в 1952 г. [13]. Следует отметить, что на акватории собственно моря осолонение началось в 2007 г., тогда как на акватории Таганрогского залива — в 2009 г.

За период исследования Таганрогского залива с 1962 г. по настоящее время нами установлена достоверная ($p < 0,05$) корреляционная взаимосвязь среднегодовой солености воды и среднегодового стока

р. Дон $r = -0,66$ (рис. 3). Данный факт подтверждает важную роль Донского стока в формировании солености Таганрогского залива ($y = -2,8993x + 42,671$).

В связи с распреснением вод Таганрогского залива с 1993 г. отмечалось увеличение площадей гипоксии в придонном горизонте. Дальнейший период осолонения с 2009 г. способствовал снижению масштабов формирования дефицита кислорода. Отдельно следует выделить 1-й период распреснения залива 1962–1968 гг., когда средняя площадь зон придонной гипоксии была небольшой (0,5 тыс. км²) (табл. 1). Данный факт можно объяснить более низкой средней температурой воды в летний период года — 23,3 °С, тогда как в последующие годы, в связи с глобальным потеплением климата, средняя температура воды планомерно увеличивалась, составляя во 2-м периоде распреснения 24,6 °С (современный период осолонения — 25,4 °С).

Наиболее высокая средняя устойчивость водных масс 3,0–3,6 усл. ед. зафиксирована в периоды распреснения и стабилизации солености в Таганрогском заливе. В периоды осолонения среднее значение общей устойчивости вод снижалось до 2,5 усл. ед. в 1969–1977 гг. и до 1,9 усл. ед. в 2009–2021 гг. (табл. 1). Установлена корреля-

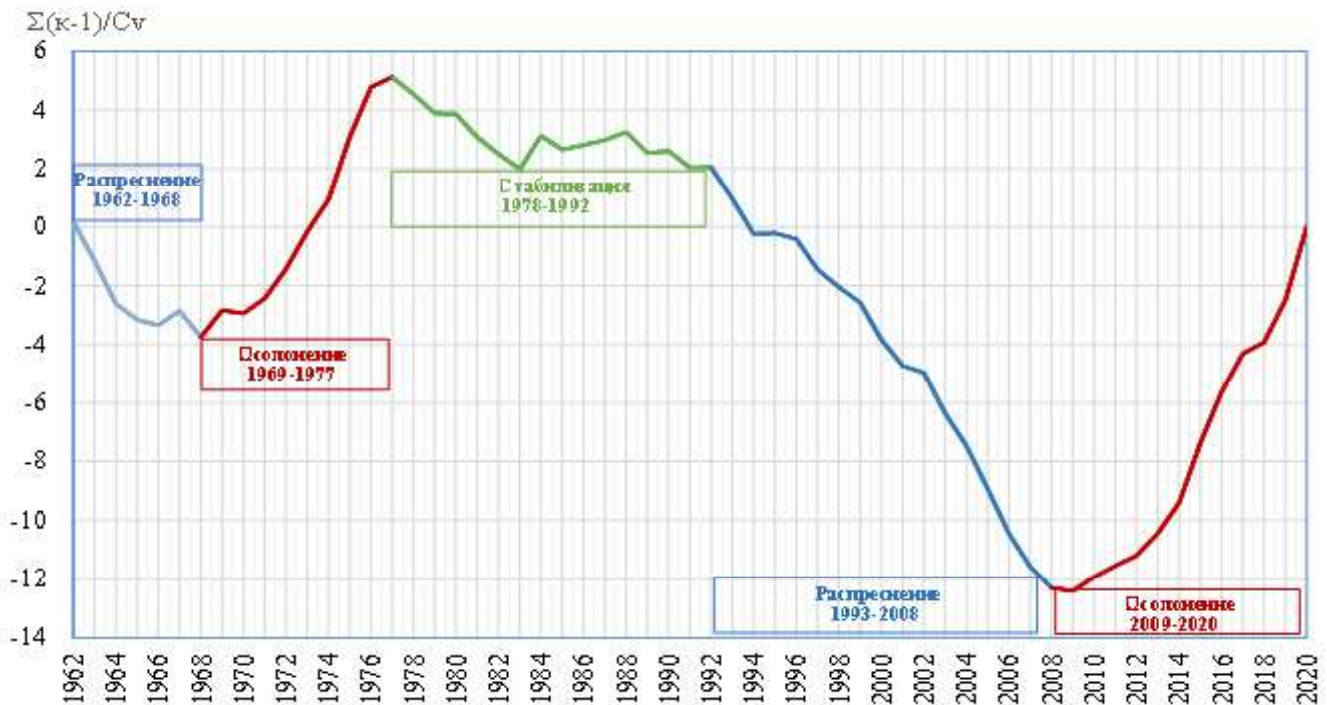


Рис. 2. Разностная интегральная кривая среднегодовой солености Таганрогского залива, 1962–2021 гг.

Fig. 2. Integral curve of the averaged water salinity of Taganrog Bay, 1962–2021

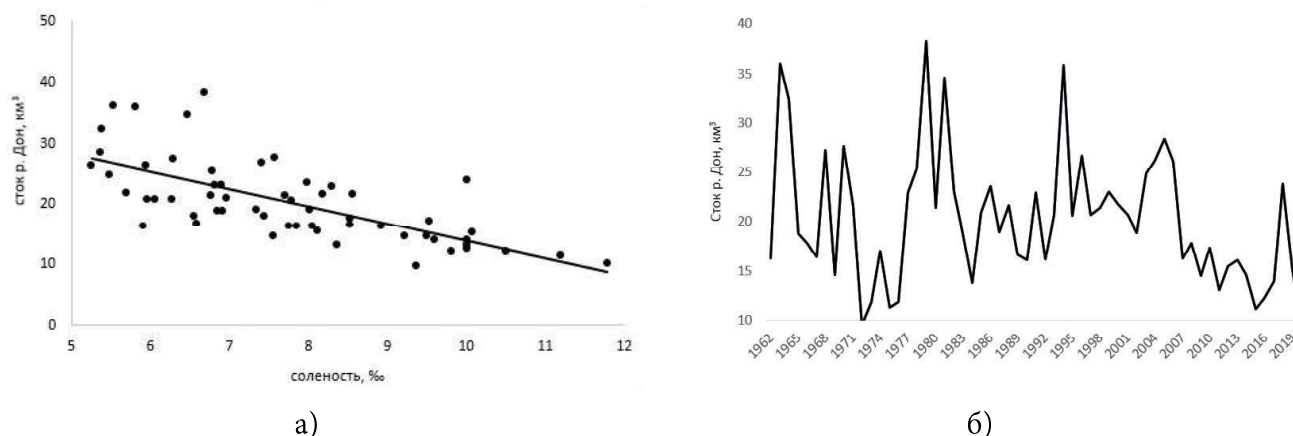


Рис. 3. а) корреляционная взаимосвязь стока р. Дон и солености в Таганрогском заливе; б) годовой сток р. Дон в створе станции Раздорской, 1962–2020 гг.

Fig. 3. а) correlation between the Don River runoff and the average salinity in Taganrog Bay; б) annual runoff of the Don River at the sampling station near Razdorskaya Stanitsa (Village), 1962–2020

Таблица 1. Гипоксия придонного слоя воды и устойчивость водных масс на акватории Таганрогского залива в разные периоды изменения солености, 1962–2021 гг.

Table 1. Hypoxia in the bottom water layer and stability of water masses in Taganrog Bay area at different time ranges distinguished by the changes in salinity, 1962–2021

Периоды Time ranges	Продолжи- тельность, лет Duration, years	Режим солености Salinity regime	Соленость, ‰ Salinity, ‰	Средняя площадь гипоксии, тыс. км ² Average area of the hypoxic zone, thousand km ²	Средняя общая устойчивость водных масс, усл. ед. Average overall stability of water masses, c. u.
1962–1968	7	1-е распреснение the first desalinization	6,87±0,46	0,5	3,3±1,0
1969–1977	9	1-е осолонение the first salinization	9,34±0,37	0,8	2,5±0,7
1978–1992	15	стабилизация stabilization	7,41±0,22	0,8	3,6±0,8
1993–2008	16	2-е распреснение the second desalinization	6,28±0,19	1,3	3,0±0,6
2009–2021	12	2-е осолонение the second salinization	9,40±0,33	0,5	1,9±0,7

ционная взаимосвязь общей устойчивости вод Таганрогского залива и масштабов развития зон гипоксии в придонном горизонте $r=0,85$ ($p<0,05$).

Немаловажным фактором, провоцирующим возникновение дефицита кислорода, является избыточное содержание в воде и донных отложениях органических веществ. Пространственное

распределение и содержание органического углерода в донных отложениях Таганрогского залива подвержено изменениям в результате стоннонагонных явлений. В целом, содержание органического углерода в донных осадках Таганрогского залива значительно ниже, чем на акватории собственно моря, и варьирует в среднем от 1,5 до

2,0 %. Тем не менее, акватория Таганрогского залива всегда характеризовалась как гипертрофный и эвтрофный водный объект, где соотношение в воде валового азота к валовому фосфору составляло от 7:1 до 25:1. Соответственно, для данной акватории свойственны как высокая интенсивность развития фитопланктона, так и высокие темпы фотосинтеза и новообразования автохтонного первичного органического вещества. Кроме того, со стоком р. Дон отмечается дополнительное поступление аллохтонного органического вещества [14]. Высокое содержание органических веществ в воде Таганрогского залива приводит к интенсивному расходованию кислорода на их окисление, что провоцирует развитие гипоксии, особенно при повышенных температурах воды, низком конвективном перемешивании водных масс и сниженной адвекции кислорода из атмосферы.

При анализе данных установлено, что в 1-й и 2-й периоды осолонения отмечалось снижение органического азота в воде на 22 % ($p < 0,01$) и

15 % ($p < 0,05$), соответственно, относительно предшествующих периодов распреснения залива. Содержание в воде органического фосфора несколько отличалось во временной динамике; его достоверное ($p < 0,01$) снижение (на 38 %) относительно 1-го периода распреснения отмечалось в более поздний период 1978–1992 гг. — период стабилизации солености. При этом в современный период осолонения уже зафиксировано снижение среднего значения органического фосфора (на 18 %; $p < 0,01$). Таким образом, периоды повышенной солености воды в Таганрогском заливе характеризуются низкой концентрацией органических форм азота и фосфора, что приводит к снижению вероятности развития зон дефицита кислорода (табл. 2).

Последствием уменьшения площади зон гипоксии в условиях осолонения Таганрогского залива и дефицита речного стока является снижение концентраций в воде биогенных элементов — минеральных форм азота и фосфора, которые

Таблица 2. Концентрации минерального и органического азота и фосфора в воде Таганрогского залива, 1962–2021 гг.

Table 2. Concentrations of mineral and organic dissolved nitrogen and phosphorus in the water of Taganrog Bay, 1962–2021

Периоды Time ranges	Режим солености Salinity regime	Азот минеральный, мг/м ³ Mineral nitrogen, mg/m ³	Азот органический, мг/м ³ Organic nitrogen, mg/m ³	Фосфор минеральный, мг/м ³ Mineral phosphorus, mg/m ³	Фосфор органический, мг/м ³ Organic phosphorus, mg/m ³
1962–1968	1-е распреснение the first desalinization	64±16	1051±56	9,7±2,5	79±8
1969–1977	1-е осолонение the first salinization	32±4*	818±55*	9,9±1,3	69±8
1978–1992	стабилизация stabilization	53±7	923±41	10,5±1,1	49±4*
1993–2008	2-е распреснение the second desalinization	55±5	965±28	16,6±1,4	56±3
2009–2021	2-е осолонение the second salinization	43±3*	823±20*	12,0±1,1*	46±3*

Примечание: * Отличия достоверны относительно предыдущего периода распреснения

Note: * The differences are significant relative to the previous period of desalinization

поступают в залив с речным стоком, при выходе из донных осадков в условиях гипоксии, а также рециклинге из органических форм. Достоверное снижение фосфора минерального ($p < 0,01$) отмечено в современный период осолонения относительно периода распреснения 1993–2008 гг. Содержание в воде минеральной формы азота значимо снижалось в 1-й и 2-й периоды осолонения Таганрогского залива на 50 и 22 %, соответственно, относительно предшествующих периодов распреснения. Таким образом, в периоды осолонения Таганрогского залива отмечено снижение содержания в воде минеральной формы азота.

Концентрация минерального азота имеет высокую степень корреляции со среднегодовым объемом стока р. Дон ($r = 0,89$; $p < 0,05$) (рис. 4б). Отсутствие достоверных корреляционных взаимосвязей речного стока Дона с концентрацией в воде минерального фосфора объясняется его более активным потреблением фитопланктоном. Тем не менее, следует отметить факт наиболее высокого содержания в воде минерального фосфора во 2-м периоде распреснения Таганрогского залива на фоне высокого стока р. Дон и развития обширных зон гипоксии (рис. 4а).

Динамика солености и изменение доминирующих групп фитопланктона не могут не оказывать влияние на величину первичной продукции в Таганрогском заливе. В периоды осолонения Таганрогского залива (1969–1977; 2009–2021) средний уровень первичной продукции органичес-

кого вещества фитопланктоном был минимален и составлял 2,0 млн т $C_{орг.}/год$. Наиболее высокая первичная продукция отмечалась в 1-й период распреснения вод залива 1962–1968 гг. — в среднем 3,9 млн т $C_{орг.}/год$ (рис. 4а). Уровень первичной продукции достоверно коррелирует с величиной среднегодового стока р. Дон ($r = 0,75$; $p < 0,05$), соленостью воды ($r = -0,44$; $p < 0,05$) и концентрацией минерального азота ($r = 0,82$; $p < 0,05$).

В более ранних наших работах [15] было показано, что в современный период осолонения в воде Таганрогского залива на фоне снижения минеральных форм азота и фосфора наблюдалось увеличение их органической составляющей и до 2016 г. не отмечалось снижения уровня первичной продукции. Дальнейшие мониторинговые работы и анализ данных показали резкое снижение первичного продуцирования уже в 2017 г. с 2,1 до 1,6 млн т $C_{орг.}/год$. Увеличение водности р. Дон в 2018 г. до среднегодового уровня 24 км³ (рис. 3б) привело к кратковременному увеличению первичной продукции — 1,9 млн т $C_{орг.}/год$, однако в последние три года значение данного показателя было низким и составляло 1,3–1,6 млн т $C_{орг.}/год$ с минимальным значением в 2021 г.

Для изучения статистических взаимосвязей всех вышеизложенных гидролого-гидрохимических показателей с формированием зон гипоксии в придонном горизонте Таганрогского залива был проведен экосистемный анализ многолетних данных.

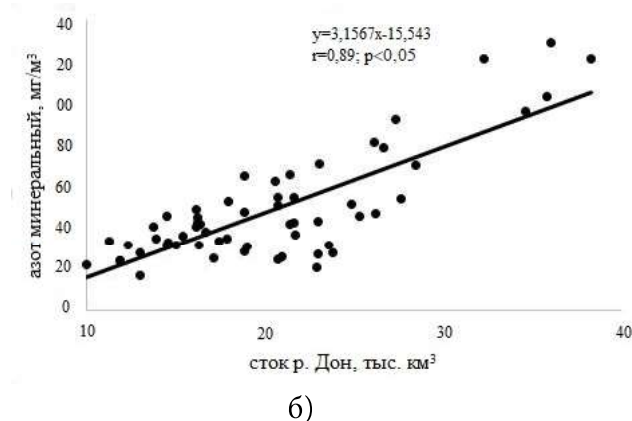
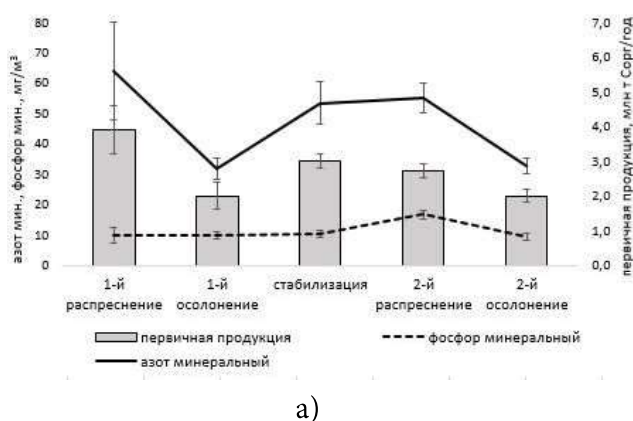


Рис. 4. а) первичная продукция (млн т $C_{орг.}/год$), минеральный азот (мг/м³) и минеральный фосфор (мг/м³) в летний период года на акватории Таганрогского залива; б) корреляционная взаимосвязь минерального азота и объема стока р. Дон, 1962–2020 гг.

Fig. 4. а) primary production (million tons of $C_{орг.}/year$), mineral nitrogen (mg/m³), and mineral phosphorus (mg/m³) in the summer season in the waters of Taganrog Bay; б) correlation between mineral nitrogen and the volume of the Don River runoff, 1962–2020

При кросс-корреляционном тесте не выявлено продолжительного влияния какого-либо из рассмотренных факторов на другой по вектору времени. Воздействие факторов не демонстрирует накопительного эффекта; кроме того, корреляционный анализ со сдвигами факторов относительно друг друга не подтверждает наличие межгодовой связи (рис. 5). Полученный результат вполне ожидаем на данном уровне экосистемной связи при меняющемся режиме солености Таганрогского залива.

На основе результатов экосистемного анализа были построены несколько моделей мно-

жественной регрессии с различным набором предикторов и зависимой переменной площадью гипоксии. Учитывая результаты корреляционного и кросс-корреляционного тестов (рис. 5), мультиколлинеарные факторы выявлены не были, что позволило выполнить построение уравнений множественной регрессии при различном наборе факторов. Выбор наилучшей модели выполнен при помощи значений коэффициента детерминации (R^2) и накопительной среднеквадратичной ошибки (RMSE). Коэффициент детерминации модели R^2 показы-

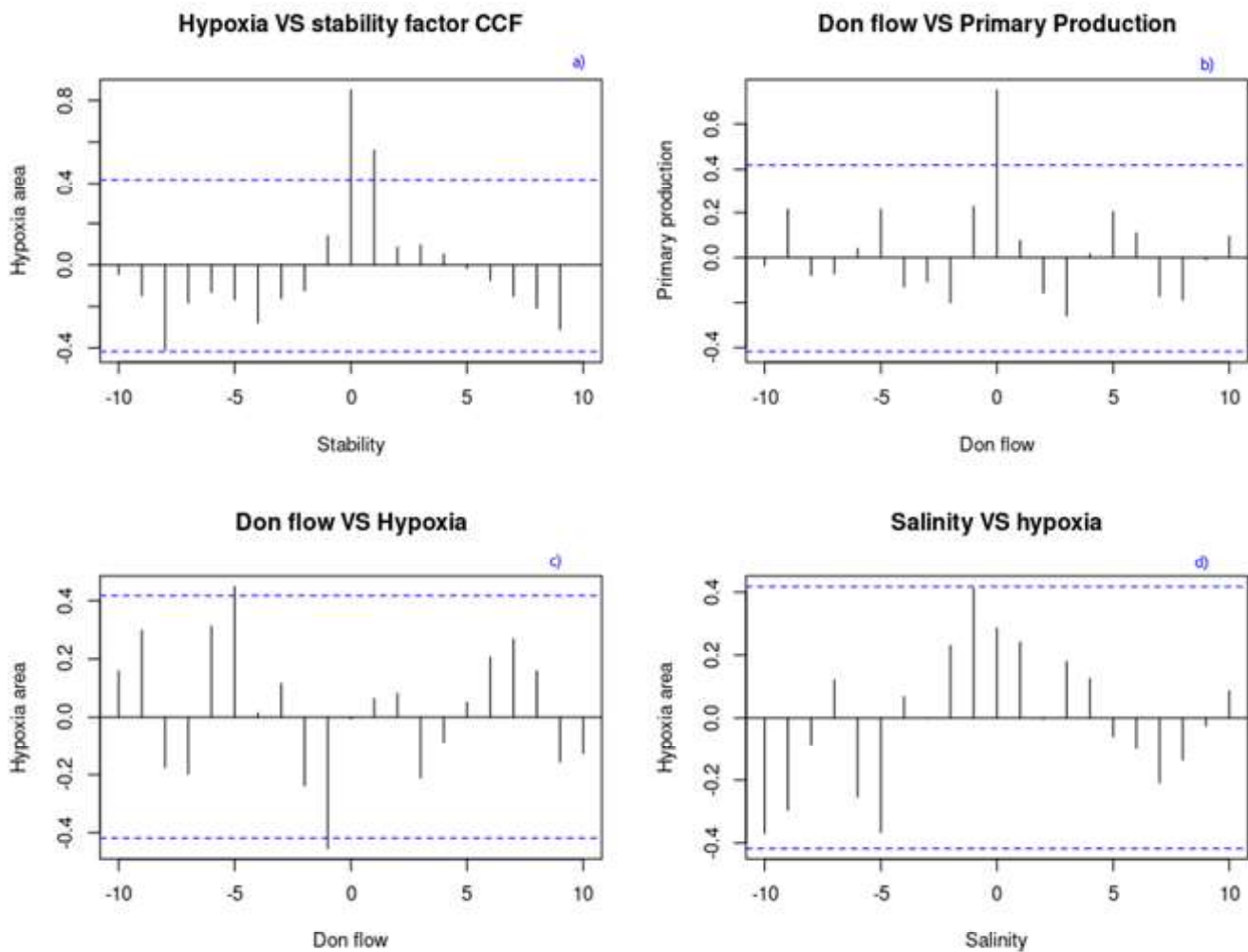


Рис. 5. Кросс-корреляционный анализ нормализованных факторов среды со сдвигом на диапазон от -10 до +10 лет: а) устойчивость водных масс и площадь гипоксии; б) объем стока р. Дон и первичная продукция; в) объем стока р. Дон и площадь гипоксии; г) соленость и площадь гипоксии.

Пунктирные прямые — уровень значимости связи при $\alpha=0,05$ (значения выше уровня — связь доказана)

Fig. 5. Cross-correlation analysis of normalized environmental factors with a lag from -10 to +10 years: a) stability of water masses and the area of the hypoxic zone; b) volume of the Don River runoff and primary production; c) volume of the Don River runoff and the area of the hypoxic zone; d) salinity and the area of the hypoxic zone.

Dashed lines denote the correlation significance level at $\alpha=0.05$ (values exceeding the level signify a proven connection)

вает, насколько полно модель описывает ожидаемое значение площадей гипоксии.

В качестве основных реализаций моделей множественной регрессии рассмотрены: модель № 1 — множественная регрессия всех факторов среды на площадь гипоксии; модель № 2 — множественная регрессия основных факторов среды на площадь гипоксии; модель № 3 — множественная регрессия солености, температуры и речного стока р. Дон на площадь гипоксии; модель № 4 — регрессия двух основных факторов: устойчивости водных масс и стока р. Дон на площадь гипоксии; модель № 5 — регрессия устойчивости водных масс на площадь гипоксии (табл. 3).

Диагностика надежности моделей способом проверки соответствия нормальному закону распределения остатков модели и соответствия теоретическому распределению Стьюдента при оценке оптимумов уравнения представлена в табл. 4.

Модель № 1 (табл. 3, 4) наиболее полно описывает изменчивость площади гипоксии по отношению к другим моделям (полнота описания — 79%), а диагностика надежности подгонки не вызывает возражений (наименьшая накопительная ошибка среди всех моделей, отсутствие отклонений от нормального распределения невязок модели). Рассмотрение значений коэффициентов при факторах модели № 1 позволяет сделать вывод о значимости вклада каждого фактора в формирование гипоксии. Оценка степени вклада каждого фактора выполнена пересчетом полученных коэффициентов параметров уравнения на относительную шкалу в процентах (табл. 5).

Как видно из результатов полной модели № 1, наибольший вклад в формирование гипоксии оказывают: устойчивость водных масс — 16,7 %, температура воды — 14,9 %, концентрация органической формы азота — 14,4 % и соленость воды — 10,6 %, — что согласуется с вышеприведенными результатами. Следует отметить, что связь солености воды с формированием зон гипоксии обусловлена, прежде всего, изменением устойчивости водных масс: в периоды осолонения Таганрогского залива устойчивость водных масс снижается. Вклад других факторов существенно ниже и в совокупности составляет около 34,6 %. Следует отметить, что вклад такого фактора, как объем стока р. Дон, оказался менее значимым, чем мы ожидали. При кросс-корреляционном анализе он составил около 6 % и не имел доказанного прямого влияния на формирование зон гипоксии. Тем не менее, речной сток р. Дон играет важней-

шую опосредованную роль в формировании зон дефицита кислорода за счет его статистически значимого влияния на устойчивость водных масс Таганрогского залива, а также обогащения вод залива биогенными элементами (необходимыми для синтеза фитопланктоном первичного органического вещества) и органическими веществами.

Построение простой однофакторной линейной модели, где используется только величина устойчивости водных масс, позволяет описать до 72 % от общего вклада в формирование зон дефицита кислорода (модель № 5, табл. 3, 4). Безусловно, учет лишь одного фактора не позволяет сделать целостный факторный анализ, однако обладает достаточной надежностью даже в упрощенной реализации, что еще раз подчеркивает важность данного фактора в объяснении причин формирования придонной гипоксии в Таганрогском заливе. Добавление в модель № 5 фактора объема стока р. Дон — модель № 4 — не позволило расширить степень полноты описания причин формирования придонной гипоксии.

Исключение фактора устойчивости водных масс (модель № 3, табл. 3, 4) существенно снижает надежность модели, поскольку такие факторы, как температура, соленость воды и речной сток р. Дон, в совокупности позволяют описать лишь 15 % вклада в формирование гипоксии ($R^2=0,15$, $RMSE=0,24$, подгонка — ненадежна). Использование данных факторов без включения фактора устойчивости водных масс не позволяет построить надежную модель, выдерживающую диагностику. Тем не менее, исключение некоторых малозначимых и коллинеарных факторов (модель № 2, табл. 3, 4) позволяет получить надежный результат на уровне полной модели № 1 ($R^2=0,79$, $RMSE=0,12$), что упрощает анализ и сбор первичных данных.

ВЫВОДЫ

1. Распреснение вод Таганрогского залива в период 1993–2008 гг. сопровождалось увеличением площадей гипоксии в придонном горизонте. В современный период осолонения с 2009 г. по настоящее время в Таганрогском заливе отмечается снижение масштабов формирования зон дефицита кислорода.
2. Разработаны модели множественной регрессии, наиболее полно описывающие изменчивость площади гипоксии в зависимости от гидролого-гидрохимических факторов среды.

Таблица 3. Параметризация моделей множественной регрессии для определения связи площади гипоксии с гидролого-гидрохимическими факторами среды и уровнем первичной продукции в Таганрогском заливе, 1962–2021 гг.

Table 3. Parametrization of the linear multiple regression models for determining the relationship between the hypoxic zone area, hydrological and hydrochemical environmental factors, and primary production in Taganrog Bay, 1962–2021

№ модели Model No.	Модель / Model	Параметризация / Parametrization	R ² ; RMSE
1	hypoxia_area~salinity+stability+temp+np+ +don_flow+n_mineral+p_mineral+ +primprod+n_org+p_org+norg_nmin+ +porg_pmin+intercept	hypoxia_area=-0,49×salinity+0,78×stability+0,69×temp+ +0,33×np-0,27×don_flow-0,32×n_mineral-0,24× ×p_mineral+0,21×primprod-0,53×n_org+0,45×p_org+ +0,17×norg_nmin-0,15×porg_pmin-0,296	R ² =0,79 RMSE=0,119
2	hypoxia_area~stability+salinity+temp+ +don_flow+n_mineral+p_mineral+ +primprod+n_org+p_org+intercept	hypoxia_area=0,78×stability-0,47×salinity+0,5×temp-0,28× ×don_flow+0,09×n_mineral-0,25×p_mineral+0,22× ×primprod+0,03×n_org+0,08×p_org+0,05	R ² =0,79 RMSE=0,12
3	hypoxia_area~salinity+temp+salinity/temp+ +don_flow+intercept	hypoxia_area=-0,33×salinity+0,31×temp+1,44× ×salinity/temp+0,46×don_flow-0,26	R ² =0,15 RMSE=0,24
4	hypoxia_area~stability+don_flow+intercept	hypoxia_area=0,68×stability+0,044×don_flow+0,09	R ² =0,72 RMSE=0,14
5	hypoxia_area~stability	hypoxia_area=0,679×stability+0,116	R ² =0,72 RMSE=0,14

Примечание: Нуроксия_area — площадь гипоксии; salinity — солёность; stability — общая устойчивость водных масс; temp — температура воды; np — соотношение общих форм азота и фосфора; don_flow — объем стока р. Дон; n_mineral — азот минеральный; p_mineral — фосфор минеральный; primprod — первичная продукция; n_org — азот органический; p_org — фосфор органический; norg_nmin — соотношение органического азота к минеральному; porg_pmin — соотношение органического фосфора к минеральному; intercept — свободный член уравнения
 Note: Hypoxia_area — area of the hypoxic zone; salinity — salinity; stability — overall stability of water masses; temp — water temperature; np — relation between the total nitrogen and total phosphorus forms; don_flow — Don River runoff volume; n_mineral — mineral nitrogen; p_mineral — mineral phosphorus; primprod — primary production; n_org — organic nitrogen; p_org — organic phosphorus; norg_nmin — relation of the organic nitrogen to the mineral one; porg_pmin — relation of the organic phosphorus to the mineral one; intercept — intercept

Таблица 4. Диагностика надежности подгонки моделей**Table 4.** Reliability test for the model fitting

№ модели Model No.	Распределение остатков Distribution of residuals	Значимость подгонки, Pr(> t) Significance of the fit, Pr(> t)
1	Распределены нормально, p=0,76 Distributed normally, p=0.76	Не имеет значимых отклонений, p=0,0024 No significant deviations, p=0.0024
2	Распределены нормально, p=0,76 Distributed normally, p=0.76	Не имеет значимых отклонений, p=0,0004 No significant deviations, p=0.0004
3	Распределены нормально, p=0,45 Distributed normally, p=0.45	Имеются значимые отклонения, подгонка не надежна, p=0,27 Significant deviations present, the fit is not reliable, p=0.27
4	Распределены нормально, p=0,40 Distributed normally, p=0.40	Не имеет значимых отклонений, p=0,0000011 No significant deviations, p=0.0000011
5	Распределены нормально, p=0,46 Distributed normally, p=0.46	Не имеет значимых отклонений, p=0,046 No significant deviations, p=0.046

Таблица 5. Значимость влияния различных факторов на площадь гипоксии в Таганрогском заливе по результатам полной модели № 1**Table 5.** Significance of various factors affecting the hypoxic zone area in Taganrog Bay according to the results of the complete model No. 1

Фактор Factor	Оценка коэффициента b при факторе Estimation of the coefficient b under the affecting factor	Вклад, % Contribution, %
stability	0,7818	16,7
temp	0,6974	14,9
n_org	-0,5318	11,4
salinity	-0,4937	10,6
p_org	0,4583	9,8
np	0,3332	7,1
n_mineral	0,3276	7,0
don_flow	-0,2732	5,8
p_mineral	-0,2452	5,2
primprod	0,2139	4,6
norg_nmin	0,1662	3,6
porg_pmin	-0,1503	3,2

Согласно результатам моделирования, наибольший вклад в формирование гипоксии в Таганрогском заливе оказывают устойчивость водных масс, температура воды, концентрация органической формы азота, соленость воды (за счет влияния солености на устойчивость водных масс).

3. В периоды осолонения Таганрогского залива отмечено снижение устойчивости водных

масс и содержания в воде органических форм азота и фосфора — ключевых факторов, приводящих к формированию придонной гипоксии.

4. Максимум интенсивности первичного продуцирования органического вещества фитопланктоном отмечался в период распреснения 1962–1968 гг., минимум — в периоды осолонения Таганрогского залива. Уровень пер-

вичной продукции в Таганрогском заливе достоверно коррелирует с величиной среднегодового стока р. Дон, соленостью воды и концентрацией минерального азота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жукова С.В., Шишкин В.М., Карманов В.Г., Бурлачко Д.С., Подмарева Т.И., Лутынская Л.А., Тарадина Е.А. Водно-экологические проблемы Азовского моря как трансграничного водного объекта и пути их решения // Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана : матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Сочи, 20–25 сентября 2021 г.). Новочеркасск: Лик, 2021. С. 137–143.
2. Воловик С.П., Корпакова И.Г., Лавренова Е.А., Темердашев З.А. Экосистема Азовского моря: режим, продуктивность, проблемы управления. Краснодар: Изд-во Кубанского государственного университета, 2008. 347 с.
3. Хлебович В.В. Критическая соленость биологических процессов. Л.: Наука, 1974. 236 с.
4. Бердников С.В., Клещенко А.В., Кренева К.В., Глущенко Г.Ю., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В., Герасюк В.С., Сапрыгин В.В., Булышева Н.И. Результаты морских научных исследований Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) в Азовском море в 2003–2018 гг. Часть 2: Гидробиология // Водные биоресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2, № 4. С. 7–23. doi: 10.47921/2619-1024_2019_2_4_7.
5. Сафронова Л.М., Лужняк О.Л. Трансформация фитопланктона Азовского моря в условиях современного осолонения // Морские биологические исследования: достижения и перспективы : матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, приуроченной к 145-летию Севастопольской биологической станции (г. Севастополь, 19–24 сентября 2016 г.). Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. Т. 2. С. 417–420.
6. Афанасьев Д.Ф., Мирзоян З.А., Мартынюк М.Л., Хренкин Д.В., Шляхова Н.А., Бычкова М.В., Жукова С.В. Раннелетний зоопланктон Азовского моря в период осолонения // Биология внутренних вод. 2019. № 2-2. С. 51–60. doi: 10.1134/S0320965219030033.
7. Фроленко Л.Н., Живоглядова Л.А., Ковалев Е.А. Состояние кормовой базы рыб-бентофагов Азовского моря // Вопросы рыболовства. 2019. Т. 20, № 1. С. 49–57.
8. Балыкин П.А., Куцын Д.Н., Орлов Ю.Л. Изменения солености и видового состава ихтиофауны в Азовском море // Океанология. 2019. Т. 59, № 3. С. 396–404. doi: 10.31857/S0030-1574593396-404.
9. Александрова З.В., Бронфман А.М. Обмен биогенными элементами в системе «вода–грунт» и его

роль в формировании химических основ продуктивности Азовского моря // Океанология. 1975. Т. 15, вып. 1. С. 75–81.

10. Venables W.N., Ripley B.D. Modern applied statistics with S. 4th ed. Berlin: Springer, 2002. 510 p. doi: 10.1007/b97626.
11. Chambers J.M. Linear models // Statistical models in S / J.M. Chambers, T.J. Hastie (Eds.). Berlin: Springer, 1992. 608 p.
12. Royston J.P. Remark AS R94. A remark on algorithm AS 181: The W-test for normality // Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics). 1995. Vol. 44, issue 4. Pp. 547–551. doi: 10.2307/2986146.
13. Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Московец А.Ю. Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона // Наука юга России. 2017. Т. 13, № 1. С. 35–43. doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43.
14. Косенко Ю.В., Баскакова Т.Е., Картамышева Т.Б. Роль стока реки Дон в формировании продуктивности Таганрогского залива // Водные биоресурсы и среда обитания. 2018. Т. 1, № 3–4. С. 32–39. doi: 10.47921/2619-1024_2018_1_3-4_32.
15. Косенко Ю.В., Барабашин Т.О., Баскакова Т.Е. Динамика гидрохимических характеристик Азовского моря в современный период осолонения // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2017. № 3/1. С. 76–82. doi: 10.23683/0321-3005-2017-3-1-76-82.

REFERENCES

1. Zhukova S.V., Shishkin V.M., Karmanov V.G., Burlachko D.S., Podmareva T.I., Lutynskaya L.A., Taradina E.A. Vodno-ekologicheskie problemy Azovskogo morya kak transgranichnogo vodnogo ob'ekta i puti ikh resheniya [Water and environmental problems of the Sea of Azov and ways to solve them]. In: *Transgranichnye vodnye ob'ekty: ispol'zovanie, upravlenie, okhrana : materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (g. Sochi, 20–25 sentyabrya 2021 g.)* [Trans-boundary water bodies: use, management, conservation. Proceedings of the All-Russian Theoretical and Practical Conference with the international participation (Sochi, 20–25 September, 2021)]. Novocherkassk: Lик [LIC Information & Publishing Agency: Literature, Information, Culture], 2021, pp. 137–143. (In Russian).
2. Volovik S.P., Korpakova I.G., Lavrenova E.A., Temerdashev Z.A. Ekosistema Azovskogo morya: rezhim, produktivnost', problemy upravleniya [Ecosystem of the Azov Sea: regime, productivity, management problems]. Krasnodar: Kubanskiy

- gosudarstvennyy universitet [Kuban State University] Publ., 2008, 347 p. (In Russian).
3. Khlebovich V.V. Kriticheskaya solenost' biologicheskikh protsessov [The critical salinity of biological processes]. Leningrad: Nauka [Science], 1974, 236 p. (In Russian).
 4. Berdnikov S.V., Kleshchenkov A.V., Kreneva K.V., Glushchenko G.Yu., Dashkevich L.V., Kulygin V.V., Gerasyuk V.S., Saprygin V.V., Bulysheva N.I. Rezul'taty morskikh nauchnykh issledovaniy Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk (YuNTs RAN) v Azovskom more v 2003–2018 gg. Chast' 2: Gidrobiologiya [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 2: Hydrobiology]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya [Aquatic Bioresources & Environment]*, 2019, vol. 2, no. 4, pp. 7–23. doi: 10.47921/2619-1024_2019_2_4_7. (In Russian).
 5. Safronova L.M., Luzhnyak O.L. Transformatsiya fitoplanktona Azovskogo morya v usloviyakh sovremennogo osoloneniya [Changes in the Azov Sea phytoplankton under present-day conditions of salinization]. In: *Morskie biologicheskie issledovaniya: dostizheniya i perspektivy : materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, priurochennoy k 145-letiyu Sevastopol'skoy biologicheskoy stantsii (g. Sevastopol', 19–24 sentyabrya 2016 g.) [Marine biological research: achievements and perspectives. Proceedings of All-Russian Scientific-Practical Conference with international participation dedicated to the 145th anniversary of Sevastopol Biological Station (Sevastopol, 19–24 September, 2016)]*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika [EKOSI-Hydrophysics], 2016, vol. 2, pp. 417–420. (In Russian).
 6. Afanasyev D.F., Mirzoyan Z.A., Martynyuk M.L., Khrenkin D.V., Shlyakhova N.A., Bychkova M.V., Zhukova S.V. Early summer zooplankton in the Sea of Azov during the period of its salinization. *Inland Water Biology*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 53–61. doi: 10.1134/S1995082919050031.
 7. Frolenko L.N., Zhivoglyadova L.A., Kovalev E.A. Sostoyanie kormovoy bazy ryb-bentofagov Azovskogo morya [Status of food resources for benthophagous fish in the Sea of Azov]. *Voprosy rybolovstva [Problems of Fisheries]*, 2019, vol. 20, no. 1, pp. 49–57. (In Russian).
 8. Balykin P.A., Kutsyn D.N., Orlov A.M. Changes in salinity and species composition of ichthyofauna in the Sea of Azov. *Oceanology*, 2019, vol. 59, no. 3, pp. 358–366. doi: 10.1134/S0001437019030020.
 9. Aleksandrova Z.V., Bronfman A.M. Obmen biogennymi elementami v sisteme “voda–grunt” i ego rol' v formirovaniy khimicheskikh osnov produktivnosti Azovskogo morya [Nutrient exchange in the waterbottom system and its role in formation of chemical bases of the Azov Sea productivity]. *Okeanologiya [Oceanology]*, 1975, vol. 15, issue 1, pp. 75–81. (In Russian).
 10. Venables W.N., Ripley B.D. Modern applied statistics with S. 4th ed. Berlin: Springer, 2002, 510 p. doi: 10.1007/b97626.
 11. Chambers J.M. Linear models. In: *Statistical models in S*. J.M. Chambers, T.J. Hastie (Eds.). Berlin: Springer, 1992, 608 p.
 12. Royston J.P. Remark AS R94. A remark on algorithm AS 181: The W-test for normality. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 1995, vol. 44, issue 4, pp. 547–551. doi: 10.2307/2986146.
 13. Matishov G.G., Grigorenko K.S., Moskovets A.Yu. Mekhanizmy osoloneniya Taganrogskego zaliva v usloviyakh ekstremal'no nizkogo stoka Dona [The salinization mechanisms in the Taganrog Bay under the conditions of the Don River extremely low runoff]. *Nauka yuga Rossii [Science in the South of Russia]*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 35–43. doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43. (In Russian).
 14. Kosenko Yu.V., Baskakova T.E., Kartamysheva T.B. Rol' stoka reki Don v formirovaniy produktivnosti Taganrogskego zaliva [Role of the Don River flow in productivity formation of the Taganrog Bay]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya [Aquatic Bioresources & Environment]*, 2018, vol. 1, no. 3–4, pp. 32–39. doi: 10.47921/2619-1024_2018_1_3-4_32. (In Russian).
 15. Kosenko Yu.V., Barabashin T.O., Baskakova T.E. Dinamika gidrokhimicheskikh kharakteristik Azovskogo morya v sovremennyy period osoloneniya [Dynamics of hydrochemical characteristics of the Sea of Azov in modern period of salinization]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Estestvennye nauki [Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences]*, 2017, no. 3/1, pp. 76–82. doi: 10.23683/0321-3005-2017-3-1-76-82. (In Russian).

Поступила 09.09.2022

Принята к печати 18.10.2022