



УДК 551.464.6(262.54)

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ БАЛАНСА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В АЗОВСКОМ МОРЕ

© 2019 Ю. В. Косенко

*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 статье представлены основные аспекты баланса биогенных веществ в Азовском море на основе литературных данных и собственных экспедиционных исследований, проведенных в современный период с 1998 по 2018 г. в разные сезоны года. Приведены корреляционные взаимосвязи основных факторов, влияющих на изменение содержания биогенных солей, и представлены сезонные аспекты динамики минеральных форм азота, фосфора и кремния. Установлено, что Таганрогский залив в большей степени подвержен влиянию стока р. Дон, а в собственно море существенную роль в балансе биогенных элементов играют внутриводоемные процессы. Важность влияния речного стока показана в обеспечении Таганрогского залива биогенными элементами; при этом существенную роль играет не только объем речного стока, но и общая антропогенная нагрузка на акваторию Нижнего Дона и Таганрогского залива. Придонная гипоксия в летний период года на акватории собственно моря обеспечивает обогащение водной толщи фосфатами и аммонийным азотом. При оценке баланса биогенных элементов в Азовском море необходимо учитывать также сезонные процессы минерализации органических веществ, скорость рециклинга биогенных соединений, жизненный цикл фитопланктона, скорость ветра над акваторией, формирование плотностной и кислородной стратификации водных масс, водообмен с Черным морем, седиментацию в донные отложения, вымывание с горных пород, поступление с атмосферными осадками. Все факторы, оказывающие воздействие на изменение концентраций в воде минеральных форм азота, фосфора и кремния, приведены в виде блок-схем.

Ключевые слова: Азовское море, азот аммонийный, азот нитритный, азот нитратный, фосфаты, кремниевая кислота, баланс биогенных элементов

BASIC ASPECTS OF THE BIOGENIC ELEMENTS BALANCE IN THE AZOV SEA

Yu. V. Kosenko

*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. This article presents the basic aspects of the dynamics of biogenic elements in the Azov Sea, based on literature data and our field research, conducted recently in different seasons of the year from 1998 to 2018.

Correlation relationships of the main factors, affecting the change in the content of biogenic salts, are presented, and seasonal aspects of the dynamics of the mineral forms of nitrogen, phosphorus and silicon are given. It has been established that the Taganrog Bay is affected by the Don River flow to a greater measure, and in the sea, the significant role in the dynamics of biogenic elements is played by intrabasin processes. The importance of the river flow influence is shown by the supply of biogenic elements to the Taganrog Bay, in which not only the volume of river flow but also the general anthropogenic pressure on the Lower Don and the Taganrog Bay area are crucial factors. Bottom hypoxia in the summer season plays a prominent role in enriching the water column with phosphates and ammonium nitrogen. In estimation of the dynamics of biogenic elements in the Azov Sea, the seasonal processes of mineralization of organic substances, the rate of recycling of biogenic compounds, life cycle of phytoplankton, wind speed over the sea surface, formation of density and oxygen stratification of water masses, water exchange with the Black Sea, bottom sedimentation, outwashing from rock material, and introduction of elements with atmospheric precipitations should also be taken into account. All factors, affecting the change in the concentration of mineral forms of nitrogen, phosphorus and silicon in water, are given in the form of flowcharts.

Keywords: Azov Sea, ammonium nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen, phosphates, silicic acid, balance of biogenic elements

ВВЕДЕНИЕ

Биогенные элементы, представленные минеральными соединениями азота, фосфора и кремния, являются материальной базой создания первичной продукции. Уровень концентраций указанных элементов и их соотношение регулируют жизнедеятельность фитопланктона — первого и важнейшего звена трофической цепи водной экосистемы [1]. Минеральные формы азота, фосфора и кремния, являясь материальной базой фотосинтеза, обеспечивают биологическую продуктивность и рыбохозяйственную значимость Азовского моря. При этом их избыток приводит к негативным последствиям, а именно — к гиперэвтрофикации воды.

Азовское море отличается высокой трофностью, мелководностью, повышенной скоростью рецилинга биогенных веществ, своеобразным кислородным режимом, что определяет уникальные особенности динамики биогенных веществ [2]. Кроме того, Азовское море по физико-географическим и гидрологическим признакам разделяется на два района — собственно море, считающееся, по мнению некоторых исследователей, придаточным водоемом Черного моря, и Таганрогский залив, являющийся эстуарием реки Дон [3, 4]. Средний уровень концентраций биогенных веществ в Таганрогском заливе существенно выше, чем в собственно море; в т. ч. в восточной части залива биогенных соединений больше, чем в центральном и западном районах. В собственно море наименьшие концентрации биогенных солей отмечаются в западном и прикубанском районах [2].

Таким образом, поскольку количество биогенных веществ определяет первичную продуктивность Азовского моря, очень важно рассмотреть все источники поступления биогенных элементов и все причины их убыли в экосистеме моря. В связи с вышесказанным, целью нашего исследования явилось комплексное обобщение данных о балансе биогенных веществ в Азовском море на основе литературных данных и собственных экспедиционных исследований, проведенных за последние 20 лет.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования Азовского моря были проведены в весенний (апрель), летний (июль–август) и осенний (октябрь) периоды года. В статье представлены результаты гидрохимических исследований за период 1998–2018 гг. Отбор проб воды осуществлялся на 32 стандартных станциях, охватывающих всю акваторию собственно моря и Таганрогского залива (рис. 1).

Отбор проб воды проводили батометром Нискина или ГР-18 с поверхностного (верхний 0,5 м слой) и придонного (нижний 0,5 м слой) горизонтов согласно ГОСТ 17.1.5.05-85 и ГОСТ 31861-2012. Гидрохимический анализ включал определение концентрации растворенного кислорода [5], аммонийного азота [6], нитритного азота [7], нитратного азота [8], фосфатов [9] и кремниевой кислоты [10].

Статистическая обработка результатов гидрохимических исследований проведена с использованием программ Statistica 6.0 и Excel.



Рис. 1. Расположение станций мониторинга на акватории Азовского моря

Fig. 1. Location of monitoring stations in the Azov Sea area

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Минеральные соединения азота представлены тремя формами — азотом аммонийным, нитритным и нитратным. Нитриты являются неустойчивыми компонентами природных вод, в окислительных условиях они быстро окисляются до нитратов, в восстановительных — восстанавливаются до аммония. В незагрязненных поверхностных водах нитриты присутствуют в незначительных количествах (до 10 мг/м^3). В Азовском море за весь период наблюдений (с 1959 г.) средняя концентрация азота нитритного в водной толще не превышала нижнего предела определения по методике измерений ($<5 \text{ мг/м}^3$), поэтому динамика данного биогенного элемента не является важным звеном в формировании биологической продуктивности Азовского моря.

Основной вклад в минеральную форму азота в Азовском море вносит азот аммонийный, — его высокое содержание в воде является специфической особенностью моря. В периоды полного отсутствия нитратов в толще воды солевой аммиак является основным источником азотистого питания микроводорослей [11].

Содержание аммонийного азота в Азовском море зависит от ряда факторов. Степень зависимости аммония от речного стока неоднозначна. Одни

авторы [12] указывают на отрицательную взаимосвязь концентрации аммонийного азота в Азовском море от суммарного среднегодового речного стока, другие [13] подчеркивают важность биогенного состава стока рек в обогащении воды аммонием. В нашем исследовании не установлено достоверной и значимой корреляционной зависимости объема стока р. Дон и концентрации аммонийного азота в водной толще Таганрогского залива ($r=0,34$) и собственно моря ($r=0,01$). Тем не менее, вопрос взаимосвязи концентрации аммонийного азота в Азовском море от объема речного стока остается открытым, поскольку первоочередную роль может играть именно состав речного стока, в частности, антропогенное загрязнение воды аммонийной формой азота.

В настоящее время не подлежит сомнению важность влияния внутриводоемных процессов на уровень содержания в воде Азовского моря аммонийного азота. Классические гидрохимические исследования второй половины XX века [1, 14, 15] достоверно показывают роль придонной гипоксии в летний период года в обогащении водной толщи аммонийным азотом.

Анализ литературных данных свидетельствует, что при естественном режиме моря и в начальные фазы его антропогенного преобразования развитие

придонного дефицита кислорода было явлением эпизодическим. В дальнейшем, с начала 1960-х гг., возникновение значительных зон недостаточного насыщения воды кислородом у дна стало практически ежегодным явлением на акватории моря [14]. Анализ гидрометеорологической информации, проведенный рядом авторов [16–18], показал, что после 1961 г. в районе восточного Приазовья отмечено значительное снижение скорости ветра на 21–44 % относительно периода наблюдений с 1910 по 1960 г. Кроме того, повышение солености в современный период обуславливает дополнительное увеличение вертикальной устойчивости водных масс и, как следствие, формирование кислородной стратификации в Азовском море [19]. Заморам особенно подвержены районы Азовского моря, имеющие илистый характер донных отложений, богатых органическими соединениями [20]. Кроме того, повышенное образование автохтонного органического вещества, на разложение которого расходуется кислород, также является одной из причин формирования анаэробных условий в Азовском море [21]. При снижении концентрации кислорода ниже $2,0 \text{ мг/дм}^3$ отмечено формирование восстановительных условий в толще воды и верхнем слое донных отложений. Восстановительная ситуация у дна приводит к активации анаэробных микроорганизмов, разлагающих органические вещества до аммония и минеральных фосфатов [22]. Следует отметить, что акватория Таганрогского залива в значительно меньшей степени подвержена заморным явлениям в силу особенностей гидрологического режима и состава донных отложений [1].

Нашими исследованиями показано, что на акватории собственно моря установлена отрицательная корреляционная взаимосвязь средней концентрации аммонийного азота от степени насыщения воды кислородом в летний период года в придонном горизонте ($r=-0,71$; $R^2=0,51$) за период 1998–2018 гг. При этом на акватории Таганрогского залива значимой корреляционной взаимосвязи данных параметров не выявлено. Однако при детальном анализе показано, что при низком среднегодовом объеме донского стока ($13\text{--}18 \text{ км}^3$) выявлена отрицательная корреляционная взаимосвязь концентрации аммонийного азота и уровня насыщения воды кислородом в придонном слое ($r=-0,86$; $R^2=0,74$). Данный факт связан с развитием обширных заморных зон в придонном горизонте в некоторые годы при низком стоке р. Дон [23]. Следует также отметить, что если

в среднемногогодные по донскому стоку ($19\text{--}28 \text{ км}^3$) годы за период 1998–2018 гг. площадь заморных зон на акватории Таганрогского залива не превышала $2,1 \text{ км}^2$, то в маловодные — достигала $4,8 \text{ км}^2$.

Низкая ветровая активность над акваторией моря способствует не только формированию стратификации водных масс по кислороду и развитию придонной гипоксии, как было сказано выше, но и усиливает процессы фиксации азота микроорганизмами из атмосферы [24–26]. Показано, что концентрация аммония в водах Азовского моря в целом и Таганрогского залива в частности повышается в периоды понижения ветровой активности ($r=-0,56$) [12].

Одним из факторов пополнения аммонийного азота в Азовском море являются атмосферные осадки. Содержание биогенных веществ в атмосферных осадках изменяется в широком диапазоне в зависимости от предшествующей метеорологической ситуации, происхождения воздушных масс, их переноса и других факторов. В силу вышесказанного концентрация ионов аммония в атмосферных осадках варьирует в достаточно широком диапазоне — от 100 до 870 мг/м^3 [27].

Потребление аммонийного азота наблюдается в процессе фотосинтеза фитопланктона [4]. Аммонийные ионы в водной среде в присутствии кислорода легко подвергаются биохимическому и фотохимическому окислению до нитритов (I стадия нитрификации), а затем до нитратов (II стадия нитрификации). Снижение в воде Азовского моря аммонийной формы азота обусловлено также выносом аммония в атмосферу при высокой ветровой активности [24]. В силу двустороннего водообмена Азовского и Черного морей уровень аммонийного азота в районе Керченского предпроливья также подвержен воздействию данного гидрологического фактора [1].

Блок-схема круговорота азота аммонийного в экосистеме Азовского моря представлена ниже (рис. 2).

Сезонные колебания концентрации аммония обусловлены его повышением в осенний период года ($p<0,05$ относительно весеннего периода) в связи с усилением процессов бактериального разложения органических веществ в периоды отмирания водных организмов, особенно в зонах их скопления: в придонном слое водоема и в слоях повышенной плотности фито- и бактериопланктона. Кроме того, в осенне-зимний период увеличение

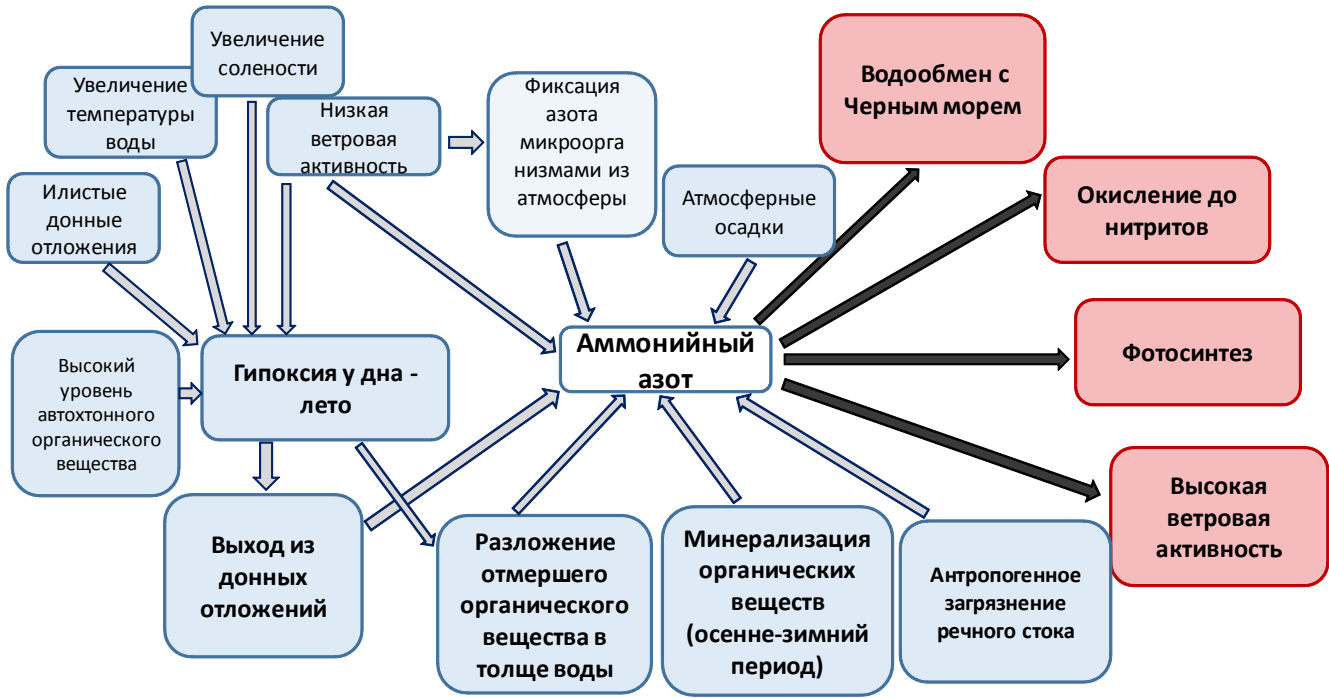


Рис. 2. Влияние разных факторов на содержание аммонийного азота в воде Азовского моря
Fig. 2. The influence of various factors on the content of ammonium nitrogen in the water of the Azov Sea

азота аммонийного связано с продолжающейся минерализацией органических веществ в условиях слабого потребления фитопланктоном и уменьшения скорости биохимического окисления при низких температурах воды. В весенний и летний периоды аммонийный азот в собственно море и Таганрогском заливе активно потребляется фитопланктоном (рис. 3).

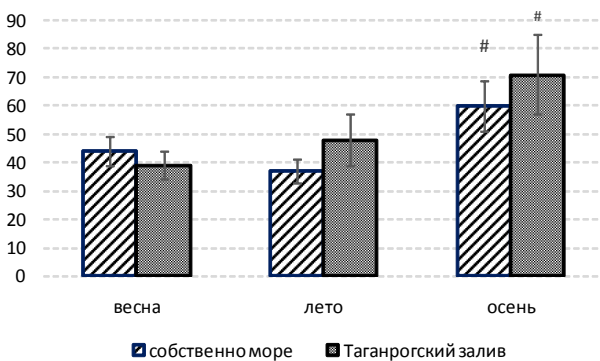


Рис. 3. Сезонная динамика средней концентрации аммонийного азота на акватории Азовского моря за период 1998–2018 гг., мг/м³. # — отличия достоверны относительно весеннего периода

Fig. 3. Seasonal dynamics of the average concentration of ammonium nitrogen in the water of the Azov Sea in 1998–2018, mg/m³. # — differences are statistically significant relative to the spring season

Концентрация в Азовском море азота нитратного в значительной степени определяется его поступлением со стоком рек Дон и Кубань [12]. За период 1998–2018 гг. среднегодовая концентрация нитратного азота на акватории Таганрогского залива коррелирует со среднегодовым стоком р. Дон $r=0,64$ ($R^2=0,41$); тем не менее, относительно невысокая установленная прямая корреляционная взаимосвязь обусловлена тем, что Таганрогский залив в силу физико-географических и экономических факторов в большей мере, чем акватория собственно моря, подвержен антропогенному воздействию [15]. Нашими исследованиями показаны также высокие концентрации нитратного азота в воде Таганрогского залива в весенний период 1998, 2006 и 2014 гг., что не исключает антропогенный характер их поступления.

В условиях слабой динамики вод более активно протекают процессы фиксации азота из атмосферы, что ведет к увеличению концентрации в воде минеральных форм азота в целом и нитратного азота в частности [24–26]. Между содержанием нитратов и скоростью ветра в весенне-летний период для Азовского моря установлена статистически значимая корреляция $r=-0,45$ [12].

Немаловажную роль в пополнении Азовского моря нитратным азотом играют атмосферные осад-

ки, содержание нитратов в которых составляет в среднем 200 мг/м³ [27].

Значительное влияние оказывает также обмен нитратов через Керченский пролив. Показано, что при стоке воды через Керченский пролив в объеме 49,8 км³ в Черное море в среднем ежегодно выно-

сится 55,3 тыс. т соединений азота и 4,0 тыс. т фосфора. Среди расходных частей баланса минеральных форм азота важная роль принадлежит захоронению их в грунт — около 61,3 тыс. т в год [1].

Блок-схема круговорота азота нитратного в экосистеме Азовского моря представлена на рис. 4.

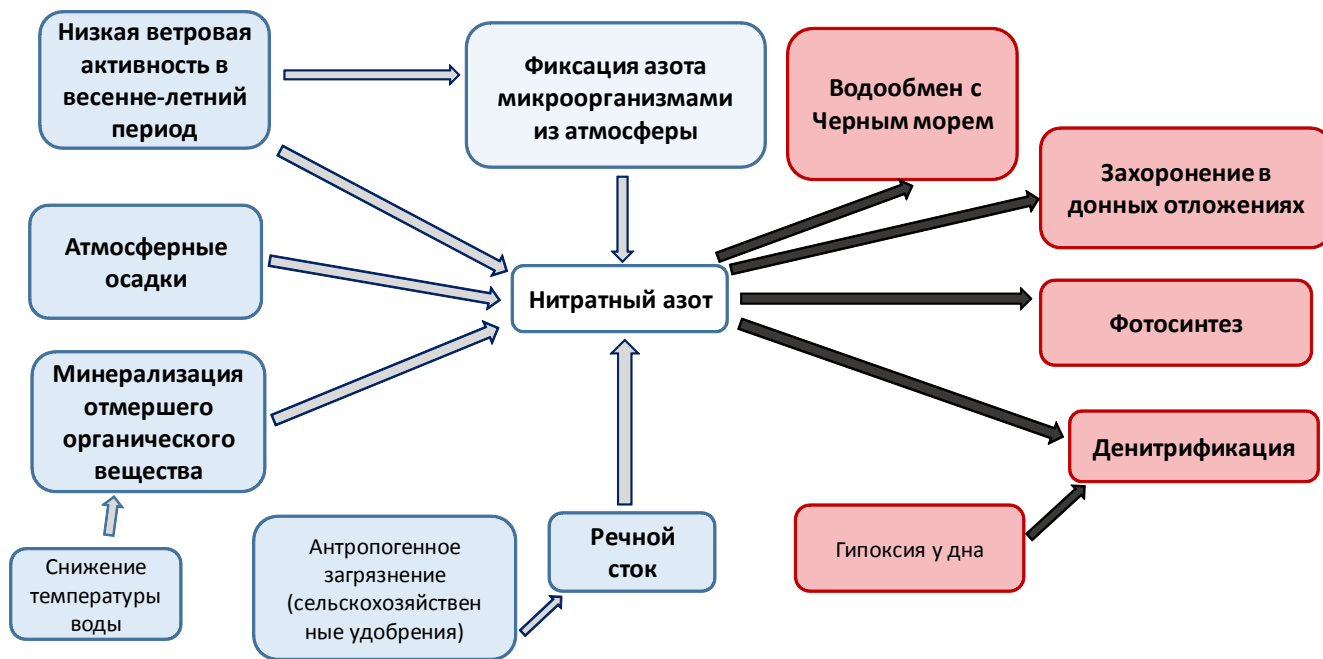


Рис. 4. Влияние разных факторов на содержание нитратного азота в воде Азовского моря

Fig. 4. The influence of various factors on the content of nitrate nitrogen in the water of the Azov Sea

Уменьшение концентрации нитратов наблюдается в вегетационный период за счет их потребления водными растениями. Поскольку нитратный азот является конечным продуктом минерализации органических азотсодержащих веществ, то при пониженных температурах воды в осенний период года отмечено увеличение их концентрации ($p < 0,05$ относительно весеннего и летнего периодов), что четко проявляется на акватории собственно моря. В Таганрогском заливе за период 1998–2018 гг. высокая средняя концентрация нитратного азота весной обусловлена их локальным повышением в водной толще в 1998 г. (230 мг/м³), 2006 г. (252 мг/м³) и 2014 г. (156 мг/м³) в восточном районе залива (рис. 5).

Фосфаты относятся к числу биогенных элементов, имеющих особое значение для развития жизни в водных объектах. Соединения фосфора встречаются во всех живых организмах и регулируют энергетические процессы клеточного обмена [28].

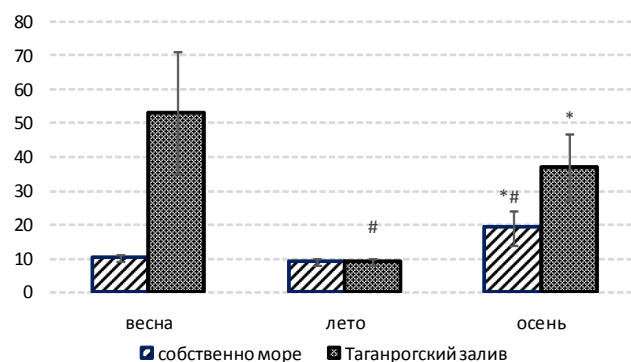


Рис. 5. Сезонная динамика средней концентрации нитратного азота на акватории Азовского моря за период 1998–2018 гг., мг/м³. * — отличия достоверны относительно летнего периода; # — отличия достоверны относительно весеннего периода

Fig. 5. Seasonal dynamics of the average concentration of nitrate nitrogen in the water of the Azov Sea in 1998–2018, mg/m³. * — differences are statistically significant relative to the summer season; # — differences are statistically significant relative to the spring season

Содержание в природных водах минерального фосфора является определяющим фактором их продуктивности.

Важная роль в пополнении запасов минерального фосфора в водной толще Азовского моря принадлежит двустороннему обмену с донными отложениями [1, 14, 15]. По современным представлениям, обмен фосфором между донными осадками и покрывающими их водами есть явление интегральное, включающее в себя следующие процессы:

- переход в воду части фосфора, освобождающегося при регенерации седиментированного органического вещества. Скорость регенерации фосфора в Азовском море пропорциональна количеству органического вещества в осадках, причем в процессах его распада ведущая роль принадлежит анаэробным реакциям [22, 29];
- десорбция фосфора из грунтовых растворов поверхностного слоя осадка в анаэробных условиях. Этот процесс осуществляется либо путем концентрационной диффузии, либо в результате растворения фосфора, адсорбированного на железоорганическом комплексе седиментированных взвесей [1].

За последние 20 лет наблюдений (1998–2018 гг.) на акватории собственно моря установлена обратная концентрационная взаимосвязь концентрации фосфатов с уровнем насыщения воды кислородом в придонном горизонте ($r=-0,72$; $R^2=0,51$). В Таганрогском заливе данных корреляционных зависимостей не выявлено, что подчеркивает важную роль внутриводоемных факторов в формировании химических основ биопродуктивности на акватории собственно моря.

Важная роль в пополнении запасов минерального фосфора принадлежит речному стоку, причем в Таганрогском заливе отмечена взаимосвязь со стоком р. Дон (весенний период), а в собственно море — со стоком р. Кубань (летний период). Исследованиями Г.Г. Матишова с соавт. (2006) и Ю.М. Гаргопы (2003) показана корреляционная взаимосвязь $r=0,27$ за два последних года суммарного объема речного стока и концентрации фосфатов в Азовском море. Нашими исследованиями показано, что в Таганрогском заливе корреляционная взаимосвязь концентрации в воде фосфатов от объема стока р. Дон составляет $r=0,56$ ($R^2=0,31$) для среднегодовых концентраций и $r=0,65$ ($R^2=0,42$) для концентраций в весенний период года. Таким образом,

тесной корреляционной взаимосвязи содержания в воде фосфатов от объема стока р. Дон в Таганрогском заливе не установлено. Тем не менее, следует учитывать, что значительное количество фосфатов поступает с промышленными, бытовыми и сельскохозяйственными сточными водами, в силу чего важным фактором является не только объем, но и биогенный состав речного стока.

Среди важнейших абиотических факторов, влияющих на содержание фосфатов в Азовском море, необходимо отметить скорость ветра. Положительное влияние турбулентного перемешивания воды на содержание фосфатов в водах Азовского моря отмечал еще В.Г. Дацко [30]. Между содержанием фосфатов в водах Таганрогского залива и среднегодовой скоростью ветра корреляция положительна и значима ($r=0,36$) [12]. Данный факт объясняется усилением взмучивания донных отложений, абразией берегов, а также увеличением поступления биогенных элементов в периоды пыльных бурь [30]. Кроме того, в условиях повышенной ветровой активности возрастает перенос взвешенных веществ из Таганрогского залива, устьевых зон Дона и Кубани в открытую часть собственно моря. Однако исследованиями Ю.М. Гаргопы [31] показана отрицательная связь между содержанием минерального фосфора в Азовском море и скоростью ветра над его акваторией ($r=-0,43$). Автор объясняет данный факт тем, что при низких скоростях ветра увеличивается повторяемость штилей, способствующих возникновению анаэробных условий в придонных слоях Азовского моря, что приводит к увеличению концентрации фосфатов в водной толще.

Атмосферные осадки вносят незначительный вклад в пополнение запасов фосфора в Азовском море, поскольку, в отличие от соединений азота, источником фосфора служит не атмосфера, а горные породы и другие отложения, образовавшиеся в прошлые геологические эпохи [32, 33].

Факторами, приводящими к снижению концентрации минеральных фосфатов в Азовском море, являются седиментация фосфатов в донные отложения [29], их потребление фитопланктоном в процессе фотосинтетической деятельности, а также вынос фосфатов в Черное море через Керченский пролив. Рассчитано, что при стоке воды через Керченский пролив в объеме $49,8 \text{ км}^3$ в Черное море ежегодно выносятся $4,0$ тыс. т фосфора [1].

Блок-схема круговорота фосфатов в экосистеме Азовского моря представлена ниже (рис. 6).

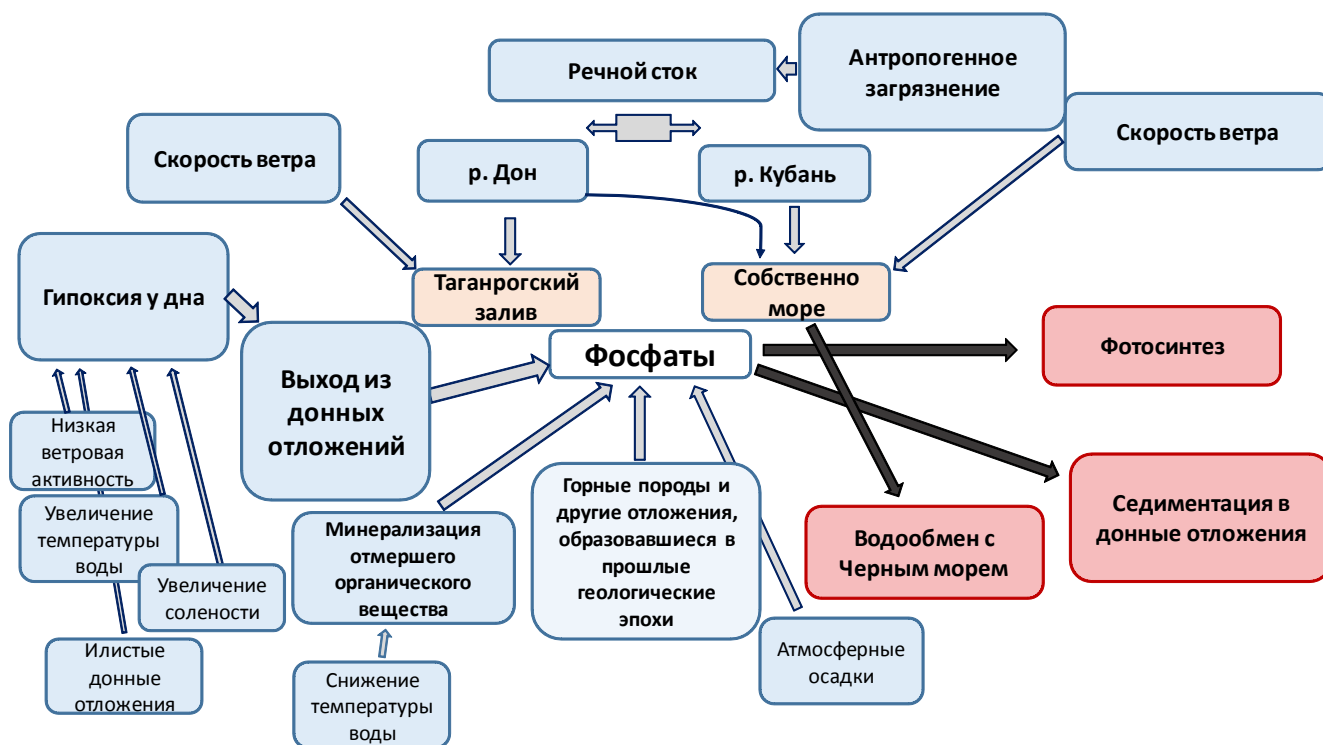


Рис. 6. Влияние разных факторов на содержание фосфора минерального в воде Азовского моря
Fig. 6. The influence of various factors on the content of mineral phosphorus in the water of the Azov Sea

Сезонная динамика концентрации фосфатов в собственно море (за период 1998–2018 гг.) характеризуется их высокими концентрациями в летний период, в связи с выходом фосфатов из донных отложений в условиях придонной гипоксии, а также в осенний период, что связано с начинающимися процессами минерализации органических соединений. Относительно весеннего периода на акватории собственно моря за последние 20 лет отмечено достоверное увеличение концентрации фосфатов в летний ($p < 0,001$) и осенний ($p < 0,01$) сезоны. В Таганрогском заливе в период 1998–2018 гг. концентрации фосфатов, в целом, были выше, чем на акватории собственно моря. Увеличение концентрации фосфатов также отмечено в летний и осенний периоды. При этом в Таганрогском заливе существенная роль в обогащении фосфатами в летнее время года отводится не столько гипоксии, сколько высокой оборачиваемости минерального фосфора и его поступлению в воду при разложении синезеленых водорослей [34]. В силу вышесказанного, высокие концентрации фосфатов в летний период года отмечаются в восточном и центральном районах залива, т.е. в месте ареала синезеленых водорослей. При анализе фосфатов в воде

Таганрогского залива следует также учитывать и антропогенную составляющую (рис. 7).

Кремний является одним из самых распространенных элементов земной коры и входит в состав большого числа природных минералов, вследствие чего он постоянно присутствует в природных водах. Кремний является биогенным элементом и

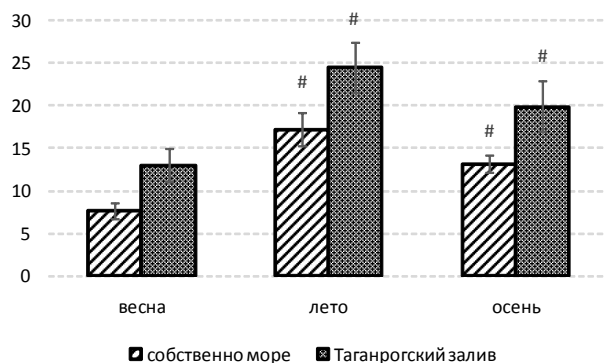


Рис. 7. Сезонная динамика средней концентрации фосфатов на акватории Азовского моря за период 1998–2018 гг., мг/м³. # — отличия достоверны относительно весеннего периода

Fig. 7. Seasonal dynamics of the average concentration of phosphates in the waters of the Azov Sea in 1998–2018, mg/m³. # — differences are statistically significant relative to the spring season

участвует в формировании тел живых организмов (главным образом, в построении скелета диатомовых водорослей).

Существенное количество кремния поступает в воды Азовского моря с речным стоком. Между многолетними изменениями концентрации растворенной кремниевой кислоты в водах Таганрогского залива и аналогичными колебаниями среднегодового стока реки Дон существует значимая корреляция $r=0,44$ [12]. В собственно море существенный вклад в содержание в воде кремния вносит сток р. Кубань. Значительное пополнение запасов кремния в Азовском море в период от апреля к июлю обусловлено его регенерацией из отмерших панцирей диатомовых водорослей [4]. Немаловажным фактором, приводящим к увеличению концентрации кремния в

собственно море, является придонная гипоксия в летний период года [28]. В исследованиях Ю.М. Гаргопы [30] показано, что ветровая активность оказывает положительное влияние на содержание кремниевой кислоты в водах Азовского моря ($r=0,30-0,49$).

Основным источником потребления кремниевой кислоты являются диатомовые водоросли, использующие минеральный кремний для построения панцирей, поэтому в периоды их интенсивного развития (весенний и осенний периоды года) содержание кремния в воде Азовского моря резко снижается. Следует также отметить, что по мере накопления растворенные формы кремния могут частично коагулировать и выпадать в осадок [28].

Блок-схема круговорота кремниевой кислоты в экосистеме Азовского моря представлена на рис. 8.

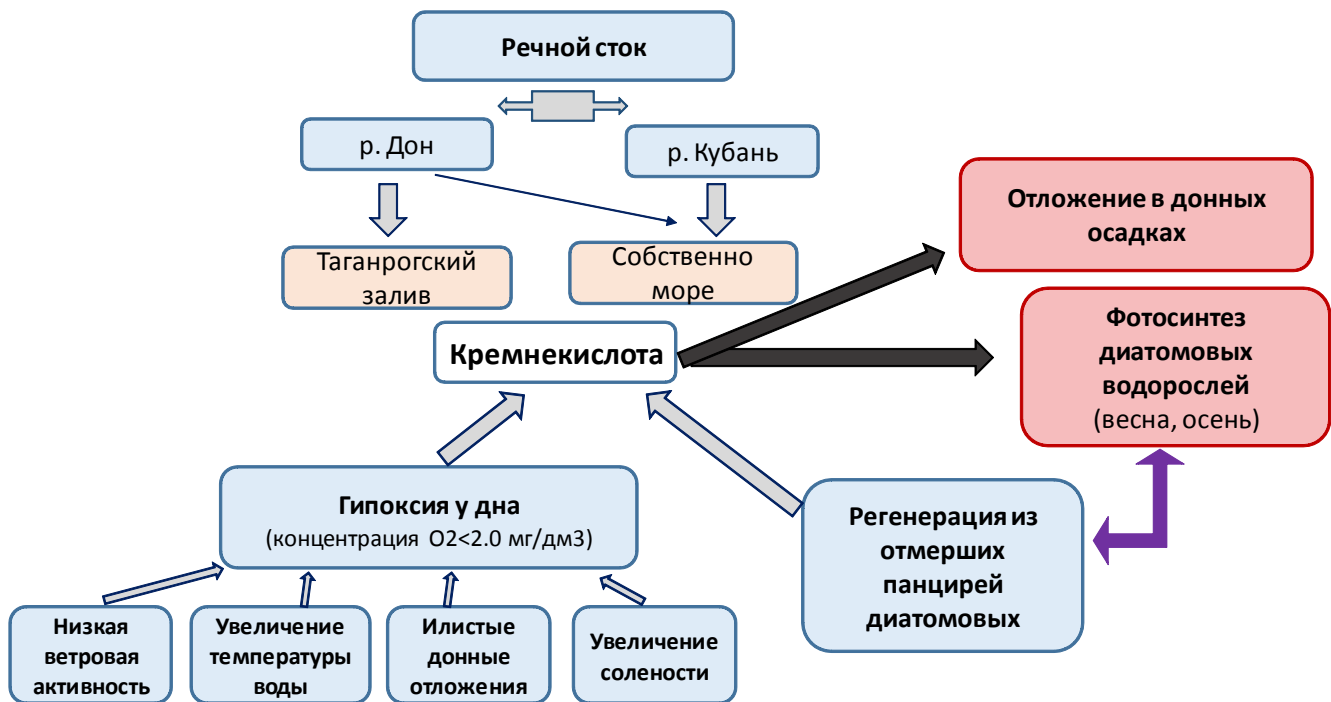


Рис. 8. Влияние разных факторов на содержание кремниевой кислоты в воде Азовского моря

Fig. 8. The influence of various factors on the content of silicic acid in the water of the Azov Sea

При рассмотрении сезонной динамики данного показателя было отмечено, что в весенний период года (апрель) наблюдается истощение запаса кремниевой кислоты в собственно море ниже лимитирующего уровня развития диатомей — 500 мг/м^3 . Вспышка в развитии диатомовых водорослей в Азовском море наблюдается в марте; в апреле их биомасса уже значительно снижается, однако регенерации кремния еще не наблюдается [4]. В летний период года концентрация кремниевой кислоты высокая, что

связано с ее регенерацией из отмерших панцирей диатомей и выходом минерального кремния из донных осадков при гипоксии. В осенний период года (октябрь) уровень минерального кремния в собственно море, как правило, снижается, что обусловлено началом второй вспышки «цветения» диатомовых водорослей (рис. 9).

Среднее значение кремниевой кислоты в воде Таганрогского залива значительно выше ($p < 0,001$) по сравнению с собственно морем. Данный факт

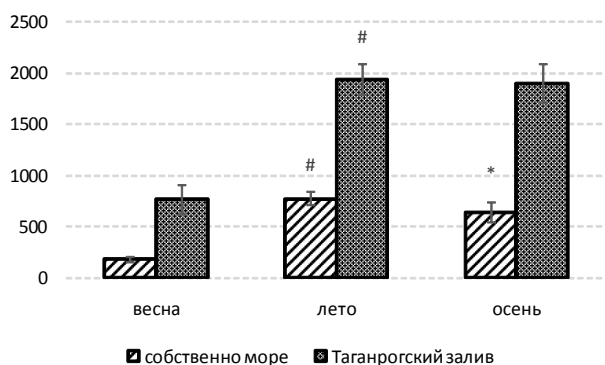


Рис. 9. Сезонная динамика средней концентрации кремниевой кислоты на акватории Азовского моря за период 1998–2018 гг., мг/м³. * — отличия достоверны относительно летнего периода; # — отличия достоверны относительно весеннего периода

Fig. 9. Seasonal dynamics of the average concentration of silicic acid in the water of the Azov Sea in 1998–2018, mg/m³. * — differences are statistically significant relative to the summer season; # — differences are statistically significant relative to the spring season

обусловлен тем, что в Таганрогском заливе биомассы диатомовых водорослей — основных потребителей кремниевой кислоты — значительно ниже, чем в собственно море. В восточном и центральном районах залива, подверженных влиянию донского стока, преобладающими являются синезеленые водоросли, не использующие кремний для своего развития [4].

Изучение динамики и концентрации биогенных элементов имеет важное значение для оценки продукционных процессов в Азовском море. В исследованиях С.С. Баславской [35] показано, что низкая концентрация в воде минерального азота снижает содержание хлорофилла «а» в клетках фитопланктона, ослабляя процесс фотосинтеза. Согласно литературным данным, концентрация субстрата, достаточная для достижения половины максимальной скорости роста (коэффициент насыщения), для океанических видов фитопланктона соответствует содержанию NO₃ — 1,4–7,0 мг/м³, NH₄ — 1,4–5,6 мг/м³, а для неретических диатомей — 6,3–28,0 и 7,0–120,0 мг/м³, соответственно [36]. Интенсивная вегетация пиропитовых в Азовском море отмечается при достижении концентрации минеральных форм азота и фосфора 22,0 и 5,5 мг/м³, соответственно. При концентрации минерального фосфора 0,5 мг/м³ «цветение воды» прекращается [4]. Опти-

мальные условия для развития диатомовых водорослей требуют концентрации кремниевой кислоты не ниже 500 мг/м³ [37].

ВЫВОДЫ

1. Таганрогский залив в большей степени подвержен влиянию стока р. Дон, а в собственно море существенную роль в балансе биогенных элементов играют внутриводоемные процессы.
2. Важность влияния речного стока показана в обеспечении Таганрогского залива биогенными элементами; при этом существенную роль играет не только объем речного стока, но и общая антропогенная нагрузка на акваторию Нижнего Дона и Таганрогского залива.
3. Придонная гипоксия в летний период года на акватории собственно моря обеспечивает обогащение водной толщи фосфатами и аммонийным азотом.
4. При оценке баланса биогенных элементов в Азовском море необходимо учитывать также сезонные процессы минерализации органических веществ, скорость рециклинга биогенных соединений, жизненный цикл фитопланктона, скорость ветра над акваторией, формирование плотностной и кислородной стратификации водных масс, водообмен с Черным морем, седиментацию в донные отложения, вымывание с горных пород, поступление с атмосферными осадками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бронфман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д. Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. М.: Пищевая промышленность, 1979. 288 с.
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. Зенкевич А.А. Биология морей СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 415 с.
4. Студеникина Е.И., Алдакимова А.Я., Губина Г.С. Фитопланктон Азовского моря в условиях антропогенных воздействий. Ростов-н/Д.: Эверест, 1999. 175 с.
5. РД 52.24.419-2005 Массовая концентрация растворенного кислорода в водах. Методика выполнения измерений йодометрическим методом. Ростов-н/Д.: Росгидромет, изд-во ГУ ГХИ, 2005. 23 с.

6. РД 52.24.383-2005 Массовая концентрация аммиака и ионов аммония в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом в виде индофенолового синего. Ростов-н/Д.: Росгидромет, изд-во ГУ ГХИ, 2005. 36 с.
7. РД 52.24.518-2008 Массовая концентрация нитритов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с сульфаниламидом и N-(1-нафтил)этилендиамина дигидрохлоридом. Ростов-н/Д.: Росгидромет, изд-во ГУ ГХИ, 2008. 30 с.
8. РД 52.24.523-2009 Массовая концентрация нитратов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с сульфаниламидом и N-(1-нафтил)этилендиамина дигидрохлоридом после восстановления в кадмиевом редуторе. Ростов-н/Д.: Росгидромет, изд-во ГУ ГХИ, 2009. 30 с.
9. РД 52.24.382-2006 Массовая концентрация фосфатов и полифосфатов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом. Ростов-н/Д.: Росгидромет, изд-во ГУ ГХИ, 2006. 30 с.
10. РД 52.24.433-2005 Массовая концентрация кремния в поверхностных водах суши. Методика выполнения измерений фотометрическим методом в виде желтой формы молибдкремниевой кислоты. Ростов-н/Д.: Росгидромет, изд-во ГУ ГХИ, 2005. 23 с.
11. Федосов М.В. Химическая основа кормности Азовского моря и прогноз ее изменения в связи с гидростроительством на реках // Труды Всесоюзного института морского рыбного хозяйства и океанографии, 1955. Т. 31, вып. 1. С. 35–62.
12. Матишов Г.Г., Гаргопа Ю.М., Бердников С.В., Дженюк С.Л. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море. М.: Наука, 2006. 304 с.
13. Никаноров А.М. Региональная гидрохимия. Ростов-н/Д.: НОК, 2011. 388 с.
14. Бронфман А.М., Хлебников Е.П. Азовское море. Основы реконструкции. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 270 с.
15. Александрова З.В., Семенов А.Д., Ромова М.Г., Баскакова Т.Е. Режим кислорода и содержание биогенных веществ Азовского моря в многолетнем аспекте // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна : сб. науч. тр. АзНИИРХ. Ростов-н/Д.: Изд-во АзНИИРХ, 1998. С. 34–48.
16. Луц Н.В. Многолетняя изменчивость скорости ветра в восточном Приазовье // Метеорология и гидрология. 2001. № 2. С. 98–102.
17. Климат Ростова-на-Дону / Под ред. Ц.В. Швер, Т.Е. Иванченко. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 224 с.
18. Природные условия и естественные ресурсы СССР. Юго-восток Европейской части СССР / Под ред. И.П. Герасимова. М.: Наука, 1971. 455 с.
19. 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. Естественные науки. 2017. № 3. С. 76–82.
20. Александрова З.В. Кислородный режим акватории юго-восточного района Азовского моря // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 11. С. 28–35.
21. Дебольская Е.И., Якушев Е.В., Сухинов А.И. Формирование заморов и анаэробных условий в Азовском море // Водные ресурсы. 2005. № 5. С. 171–183.
22. Жукова А.И., Федосов М.В. Значение микроорганизмов верхнего слоя донных отложений мелководного моря в трансформации органического вещества // Океанология. 1961. Т. 1, вып. 3. С. 450–456.
23. Косенко Ю.В., Баскакова Т.Е., Картамышева Т.Б. Роль стока р. Дон в формировании продуктивности Таганрогского залива // Водные биоресурсы и среда обитания. 2018. Т. 1, № 3–4. С. 32–39.
24. Кузнецов С.И., Саралов А.И., Назина Т.Н. Микробиологические процессы круговорота углерода и азота в озерах. М.: Наука, 1985. 213 с.
25. Хатчинсон Д. Лимнология. М.: Прогресс, 1969. 592 с.
26. Hutchinson G.E. Nitrogen in the biogeochemistry of the atmosphere // American Scientist. 1944. Vol. 32. Pp. 178–195.
27. Александрова З.В., Баскакова Т.Г., Ромова М.Г. Особенности гидрохимического режима и продуцирования первичного органического вещества в экосистеме в современный период // Гребневик *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz) в Азовском и Черном морях: биология и последствия вселения / Под ред. С.П. Воловика. Ростов-н/Д.: Изд-во БКИ, 2000. С. 145–172.
28. Небел Б. Наука об окружающей среде: Как устроен мир. Т. 1. М.: Мир, 1993. 424 с.
29. 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.
30. Дацко В.Г. Органическое вещество в водах южных морей СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 267 с.
31. Гаргопа Ю.М. Крупномасштабные изменения гидрометеорологических условий формирования биопродуктивности Азовского моря : автореф. дис. канд. геогр. наук. Мурманск: Изд-во ММБИ КНЦ РАН, 2003. 48 с.
32. Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 620 с.
33. Одум Ю. Экология. Т. 1. М.: Мир, 1986. 328 с.
34. Александрова З.В., Баскакова Т.Е. Оценка многолетних изменений первичной продукции Азовского моря // Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод

России : матер. науч.-практ. конф. (г. Азов, 8–10 июня 2009 г.). Ростов-н/Д.: Изд-во АзНИИРХ, 2009. С. 53–56.

35. Баславская С.С. Минеральное питание как фактор повышения интенсивности и продуктивности фотосинтеза водорослей // Первичная продукция морей и внутренних вод / Под ред. Г.Г. Винберга. Минск: Наука, 1961. С. 319–328.
36. Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х.Ф. Умирающие озера: причины и контроль антропогенного эвтрофирования. М.: Гидрометеиздат, 1990. 278 с.
37. Ланская Л.А. Темп и условия деления морских планктонных водорослей в культурах // Первичная продукция морей и внутренних вод / Под ред. Г.Г. Винберга. Минск: Наука, 1961. С. 328–333.

REFERENCES

1. Bronfman A.M., Dubinina V.G., Makarova G.D. *Gidrologicheskie i gidrokhimicheskie osnovy produktivnosti Azovskogo morya* [Hydrological and hydrochemical basis for the productivity of the Sea of Azov]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost' [Food Industry], 1979, 288 p. (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: Kubansky gosudarstvennyy universitet [Kuban State University] Publ., 2008, 347 p. (In Russian).
3. Zenkevich A.A. *Biologiya morey SSSR* [Biology of the seas of the USSR]. Moscow: AN SSSR [USSR Academy of Sciences] Publ., 1963, 415 p. (In Russian).
4. Studenikina E.I., Aldakimova A.Ya., Gubina G.S. *Fitoplankton Azovskogo morya v usloviyakh antropogennykh vozdeystviy* [Phytoplankton from the Sea of Azov affected by anthropogenic factors]. Rostov-on-Don: Everest, 1999, 175 p. (In Russian).
5. RD 52.24.419-2005 *Massovaya kontsentratsiya rastvorenogo kisloroda v vodakh. Metodika vypolneniya izmereniy yodometricheskim metodom* [Mass concentration of dissolved oxygen in water. Method of performing measurements by iodometric method]. Rostov-on-Don: Rosgidromet [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring] Publ., GU GKHI [Hydrochemical Institute] Publ., 2005, 23 p. (In Russian).
6. RD 52.24.383-2005 *Massovaya kontsentratsiya ammiaka i ionov ammoniya v vodakh. Metodika vypolneniya izmereniy fotometricheskim metodom v vide indofenolovogo sinego* [Mass concentration of ammonia and ammonium ions in water. Methodology of performing measurements using the photometric method by means of indophenol blue]. Rostov-on-Don: Rosgidromet [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring] Publ., GU GKHI [Hydrochemical Institute] Publ., 2005, 36 p. (In Russian).
7. RD 52.24.518-2008 *Massovaya kontsentratsiya nitritov v vodakh. Metodika vypolneniya izmereniy fotometricheskim metodom s sul'fanilamidom i N-(1-naftil)etilendiamina digidrokhlidom* [Mass concentration of nitrites in water. Methodology of performing measurements using the photometric method with sulfanilamide and N-(1-Naphthyl)ethylenediamine dihydrochloride]. Rostov-on-Don: Rosgidromet [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring] Publ., GU GKHI [Hydrochemical Institute] Publ., 2008, 30 p. (In Russian).
8. RD 52.24.523-2009 *Massovaya kontsentratsiya nitratov v vodakh. Metodika vypolneniya izmereniy fotometricheskim metodom s sul'fanilamidom i N-(1-naftil)etilendiamina digidrokhlidom posle vosstanovleniya v kadmievom reduktore* [Mass concentration of nitrates in water. Methodology of performing measurements using the photometric method with sulfanilamide and N-(1-Naphthyl)ethylenediamine dihydrochloride after reduction in a cadmium reduction unit]. Rostov-on-Don: Rosgidromet [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring] Publ., GU GKHI [Hydrochemical Institute] Publ., 2009, 30 p. (In Russian).
9. RD 52.24.382-2006 *Massovaya kontsentratsiya fosfatov i polifosfatov v vodakh. Metodika vypolneniya izmereniy fotometricheskim metodom* [Mass concentration of phosphates and polyphosphates in water. Methodology of performing measurements using the photometric method]. Rostov-on-Don: Rosgidromet [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring] Publ., GU GKHI [Hydrochemical Institute] Publ., 2006, 30 p. (In Russian).
10. RD 52.24.433-2005 *Massovaya kontsentratsiya kremniya v poverkhnostnykh vodakh sushi. Metodika vypolneniya izmereniy fotometricheskim metodom v vide zheltoy formy molibdokremnievoy kisloty* [Mass concentration of silicon in the surface land waters. Methodology of performing measurements using the photometric method in a yellow form of molybdenum silicic acid]. Rostov-on-Don: Rosgidromet [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring] Publ., GU GKHI [Hydrochemical Institute] Publ., 2005, 23 p. (In Russian).
11. Fedosov M.V. *Khimicheskaya osnova kormnosti Azovskogo morya i prognoz ee izmeneniya v svyazi s gidrostroytel'stvom na rekakh* [Chemical basis of the Azov Sea food capacity and the forecast of its changes in relation to building hydroengineering structures in rivers]. *Trudy Vsesoyuznogo instituta morskogo rybnogo khozyaystva i okeanografii* [Proceedings of the All-Union Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography], 1955, vol. 31, issue 1, pp. 35–62. (In Russian).

12. Matishov G.G., Gargopa Yu.M., Berdnikov S.V., Dzhenyuk S.L. Zakonomernosti ekosistemnykh protsessov v Azovskom more [Laws of ecosystem processes in the Sea of Azov]. Moscow: Nauka [Science], 2006, 304 p. (In Russian).
13. Nikanorov A.M. Regional'naya gidrokimiya [Regional hydrochemistry]. Rostov-on-Don: NOK, 2011, 388 p. (In Russian).
14. Bronfman A.M., Khlebnikov E.P. Azovskoe more. Osnovy rekonstruktsii [The Azov Sea. The reconstruction basics]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 1985, 270 p. (In Russian).
15. Aleksandrova Z.V., Semenov A.D., Romova M.G., Baskakova T.E. Rezhim kisloroda i sodержanie biogennykh veshchestv Azovskogo morya v mnogoletnem aspekte [Oxygen regime and nutrient contents in the Sea of Azov in multiannual respect]. In: *Osnovnye problemy rybnogo khozyaystva i okhrany rybokhozyaystvennykh vodoemov Azovo-Chernomorskogo basseyna : sbornik nauchnykh trudov AzNIIRKH [The main problems of fisheries and protection of waterbodies with fisheries in the Azov and Black Sea Basin. Collection of research papers of AzNIIRKH]*. Rostov-on-Don: AzNIIRKH Publ., 1998, pp. 34–48. (In Russian).
16. Luts N.V. Mnogoletnyaya izmenchivost' skorosti vetra v vostochnom Priazov'e [Long-term variability of wind velocity in the Eastern Azov Region]. *Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and Hydrology]*, 2001, no. 2, pp. 98–102. (In Russian).
17. Klimat Rostova-na-Donu [The climate of Rostov-on-Don]. Ts. V. Shver, T.E. Ivanchenko. (Eds.). Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 1987, 224 p. (In Russian).
18. Prirodnye usloviya i estestvennye resursy SSSR. Yugo-vostok Evropeyskoy chasti SSSR [Natural conditions and natural resources of the USSR. South-Eastern European part of the USSR]. I.P. Gerasimov. (Ed.). Moscow: Nauka [Science], 1971, 455 p. (In Russian).
19. Kosenko Yu.V., Barabashin T.O., Baskakova T.E. Dinamika gidrokhimicheskikh kharakteristik Azovskogo morya v sovremenny 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 [University News. North Caucasian Region. Natural Sciences Series]*, 2017, no. 3–1, pp. 76–82. (In Russian).
20. Aleksandrova Z.V. Kislorodnyy rezhim akvatorii yugo-vostochnogo rayona Azovskogo morya [Water area oxygen regime in the south-eastern part of the Azov Sea]. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse [Environmental protection in oil and gas complex]*, 2015, no. 11, pp. 28–35. (In Russian).
21. Debol'skaya E.I., Yakushev E.V., Sukhinov A.I. Formirovanie zamorov i anaerobnykh usloviy v Azovskom more [Formation of fish kills and anaerobic conditions in the Sea of Azov]. *Vodnye resursy [Water Resources]*, 2005, no. 5, pp. 171–183. (In Russian).
22. Zhukova A.I., Fedosov M.V. Znachenie mikroorganizmov verkhnego sloya donnykh otlozheniy melkovodnogo morya v transformatsii organicheskogo veshchestva [Significance of microorganisms of the upper sediment layer of shallow water basin in transformation of organic matter]. *Okeanologiya [Oceanology]*, 1961, vol. 1, issue 3, pp. 450–456. (In Russian).
23. Kosenko Yu.V., Baskakova T.E., Kartamysheva T.B. Rol' stoka r. Don v formirovanii produktivnosti Taganrogskogo 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. (In Russian).
24. Kuznetsov S.I., Saralov A.I., Nazina T.N. Mikrobiologicheskie protsessy krugovorota ugleroda i azota v ozerakh [Microbiological processes of turnover of carbon and nitrogen in lakes]. Moscow: Nauka [Science], 1985, 213 p. (In Russian).
25. Hutchinson G.E. A treatise on limnology. Vol. 1. Geography, physics, and chemistry. Berkeley, Los Angeles: University of California Press, 1957, 1015 p.
26. Hutchinson G.E. Nitrogen in the biogeochemistry of the atmosphere. *American Scientist*, 1944, vol. 32, pp. 178–195.
27. Aleksandrova Z.V., Baskakova T.G., Romova M.G. Osobennosti gidrokhimicheskogo rezhima i produtsirovaniya pervichnogo organicheskogo veshchestva v ekosisteme v sovremenny period [Particular features of the hydrochemical regime and production of primary organic matter in ecosystems in the present-day period]. In: *Grebnevik Mnemiopsis leidyi (A. Agassiz) v Azovskom i Chernom moryakh: biologiya i posledstviya vseleniya [Ctenophore Mnemiopsis leidyi (A. Agassiz) in the Sea of Azov and the Black Sea: Biology and aftereffects of the invasion]*. S.P. Volovik. (Ed.). Rostov-on-Don: BKI [Bataysk Book Publisher], 2000, pp. 145–172. (In Russian).
28. Nebel B.J., Wright R.T. Environmental science: The way the world works. 4th ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993, 630 p.
29. 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, pp. 75–81. (In Russian).
30. Datsko V.G. Organicheskoe veshchestvo v vodakh yuzhnykh morey SSSR [Organic matter in the waters of the southern seas of the USSR]. Moscow: AN SSSR

- [USSR Academy of Sciences] Publ., 1959, 267 p. (In Russian).
31. Gargopa Yu.M. Krupnomasshtabnye izmeneniya gidrometeorologicheskikh usloviy formirovaniya bioproduktivnosti Azovskogo morya : avtoref. dis. kand. geogr. nauk [Wide-scale changes in the hydrometeorological conditions of biological productivity formation in the Sea of Azov. Extended abstract of Candidate's (Geography) Thesis]. Murmansk: MMBI KSC RAS [Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2003, 48 p. (In Russian).
 32. Odum E.P. Fundamentals of ecology. 5th ed. Boston: Cengage Learning Publ., 2005, 598 p.
 33. Odum E.P. Ecology. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1963, 152 p.
 34. Aleksandrova Z.V, Baskakova T.E. Otsenka mnogoletnikh izmeneniy pervichnoy produktsii Azovskogo morya [Assessment of current changes in the chemical component of biological productivity of the Sea of Azov]. In: *Sovremennye fundamental'nye problemy gidrokhimii i monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod Rossii : materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Azov, 8–10 iyunya 2009 g.)* [Modern fundamental problems of hydrochemistry and monitoring the quality of surface waters of Russia. Proceedings of Research and Practice Conference (Azov, 8–10 June, 2009)]. Rostov-on-Don: AzNIIRKH Publ., 2009, pp. 53–56. (In Russian).
 35. Baslavskaya S.S. Mineral'noe pitanie kak faktor povysheniya intensivnosti i produktivnosti fotosinteza vodorosley [Inorganic nutrients as a factor in increasing the intensity and productivity of photosynthesis of algae]. In: *Pervichnaya produktsiya morey i vnutrennikh vod [Primary production of seas and inland waters]*. G.G. Vinberg. (Ed.). Minsk: Nauka [Science], 1961, pp. 319–328. (In Russian).
 36. Henderson-Sellers B., Markland H.F. Decaying lakes: Origins and control of eutrophication. New York: Wiley, 1987, 264 p.
 37. Lanskaya L.A. Temp i usloviya deleniya morskikh planktonnykh vodorosley v kul'turakh [Rate and conditions of cell division in marine plankton algae in cultures]. In: *Pervichnaya produktsiya morey i vnutrennikh vod [Primary production of seas and inland waters]*. G.G. Vinberg. (Ed.). Minsk: Nauka [Science], 1961, pp. 328–333. (In Russian).
- Поступила 24.09.2019
- Принята к печати 02.10.2019