

Водные биоресурсы и среда обитания
2023, том 6, номер 4, с. 31–42
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



Aquatic Bioresources & Environment
2023, vol. 6, no. 4, pp. 31–42
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

УДК 551.464.7+504.5(262.54)

https://doi.org/10.47921/2619-1024_2023_6_4_31

EDN: XYAEFA



ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИОРИТЕТНЫМИ ТОКСИКАНТАМИ АЗОВСКОГО МОРЯ НА КРАТКОСРОЧНУЮ ПЕРСПЕКТИВУ

Ю. В. Косенко*, И. В. Кораблина

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»),
Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), Ростов-на-Дону 344002, Россия

*E-mail: kosenkoyn@azniirkh.vniro.ru

Аннотация

Введение. Современные климатические изменения и увеличение объема хозяйственного изъятия вод в бассейнах рек Азовского моря привели к сокращению пресноводного стока и рекордному росту солености моря. **Актуальность.** Осолонение Азовского моря приводит к трансформации структуры биологических сообществ и снижению первичной продуктивности, что неизбежно негативно отражается на рыбопродуктивности. Другим важным фактором формирования запасов водных биологических ресурсов служит качество среды обитания. **Цель** работы — дать прогноз гидрохимических основ биологической продуктивности и токсикологической ситуации в Азовском море в краткосрочной перспективе до 2030 г. **Методы.** Материалами для исследования явились многолетние данные по уровню первичной продукции, гидрохимическому режиму и накоплению приоритетных токсикантов в экосистеме Азовского моря. **Результаты.** В современный период адаптация экосистемы Азовского моря к росту солености воды проявляется в снижении уровня первичного продуцирования. В последние годы в летний период отмечается неблагоприятное физиологическое состояние фитопланктона за счет высокого содержания в клетках феофитина. В Азовском море с 1986 г. (пик развития промышленности и антропогенной нагрузки) к настоящему времени в воде, донных отложениях и мышцах промысловых видов рыб отмечено снижение среднегодовой концентрации большинства контролируемых токсикантов. **Выводы.** При наиболее вероятном сценарии прогноза речного стока и солености воды (14,5–16,5 ‰) ожидается дальнейшее снижение уровня первичной продукции. Возможно, произойдет адаптация экосистемы к росту солености воды и фитопланктон будет характеризоваться более благоприятным физиологическим состоянием в летний период года. Дефицита биогенных элементов не прогнозируется. При сохранении существующего уровня антропогенной нагрузки (наиболее вероятный сценарий) уровень загрязнения моря антропогенными токсикантами прогнозируется как низкий, а в отдельных районах — Таганрогский залив, акватория Ейского и Темрюкского морских портов — как умеренный. Качество и безопасность водных биоресурсов как продукта питания будут соответствовать нормативным требованиям.

Ключевые слова: Азовское море, вода, донные отложения, водные биологические ресурсы, первичная продукция, приоритетные токсиканты, сценарии развития

SHORT-TERM FORECAST OF THE CHANGES IN THE PRIMARY PRODUCTION OF ORGANIC MATTER AND POLLUTION BY PRIORITY TOXICANTS IN THE AZOV SEA

Yu. V. Kosenko*, I. V. Korablina

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: kosenkoyv@azniirkh.vniro.ru

Abstract

Background. Modern climate changes and increasing anthropogenic water withdrawal in the Azov Sea river basins have led to a reduction in freshwater runoff and a record increase in the sea salinity. **Relevance.** Salinization of the Azov Sea leads to a transformation of the structure of biological communities and a decrease in primary productivity, which inevitably has a negative impact on fish productivity. Another important factor in the stock formation of aquatic biological resources is the quality of their habitat. **Aim** of this work is to make a short-term forecast of the hydrochemical foundation of biological productivity and toxicological status of the Azov Sea up to 2030. **Methods.** This study was based on the long-term data on the level of primary production, hydrochemical regime and accumulation of priority toxicants in the Azov Sea ecosystem. **Results.** In the present period, adaptation of the Azov Sea ecosystem to increasing water salinity is manifested in a decrease in the level of primary production. In recent years, during the summer season, an unfavorable physiological state of phytoplankton has been observed due to the high content of pheophytin in the cells. In the Azov Sea, from 1986 (the peak of industrial development and anthropogenic load) up to the present, in the water, bottom sediments and muscles of commercial fish species, has been observed a decrease in the average annual concentration of the majority of monitored toxicants. **Conclusions.** Under the most likely forecasted scenario for the river flow and water salinity (14.5–16.5 ‰), a further decrease in the level of primary production is expected. It is possible that the ecosystem will adapt to the increase in water salinity; phytoplankton will be characterized by a more favorable physiological state in the summer. No deficiency of biogenic elements is predicted. If the existing anthropogenic load remains unchanged (the most likely scenario), the level of sea pollution by anthropogenic toxicants is predicted to be low, and in certain areas—Taganrog Bay, the waters of the Yeysk and Temryuk Sea Ports—it is expected to be moderate. The quality and safety of aquatic biological resources as a food product will meet regulatory requirements. **Keywords:** Azov Sea, water, bottom sediments, aquatic biological resources, primary production, priority toxicants, development scenarios

ВВЕДЕНИЕ

Сокращение пресноводного стока, современные климатические изменения (повышение среднегодовых температур за последние десятилетия), повышенный вклад испарения с поверхности воды и увеличение объема хозяйственного изъятия вод в бассейнах рек Дон и Кубань привели к рекордному росту солености воды Азовского моря [1]. В настоящее время соленость воды в Азовском море достигла рекордных за весь период наблюдений с 1962 г. значений. Повышение солености воды неизбежно приводит к трансформации структуры биологических сообществ, что имеет важное экологическое и рыбохозяйственное значение. Вместо ценных пресноводных и анадромных рыб судака, леща, тарани, рыбца, русского осетра и севрюги, которых в распресненном море еще на памяти нынешнего поколения ежегодно добывали несколь-

ко тысяч тонн (а всего пищевой рыбы — порядка 100 тыс. тонн), теперь развиваются миллионы тонн медузы и чужеродных морских моллюсков. Современное состояние Азовского моря, таким образом, можно охарактеризовать как состояние глубочайшего экосистемного кризиса имевшихся продуктивных биоценозов и формирования новой морской экосистемы. На примере Таганрогского залива показано, что максимум интенсивности первичного продуцирования органического вещества фитопланктоном отмечался в период распреснения (1962–1968 гг.), минимум — в периоды осолонения (1969–1977 и 2009–2021 гг.) [2].

Другим важным компонентом формирования запасов водных биологических ресурсов (ВБР) в Азовском море служит качество среды обитания, в которой они развиваются на всех стадиях жизненного цикла. Основными источниками поступления

токсикантов были и продолжают оставаться речной сток, эксплуатационные сбросы с судов, дамлинг загрязненных донных отложений портовых акваторий, судоходство, атмосферные осадки и связанные с ними эоловые выпадения [3].

В связи с вышесказанным, целью нашего исследования явился анализ и прогноз гидрохимических основ биологической продуктивности и токсикологической ситуации в Азовском море в краткосрочной перспективе до 2030 г.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами для исследования послужили многолетние данные по уровню первичной продукции, концентрации фитопигментов и биогенных элементов в воде, а также накоплению приоритетных токсикантов в воде, донных отложениях, кормовом бентосе и тканях (мышцы, печень, гонады) промысловых видов рыб Азовского моря. Регулярные экспедиции проводились в весенний (апрель), летний (июль–август) и осенний (октябрь) периоды года. Отбор проб воды проводили батометром Нискина или Ван-Дорна с поверхностного и придонного горизонтов (верхний и нижний 0,5 м

слои). Пробы донных отложений отбирали дночерпателем Петерсена (или «Океан»), для анализа брали верхний 2 см слой. Отбор проб осуществляли по стандартной сетке станций, охватывающей всю акваторию моря (рис. 1).

При определении гидрохимических параметров и показателей загрязнения воды, донных отложений и тканей ВБР приоритетными токсикантами использовали общепринятые методы, представленные в руководящих документах, принятых и утвержденных на федеральном уровне [4, 5].

Величину первичной продукции определяли по методу С.В. Бруевича (1936) в модификации В.Г. Дацко (1959). Определение концентрации фитопигментов (хлорофилла «а» и феофитина) в воде проводили по ГОСТ 17.1.4.02-90. Биогенные элементы определяли по РД 52.24.523-2018 (азот аммонийный), РД 52.24.518-2008 (азот нитритный), РД 52.24.523-2009 (азот нитратный), РД 52.24.382-2019 (фосфаты по фосфору), РД 52.24.433-2018 (кремниевая кислота). Определение содержания растворенного кислорода в воде проводили методом йодометрического титрования по Винклеру (РД 52.24.419-2019).

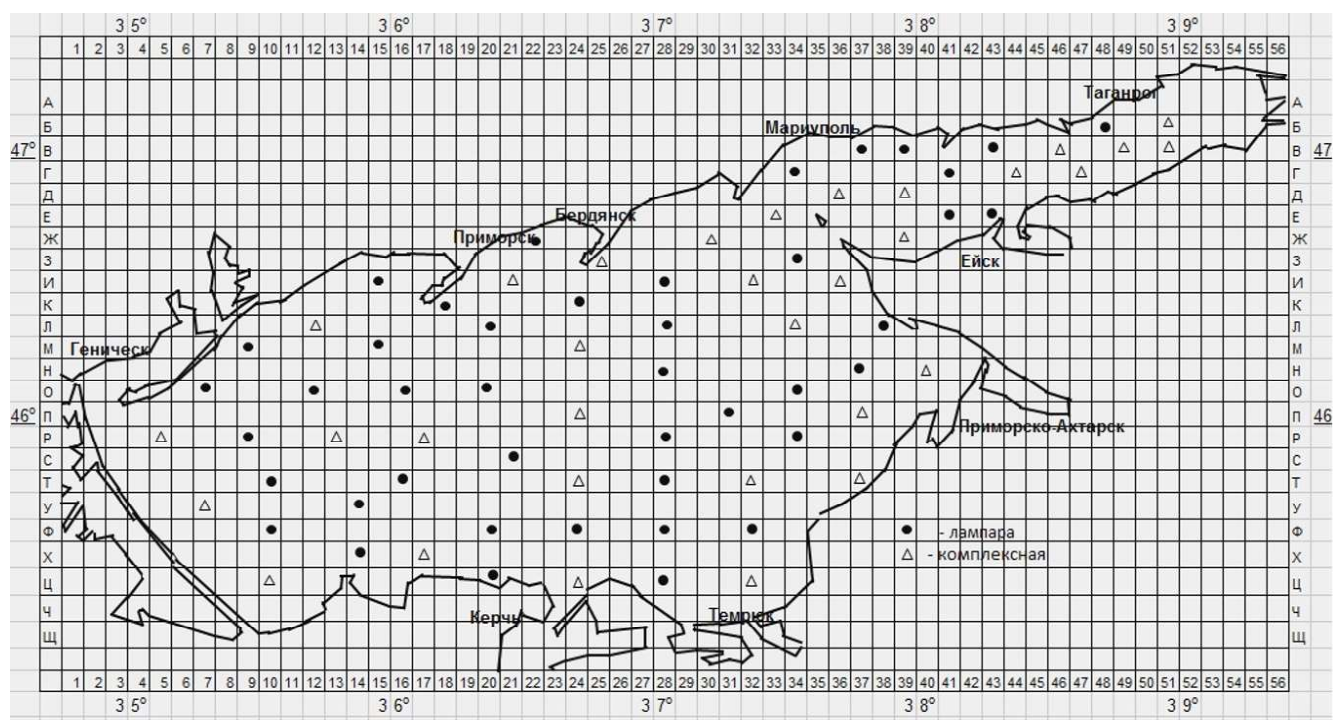


Рис. 1. Схема станций отбора проб воды на акватории Азовского моря (гидрохимические и токсикологические исследования выполнены на комплексных станциях)

Fig. 1. Water sampling stations in the Azov Sea area (hydrochemical and toxicological studies were carried out at multidisciplinary stations)

Концентрации большинства тяжелых металлов в воде и донных отложениях определяли по ФР.1.31.2006.01514 и ФР.1.3.12006.02634, ртути — по РД 52.24.479-2008 и РД 15-226-91, нефтепродуктов — по ФР.1.31.2005.01511 и ФР.1.29.2012.12493, стойких хлорорганических пестицидов (ХОП) — по ФР.1.31.2005.01513 и ФР.1.31.2013.16637, полихлорированных бифенилов (ПХБ) — по ФР.1.31.201.10538 и ФР.1.31.2013.014194; активность цезия-137 в донных отложениях выявляли по ФР.1.40.2017.25774. Анализ уровня накопления токсикантов в ВБР проводили по ФР.1.31.2007.04014 (цинк, кадмий, свинец), ФР.1.31.2015.21649 (ртуть), ФР.1.31.2008.04701 (ХОП), ФР.1.31.2016.22944 (ПХБ), ФР.1.40.2017.2577 и ФР.1.40.2014.18552 (радионуклиды).

Результаты исследований подвергали статистической обработке с использованием программ Statistica 10.0 и Excel. Оценку трендов рассчитывали по Манну–Кендаллу. Направленность многолетних изменений была определена с помощью линейного тренда (показателя b — углового коэффициента). Рассчитывали также уровень достоверности для нулевой гипотезы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В современный период адаптация экосистемы Азовского моря к росту солености воды проявляется в снижении уровня первичного продуцирования органического вещества фитопланктоном. С начала периода осолонения (2007 г.) на акватории собственно моря отмечено достоверное снижение ($p < 0,05$) уровня первичной продукции. В Таганрогском заливе тренд на снижение первичного продуцирования за исследуемый период статистически не значим ($p > 0,05$), поскольку снижение первичной продукции в заливе стало отмечаться значительно позже, с 2017 г. [2]. В целом, с начала периода осолонения Азовского моря по настоящее время первичная продукция как на акватории собственно моря, так и на акватории Таганрогского залива снизилась в среднем в 2 раза (рис. 2).

В последние годы (2021–2022 гг.) в летний период (июль) отмечается не характерное для данного сезона неблагоприятное физиологическое состояние фитопланктона за счет высокого содержания в клетках феофитина — продукта распада хлорофилла «а». С 2007 г. на акватории собственно моря отмечается снижение хлорофилла «а» и

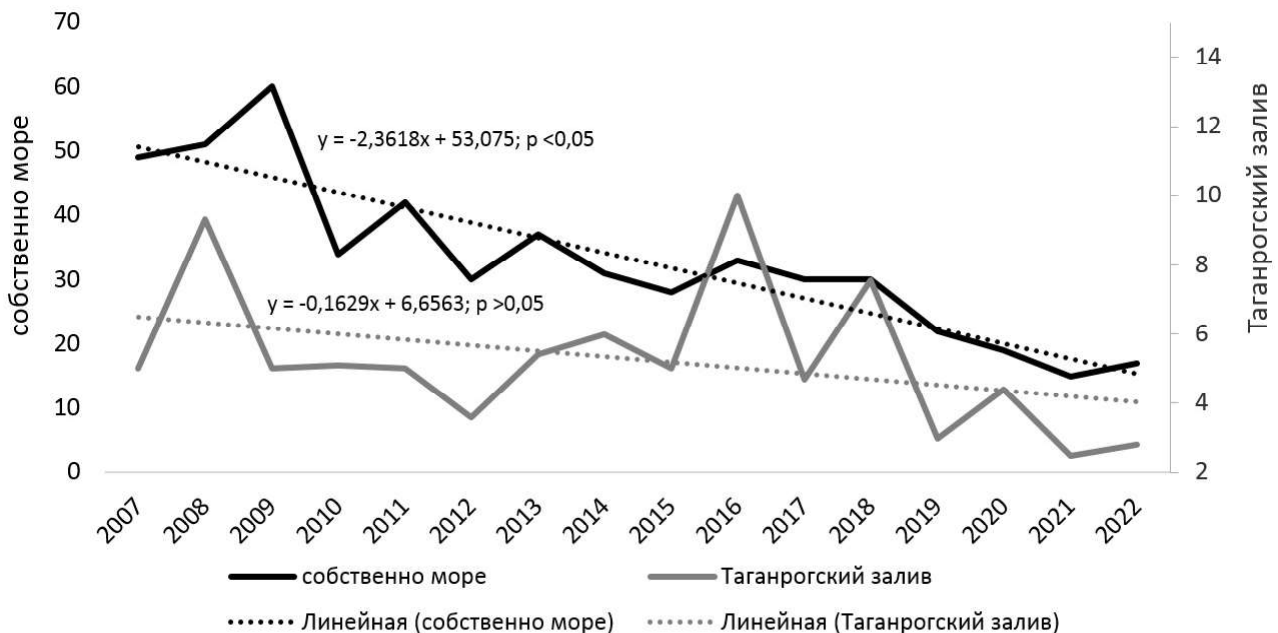


Рис. 2. Средний уровень первичной продукции (млн т орг. вещества/год) в поверхностном горизонте на акватории собственно моря и Таганрогского залива за период 2007–2022 гг.

Fig. 2. Average level of primary production (million tons of organic matter/year) in the surface water layer of the Azov Sea (excluding Taganrog Bay) and Taganrog Bay for 2007–2022

увеличение феофитина в клетках фитопланктона ($p < 0,05$). На акватории Таганрогского залива отмечены сходные тренды, но они статистически не значимы ($p > 0,05$). Следует также обратить внимание, что относительно повышенная водность р. Дон в 2018 г. [2] оказала благотворное влияние на физиологическое состояние фитопланктона на акватории Азовского моря, поскольку содержание в клетках феофитина резко снизилось (рис. 3).

Снижение хлорофилла «а» и увеличение доли феофитина на акватории собственно моря может быть обусловлено как более ранним старением и отмиранием фитопланктона в летний период года

в условиях осолонения, так и смещением периода его максимальной фотосинтетической активности на более ранние календарные сроки за счет тенденции роста температуры воды в зимне-весенний период года. В Таганрогском заливе, по причине менее агрессивного нарастания солености воды [6], тренды снижения уровня первичного продуцирования и концентрации хлорофилла «а», а также повышения доли феофитина в клетках фитопланктона на данный момент статистически не значимы.

Экологический механизм взаимосвязи осолонения воды и интенсивности первичного продуцирования органического вещества фитопланк-

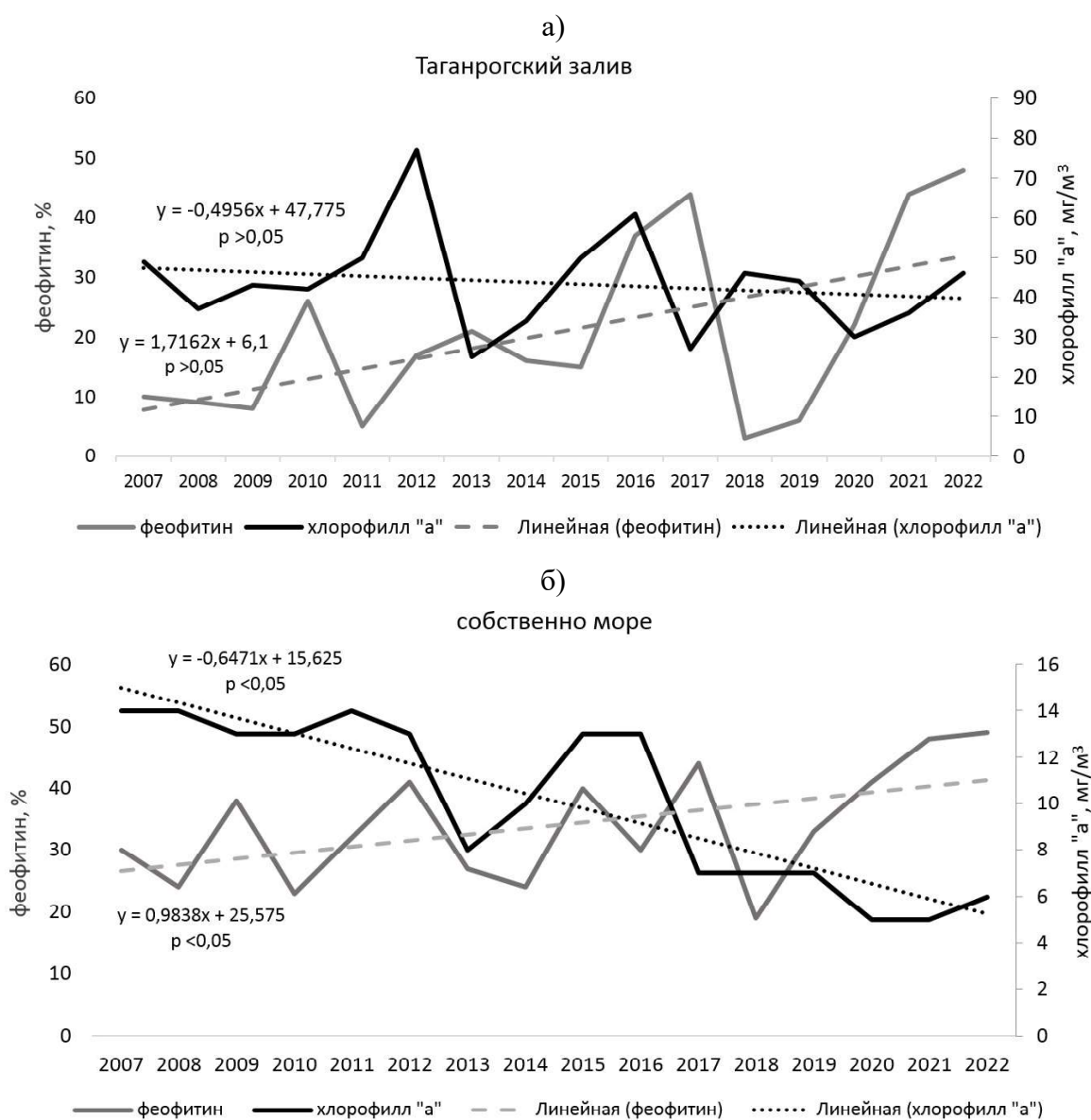


Рис. 3. Среднее содержание хлорофилла «а» и феофитина в клетках фитопланктона в Таганрогском заливе (а) и собственно море (б) в летний период 2002–2023 гг.

Fig. 3. Average content of chlorophyll “a” and pheophytin in phytoplankton cells in Taganrog Bay (a) and the Azov Sea excluding Taganrog Bay (б) in the summer season of 2002–2023

тоном обусловлен сменой доминирующих видов фитопланктона при повышении солености воды. В последние годы в Азовском море отмечается снижение продуктивности сообществ планктона. Высокопродуктивные зоны фито- и зоопланктона сохранились только в крайней восточной (распресненной) части Таганрогского залива. Наблюдается распространение гребневика *Mnemiopsis leidyi* в восточную часть Таганрогского залива (до изогалины 3,5 ‰). Кроме того, в 2018–2020 гг. в Азовском море отмечена вспышка развития корнерота [7].

Содержание в клетках феофитина четко отражает продукционный потенциал фитопланктона. Доля феофитина менее 40 % соответствует активному состоянию фитопланктона с высоким продукционным потенциалом. В диапазоне 40–65 % феофитина от общей суммы пигментов фитопланктон находится в угнетенном состоянии с пониженной физиологической активностью и низким продукционным потенциалом. При доле феофитина более 65 % клетки водорослей не обладают нужным для фотосинтеза потенциалом и отмирают. До 2017 г. доля феофитина на акватории Азовского моря не превышала 40 %. Высокие уровни содержания в клетках фитопланктона феофитина (до 49 %) в летний период 2021–2022 гг. отражают неблагоприятное физиологическое состояние фитопланктона, что неизбежно приводит к снижению уровня первичной продукции.

Несмотря на снижение стока р. Дон, дефицита биогенных элементов в Азовском море в современный период не наблюдается. Очевидно, это обусловлено ускорением рециклинга биогенных веществ в результате заморных явлений, при которых отмечается выход минеральных соединений азота, фосфора и кремния из донных отложений в воду [8]. За счет относительно повышенного стока р. Кубань, заморные явления на акватории собственно моря в последние годы в летний период развиваются по классическому сценарию при формировании стратификации водных масс по температуре и солености. В Таганрогском заливе заморные явления в условиях маловодья на Нижнем Дону формируются в основном за счет поступления легкоокисляемых органических веществ с речным стоком Дона и в результате локального антропогенного загрязнения [9].

В связи с вышеизложенным, на период 2024–2030 гг. прогнозируются следующие возможные изменения гидрохимического режима Азовского

моря при трех вариантах развития гидрометеорологических условий.

I сценарий (реалистичный, высоковероятный) — материковый сток в среднем за период до 2030 г. будет находиться на уровне 95%-ной обеспеченности для периода 1960–2022 гг. (сохранение маловодного периода с формированием стока рек Дон и Кубань суммарной величиной около 22 км³). Диапазон колебаний солености воды в собственно море (без учета Таганрогского залива) составит от 14,5 до 16,5 ‰. При данной сценарии будет происходить дальнейшее снижение первичного продуцирования органического вещества фитопланктоном. Тем не менее, возможно, произойдет адаптация экосистемы к росту солености воды и фитопланктон будет характеризоваться более благоприятным физиологическим состоянием в летний период года (как следствие, концентрация в клетках фитопланктона феофитина снизится). Зоны дефицита кислорода в собственно море при низкой водности р. Кубань могут не формироваться, а при сохранении водности р. Кубань на современном уровне — возникать в Темрюкском заливе и в центре собственно моря, что будет приводить к заморам камбалы-калкан, бычков и кормового зообентоса. В Таганрогском заливе заморные явления будут формироваться локально и зависеть от ветровой активности и уровня антропогенного загрязнения минеральными формами азота и фосфора. В среднесрочной перспективе прогноз на снижение вероятности формирования зон дефицита кислорода в Таганрогском заливе не оправдан по причине сохранения высокого антропогенного прессинга на акваторию как Таганрогского залива, так и р. Дон. Формирующиеся локальные зоны гипоксии в Таганрогском заливе будут представлять опасность для жизнедеятельности бычка и молоди рыб, что диктует необходимость прогноза заморных явлений. Дефицита биогенных элементов не ожидается, поскольку Азовское море представляет собой эвтрофный водоем с высоким базовым уровнем биогенного питания, снижение которого возможно только в условиях критического многолетнего маловодья рек Дон и Кубань [10]. Источниками биогенных соединений будут являться речной сток, внутриводоемные процессы (гипоксия в придонном горизонте, разложение отмершего органического вещества при завершении вегетационного периода, минерализация органических веществ в осенне-зимний период года), а также атмосферные осадки, турбулентное пере-

мешивание воды при ветровой активности и антропогенное загрязнение [11].

II сценарий (пессимистичный, маловероятный) — материковый сток до 2030 г. будет продолжаться сокращаться за счет увеличения безвозвратного водопотребления при увеличивающемся испарении с поверхности моря. Рост солености моря (без учета Таганрогского залива) продолжится до значений поверхностных вод Черного моря (17–18 ‰). Дефицит материкового стока и катастрофический рост солености воды приведут к значительным изменениям гидрохимического режима в частности и к трансформации структуры всех гидробиологических сообществ в целом. При рекордных значениях солености воды будет отмечаться дальнейшее снижение уровня первичной продукции и концентраций в воде органических форм азота и фосфора. На фоне низкого речного стока прогнозируется снижение содержания в воде биогенных веществ. Вероятность развития зон гипоксии снизится за счет отсутствия выраженной стратификации водных масс. Как следствие, не будет происходить пополнение водной массы биогенными веществами из донных осадков в летний период года в восстановительных условиях. Может возникнуть редкая гипотетическая ситуация, которая приведет к дефициту в Азовском море биогенных соединений как важнейших компонентов трофической цепи водной экосистемы.

III сценарий (оптимистичный, маловероятный) — материковый сток будет формироваться на уровне среднемноголетней величины периода 1960–2022 гг., равной 32 км³. В таких условиях среднегодовая соленость воды к 2030 г. может снизиться до уровня 14,8±0,22 ‰. При развитии настоящего сценария предполагается, что в экосистеме Азовского моря произойдут адаптационные изменения и уровень первичной продукции значимо не изменится относительно последних двух лет наблюдений либо незначительно увеличится. При данной сценарии биогенного питания будет достаточно для развития фитопланктона. При дальнейшем прогнозе повышенной водности Кубани зоны гипоксии на акватории собственно моря в летний период года будут возникать регулярно. Также прогнозируется возникновение заморных явлений в Таганрогском заливе. Данный факт необходимо учитывать при анализе условий среды обитания для придонных видов рыб на акватории Азовского моря.

При анализе собственных фондовых данных содержания приоритетных токсикантов в экосистеме Азовского моря установлено, что в период с 1986 г., когда наблюдался пик развития промышленности и антропогенной нагрузки на морскую экосистему, до настоящего времени в воде Азовского моря произошло снижение среднегодовой концентрации большинства контролируемых тяжелых металлов: марганца — в 40 раз, ртути — в 15 раз, железа — в 10 раз, свинца — в 4 раза, меди — в 3 раза, цинка и хрома — в 2 раза (рис. 4). Среднее содержание кадмия в течение всего периода наблюдений (более 35 лет) сохраняется на стабильно низком уровне (~0,10 мкг/л).

В донных отложениях Азовского моря за тот же временной отрезок отмечено снижение среднего содержания высокотоксичных мышьяка, ртути и кадмия в среднем в 2 раза. При этом зафиксировано увеличение концентраций цинка, хрома, никеля и меди также в среднем в 2 раза (рис. 5). Концентрации в донных осадках железа, марганца и свинца в течение всего периода наблюдений (1986–2022 гг.) сохраняются практически на одном уровне с незначительными флуктуациями [3, 12].

Содержание нефтепродуктов в воде Азовского моря от 1986 к 2022 г. понизилось в среднем в 2 раза, в донных отложениях — в 3 раза.

В течение 5 последних лет наблюдений стойкие хлорорганические пестициды (ХОП — производные ДДТ и гексахлорана) фиксируются в воде и донных отложениях Азовского моря крайне редко и в остаточных количествах. Таким образом, можно констатировать, что с 1986 г. к настоящему времени Азовское море практически очистилось от стойких ХОП.

Удельная активность цезия-137 фиксируется только в илистых донных осадках на незначительном уровне [13].

Несмотря на регулярные превышения ПДК по ряду показателей, в первую очередь по нефтепродуктам, все они носят локальный характер. Это свидетельствует о низком уровне токсической нагрузки, оказываемой средой обитания на водные биоресурсы в акватории Азовского моря в современный период.

Для рыбной промышленности и потребителей рыбной продукции важное значение имеют качество и безопасность рыбного сырья, которое добывается во время промысла. Кроме того, накапливаемые в рыбе и других водных биоресурсах

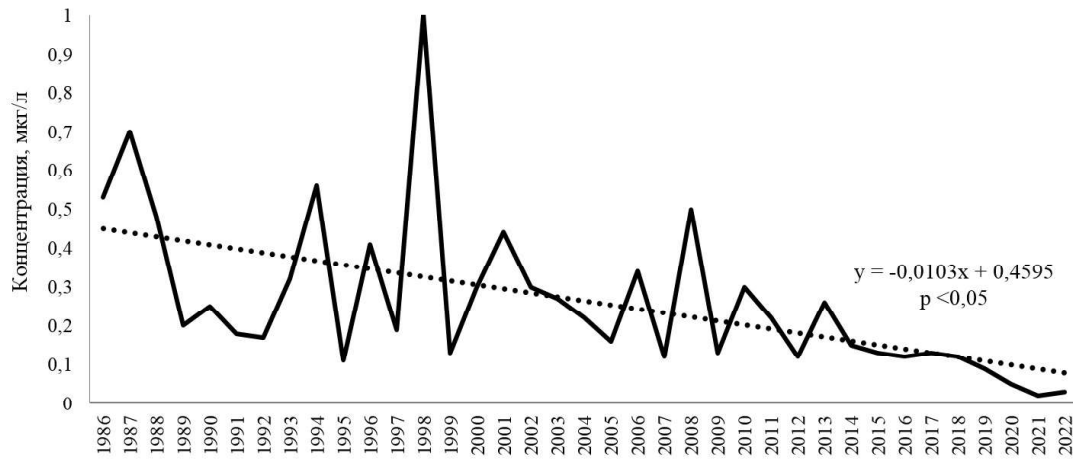


Рис. 4. Среднегодовая концентрация растворенной ртути в толще воды Азовского моря, 1986–2022 гг.
Fig. 4. Average annual concentration of dissolved mercury in the water column of the Azov Sea, 1986–2022

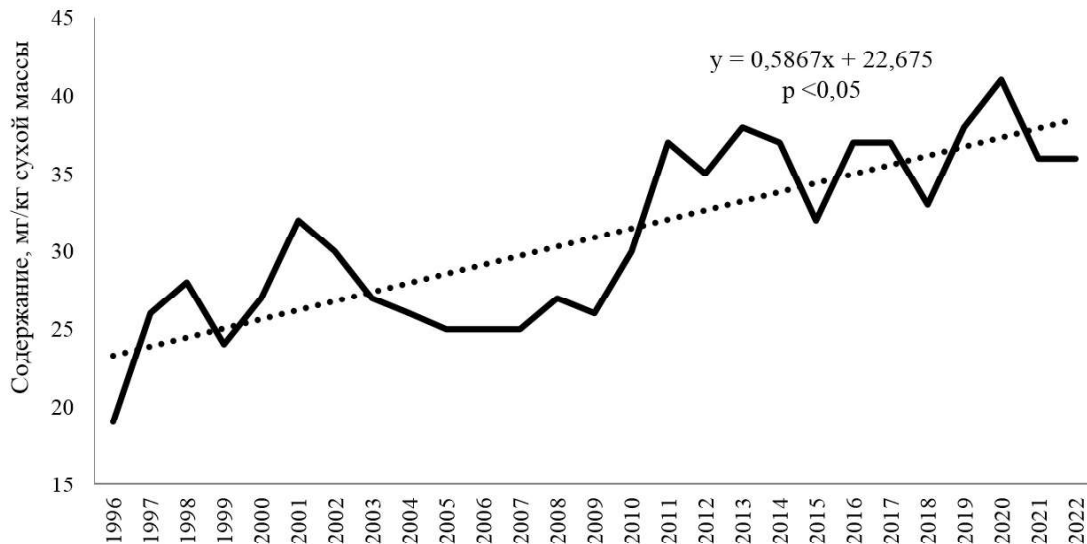


Рис. 5. Среднегодовое содержание меди в донных отложениях Азовского моря, 1996–2022 гг.
Fig. 5. Average annual copper content in the bottom sediments of the Azov Sea, 1996–2022

токсиканты негативно влияют на естественное воспроизводство популяций и восстановление промысловых запасов.

За последние 30 лет наблюдений уровень накопления цинка в мышцах промысловых видов водных биоресурсов Азовского моря снизился в среднем в 4 раза, в печени — в 3 раза, в гонадах — в 2 раза; меди в мышцах, печени и гонадах — в 2 раза, в жабрах — в 6 раз. Содержание кадмия, свинца и ртути в мышцах большинства промысловых видов водных биоресурсов сократилось в 6 раз, в камбале-калкан — в среднем в 2 раза, в хамсе и туюлке — в 20 раз [14, 15].

В кормовых бентосных организмах содержание цинка снизилось в среднем в 3 раза, меди — в 14 раз, свинца, кадмия и ртути — в 5 раз.

Удельная активность Cs^{137} , Sr^{90} и присутствие стойких ХОП в органах и тканях промысловых видов водных биоресурсов и в кормовом бентосе практически не фиксируются. Все эти результаты указывают на удовлетворительное качество потенциальных водных биоресурсов и свидетельствуют о возможности их безопасного использования в качестве важнейшего продовольственного ресурса.

На период 2024–2030 гг. прогнозируются следующие возможные изменения уровня антропоген-

ного загрязнения приоритетными токсикантами, а также качества и безопасности водных биоресурсов Азовского моря.

I сценарий (реалистичный, высоковероятный) — сохранение текущего уровня загрязнения. При сохранении существующего уровня развития промышленности и транспортного судоходства, а также добычи полезных ископаемых в бассейнах рек Дон и Кубань уровень загрязнения моря антропогенными токсикантами возможно прогнозировать как низкий, а в отдельных районах — Таганрогский залив, акватория Ейского морского порта, акватория Темрюкского морского порта — как умеренный. Уровень накопления токсичных металлов и стойких ХОП и удельная активность радионуклидов в промысловых видах водных биоресурсов будут низкими. Качество и безопасность водных биоресурсов как продукта питания останутся в пределах нормы.

II сценарий (пессимистичный, маловероятный) — увеличение текущего уровня загрязнения. Развитие промышленности, усиление химизации сельского хозяйства, добыча полезных ископаемых, в первую очередь нефти и газа, а также интенсификация судоходства неизбежно приведут к усугублению антропогенной нагрузки на водоем и к увеличению загрязнения акватории моря. В связи с гидрологическими особенностями, такими как достаточно низкий водообмен с Черным морем и высокая степень влияния стока рек Дон и Кубань, уровень загрязнения токсикантами в Азовском море может возрасти до умеренного, а в отдельных районах — до высокого. Может произойти расширение перечня загрязняющих веществ, в т. ч. за счет появления высокотоксичных. Уровень накопления токсичных элементов в промысловых видах ВБР возрастет, будут уверенно определяться ПХБ, но содержание стойких ХОП сохранится низким. При определенных условиях (например, в случае техногенных аварий на предприятиях ядерного цикла) возможен рост удельной активности радионуклидов. Качество водных биоресурсов как продукта питания по уровню накопления стойких ХОП и ПХБ и удельной активности радионуклидов может сохраниться нормальным по требованиям текущего норматива (ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» с изменениями на 14 июля 2021 г.); по накоплению токсичных элементов (мышьяк, свинец, кадмий, ртуть) возможны случаи превышения нормативов. Физиологическое состоя-

ние водных биоресурсов может иметь отклонения, прежде всего в аспектах репродуктивной функции, качества и выживаемости личинок и молоди рыб. Высокое содержание нефтепродуктов в воде может приводить к нарушениям дыхания рыб (вплоть до механической асфиксии), в донных осадках — оказывать негативное влияние на донные биоценозы и, как следствие, сказаться на кормовой базе. Локально возможно снижение качества водных биоресурсов вплоть до неприемлемого для промысла и опасного для употребления.

III сценарий (оптимистичный, маловероятный) — снижение текущего уровня загрязнения. Снижение уровня загрязнения возможно в связи с прекращением деятельности крупных промышленных предприятий, таких как «Азовсталь» [16]. Повышенная антропогенная нагрузка продолжит сохраняться в портовых акваториях и отдельных прилегающих районах моря. При снижении общего количества судопроходов по Донскому водному пути и судоходным каналам в море снизится и общий уровень загрязнения моря. В целом, среда обитания промысловых водных биоресурсов будет оставаться благоприятной для воспроизводства и формирования запасов. Качество и безопасность водных биоресурсов как продукта питания будут сохраняться на удовлетворительном уровне.

ВЫВОДЫ

1. На основании прогноза солёности воды и стока рек Дон и Кубань предложено 3 сценария развития гидрохимического режима Азовского моря до 2030 г. При наиболее вероятном сценарии (материковый сток в среднем будет находиться на уровне 95%-ной обеспеченности для периода 1960–2022 гг., солёность в собственно море составит 14,5–16,5 ‰) будет происходить дальнейшее снижение первичного продуцирования органического вещества фитопланктоном. Тем не менее, возможно, произойдет адаптация экосистемы к росту солёности воды и фитопланктон будет характеризоваться более благоприятным физиологическим состоянием в летний период года (как следствие, содержание в клетках фитопланктона феофитина снизится). Дефицита биогенных элементов не прогнозируется. Источниками биогенных соединений будут являться речной сток (в большей степени — р. Кубань), внутриводоемные процессы (гипоксия в

придонном горизонте, разложение отмершего органического вещества при завершении вегетационного периода, минерализация органических веществ в осенне-зимний период года), а также атмосферные осадки, турбулентное перемешивание воды при ветровой активности и антропогенное загрязнение.

2. На основании прогноза уровня антропогенной нагрузки предложено 3 сценария токсикологического состояния экосистемы Азовского моря. При сохранении существующего уровня развития промышленности и транспортного судоходства, а также добычи полезных ископаемых в бассейнах рек Дон и Кубань (наиболее вероятный сценарий) уровень загрязнения моря антропогенными токсикантами в Азовском море возможно прогнозировать как низкий, а в отдельных районах — Таганрогский залив, акватория Ейского морского порта, акватория Темрюкского морского порта — как умеренный. Уровень накопления токсичных металлов, стойких ХОП, ПХБ, удельной активности радионуклидов в промысловых видах водных биоресурсов будет низким. Качество и безопасность водных биоресурсов как продукта питания будут соответствовать нормативным требованиям.
3. Прогноз гидрохимических основ биологической продуктивности и токсикологической ситуации в Азовском море до 2030 г. может служить основой для оценки перспектив развития тех или иных видов рыболовства в условиях перестройки многовидовой сырьевой базы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарности Дудкину Сергею Ивановичу и Жуковой Светлане Витальевне за консультационную помощь в подготовке материалов, а также сотрудникам Аналитического испытательного центра — за сбор и обработку материалов.

ACKNOWLEDGEMENTS

We express our gratitude to Sergey Ivanovich Dudkin and Svetlana Vitalyevna Zhukova for their advisory assistance in the preparation of the materials, as well as to the personnel of the Analytical Testing Center for collection and processing of the samples.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердников С.В., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В. Климатические условия и гидрологический режим Азовского моря в XX – начале XXI вв. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2019. Т. 2, № 2: 7–19. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2019_2_2_7.
2. Косенко Ю.В., Баскакова Т.Е., Жукова С.В., Барабашин Т.О., Пятинский М.М. Влияние солености воды на развитие придонной гипоксии и уровень первичного продуцирования органического вещества в Таганрогском заливе. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2023. Т. 6, № 1: 34–47. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2023_6_1_34.
3. Кленкин А.А., Корпакова И.Г., Павленко Л.Ф., Темердашев З.А. Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение. Краснодар: Изд-во АЗНИИРХ, Просвещение-Юг, 2007. 323 с.
4. Барабашин Т.О., Кораблина И.В., Павленко Л.Ф., Скрыпник Г.В., Короткова Л.И. Методическое обеспечение мониторинга загрязнения водных объектов Азово-Черноморского бассейна. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2018. Т. 1, № 3–4: 9–27. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2018_1_3-4_9.
5. Практическое руководство по химическому анализу элементов водных экосистем. Приоритетные токсиканты в воде, донных отложениях, гидробионтах / под ред. Т.О. Барабашина. Ростов-н/Д.: Мини Тайп, 2018. 436 с.
6. 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: 137–143.
7. Афанасьев Д.Ф., Мирзоян З.А., Сафронова Л.М., Фроленко Л.Н., Живоглядова Л.А. Планктон и бентос Азовского моря. Многолетняя динамика. *Морские исследования и образование (MARESEDU-2020) : труды IX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 26–30 октября 2020 г.)*. Тверь: Поли-ПРЕСС, 2020. Т. 1 (3): 132–134.
8. 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: 75–81.
9. 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: 32–39. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2018_1_3-4_32.
10. 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.

11. Косенко Ю.В. Основные аспекты баланса биогенных элементов в Азовском море. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2019. Т. 2, № 4: 24–37. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2019_2_4_24.
 12. Кораблина И.В., Севостьянова М.В., Барабашин Т.О., Каталевский Н.И., Геворкян Ж.В., Евсеева А.И. Тяжелые металлы в экосистеме Азовского моря. *Вопросы рыболовства*. 2018. Т. 19, № 4: 509–522.
 13. Мхитарьян И.Д., Кораблина И.В. Оценка накопления цезия-137 донными отложениями и водными биоресурсами Азовского моря в современный период. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2020. Т. 3, № 3: 36–44. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2020_3_3_36.
 14. Кленкин А.А., Кораблина И.В., Корпакова И.Г. Тяжелые металлы в промысловых рыбах Азовского моря. *Вопросы рыболовства*. 2008. Т. 9, № 2 (34): 503–512.
 15. Кораблина И.В., Котов С.В., Барабашин Т.О. Азовская тарань как показатель антропогенного загрязнения экосистемы Азовского моря. *Труды ВНИРО*. 2019. Т. 178: 84–103. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2019-178-84-103>.
 16. Кораблина И.В. Изучение содержания хрома и его доминирующей формы в зоне влияния комбината «Азовсталь». *Оценка состояния, охрана и рациональное использование биологических ресурсов водных экосистем в условиях антропогенного воздействия*. Ростов-н/Д.: Изд-во АзНИИРХ, 1990: 15.
- Publ., *Prosveshchenie-Yug* [Awareness-South], 2007. 323 p. (In Russian).
4. Barabashin T.O., Korablina I.V., Pavlenko L.F., Skrypnik G.V., Korotkova L.I. Metodicheskoe obespechenie monitoringa zagryazneniya vodnykh ob"ektov Azovo-Chernomorskogo basseyna [Methodological support of pollution monitoring of the Azov and Black Seas water bodies]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya* [Aquatic Bioresources & Environment]. 2018. Vol. 1, no. 3–4: 9–27. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2018_1_3-4_9. (In Russian).
 5. Prakticheskoe rukovodstvo po khimicheskomu analizu elementov vodnykh ekosistem. Prioritetnye toksikanty v vode, donnykh otlozheniyakh, gidrobiontakh [Practice guidelines for chemical analysis of the components of aquatic ecosystems. Priority toxicants in water, bottom sediments, and hydrobionts]. T.O. Barabashin (ed.). Rostov-on-Don: Mini Tayp [Mini-Type], 2018. 436 p. (In Russian).
 6. 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)]. Novochoerkassk: Lik [LIC Information & Publishing Agency: Literature, Information, Culture], 2021: 137–143. (In Russian).
 7. Afanasyev D.F., Mirzoyan Z.A., Safronova L.M., Frolenko L.N., Zhivoglyadova L.A. Plankton i bentos Azovskogo morya. Mnogoletnyaya dinamika [Plankton and benthos of the Azov Sea. Long-term dynamics]. In: *Morskie issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU-2020) : trudy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Moskva, 26–30 oktyabrya 2020 g.)* [Marine Research and Education (MARESEDU-2020). Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference (Moscow, 26–30 October, 2020)]. Tver: PoliPRESS [PolyPRESS], 2020. Vol. 1 (3): 132–134. (In Russian).
 8. Aleksandrova Z.V., Bronfman A.M. Obmen biogennymi elementami v sisteme “voda–grunt” i ego rol' v formirovanii khimicheskikh osnov produktivnosti Azovskogo morya [Nutrient exchange in the water-bottom system and its role in formation of chemical bases of the Azov Sea productivity]. *Okeanologiya* [Oceanology]. 1975. Vol. 15, issue 1: 75–81. (In Russian).
 9. Kosenko Yu.V., Baskakova T.E., Kartamysheva T.B. Rol' stoka reki Don v formirovanii produktivnosti Taganrogskogo zaliva [Role of the Don River flow in

REFERENCES

1. Berdnikov S.V., Dashkevich L.V., Kulygin V.V. Klimaticheskie usloviya i gidrologicheskiy rezhim Azovskogo morya v XX – nachale XXI vv. [Climatic conditions and hydrological regime of the Sea of Azov in the XX – early XXI centuries]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya* [Aquatic Bioresources & Environment]. 2019. Vol. 2, no. 2: 7–19. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2019_2_2_7. (In Russian).
2. Kosenko Yu.V., Baskakova T.E., Zhukova S.V., Barabashin T.O., Pyatinskiy M.M. Vliyanie solenosti vody na razvitie pridonnoy gipoksii i uroven' pervichnogo produktsirovaniya organicheskogo veshchestva v Taganrogskom zalive [The influence of water salinity on generation of near-bottom hypoxic phenomena and the level of primary production of organic matter in Taganrog Bay]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya* [Aquatic Bioresources & Environment]. 2023. Vol. 6, no. 1: 34–47. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2023_6_1_34. (In Russian).
3. Klenkin A.A., Korpakova I.G., Pavlenko L.F., Temerdashev Z.A. Ekosistema Azovskogo morya: antropogennoe zagryaznenie [Ecosystem of the Sea of Azov: anthropogenic pollution]. Krasnodar: AzNIIRKH

- productivity formation of the Taganrog Bay]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya* [Aquatic Bioresources & Environment]. 2018. Vol. 1, no. 3–4: 32–39. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2018_1_3-4_32. (In Russian).
10. 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).
 11. Kosenko Yu.V. Osnovnye aspekty balansa biogenykh elementov v Azovskom more [Basic aspects of the biogenic elements balance in the Azov Sea]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya* [Aquatic Bioresources & Environment]. 2019. Vol. 2, no. 4: 24–37. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2019_2_4_24. (In Russian).
 12. Korablina I.V., Sevostyanova M.V., Barabashin T.O., Katalevskiy N.I., Gevorkyan Zh.V., Evseeva A.I. Tyazhelye metally v ekosisteme Azovskogo morya [Heavy metals in the ecosystem of the Azov Sea]. *Voprosy rybolovstva* [Problems of Fisheries]. 2018. Vol. 19, no. 4: 509–522. (In Russian).
 13. Mkhitaryan I.D., Korablina I.V. Otsenka nakopleniya tseziya-137 donnymi otlozheniyami i vodnymi bioresursami Azovskogo morya v sovremenny period [Assessment of caesium-137 accumulation in the bottom sediments and aquatic bioresources of the Azov Sea at the present time]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya* [Aquatic Bioresources & Environment]. 2020. Vol. 3, no. 3: 36–44. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2020_3_3_36. (In Russian).
 14. Klenkin A.A., Korablina I.V., Korpakova I.G. Tyazhelye metally v promyslovykh rybakh Azovskogo morya [Heavy metals in commercial fish of the Azov Sea]. *Voprosy rybolovstva* [Problems of Fisheries]. 2008. Vol. 9, no. 2 (34): 503–512. (In Russian).
 15. Korablina I.V., Kotov S.V., Barabashin T.O. Azovskaya taran' kak pokazatel' antropogennogo zagryazneniya ekosistemy Azovskogo morya [Azov roach as an indicator of pollution of the ecosystem of the Sea of Azov]. *Trudy VNIRO* [Proceedings of VNIRO]. 2019. Vol. 178: 84–103. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2019-178-84-103>. (In Russian).
 16. Korablina I.V. Izuchenie soderzhaniya khroma i ego dominiruyushchey formy v zone vliyaniya kombinata "Azovstal'" [Study of the content of chromium and its dominant form in the area influenced by the Azovstal Plant]. In: *Otsenka sostoyaniya, okhrana i ratsional'noe ispol'zovanie biologicheskikh resursov vodnykh ekosistem v usloviyakh antropogennogo vozdeystviya* [Status assessment, protection and rational exploitation of biological resources of aquatic ecosystems in the context of anthropogenic pressure]. Rostov-on-Don: AzNIIRKH Publ., 1990: 15. (In Russian).

Для цитирования: Косенко Ю.В., Кораблина И.В. Прогноз динамики первичной продукции органического вещества и загрязнения приоритетными токсикантами Азовского моря на краткосрочную перспективу. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2023. Т. 6, № 4: 31–42.

Об авторах:

Косенко Юлия Владимировна, кандидат биологических наук, начальник Аналитического испытательного центра Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Береговая, 21в), kosenkoyv@azniirkh.vniro.ru

Кораблина Ирина Владимировна, заведующая лабораторией аналитического контроля водных экосистем Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Береговая, 21в), ORCID 0000-0002-3995-9425, korablinaiv@azniirkh.vniro.ru

Поступила в редакцию 21.09.2023

Поступила после рецензии 03.11.2023

Принята к публикации 07.11.2023

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант.

Received 21.09.2023

Revised 03.11.2023

Accepted 07.11.2023

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.