

Водные биоресурсы и среда обитания
2022, том 5, номер 1, с. 7–17
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
doi: 10.47921/2619-1024_2022_5_1_7
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



Aquatic Bioresources & Environment
2022, vol. 5, no. 1, pp. 7–17
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
doi: 10.47921/2619-1024_2022_5_1_7
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

Экологические проблемы и состояние водной среды

УДК 551.464.32

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В 2019 ГОДУ В РАЙОНЕ Г. ГЕЛЕНДЖИК

© 2022 П. А. Бородулина, В. К. Часовников, А. В. Федоров

ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», Москва 117997, Россия
E-mail: borodulina-polina@mail.ru

Аннотация. Исследование вертикального распределения биогенных элементов является важной составляющей изучения всей экосистемы Черного моря. Биогенные элементы имеют большое значение для первичной продукции в прибрежной зоне моря и являются одним из главных показателей экологического состояния морских вод. Любые изменения режима биогенных элементов отражаются на биологических морских планктонных сообществах. Целью данной работы являлось исследование сезонной вертикальной динамики биогенных элементов в северо-восточной части Черного моря в районе г. Геленджик в 2019 г. Для определения концентрации биогенных веществ применялись методы, являющиеся стандартными в практике морских гидрохимических работ. В результате проведенного исследования было выявлено, что нитратная, аммонийная форма азота и минеральный фосфор имеют хорошо выраженные максимумы концентраций, которые соответствуют определенным значениям условной плотности. В вертикальном распределении нитратов имеется один глубинный максимум; концентрации нитратного азота в среднем составляют 5,57 мкмоль/л. Для вертикального профиля фосфатов характерен верхний максимум (средняя концентрация — 1,39 мкмоль/л), минимум (1,19 мкмоль/л) и нижний максимум концентраций (6,64 мкмоль/л). Сезонные изменения климатических условий, береговой сток и скорость потребления фитопланктоном обуславливают динамику концентраций биогенных веществ в фотическом слое морских вод.

Ключевые слова: биогенные элементы, Черное море, нитратный азот, нитритный азот, аммонийный азот, минеральный фосфор, кремний

VERTICAL DISTRIBUTION OF BIOGENIC ELEMENTS IN GELENDZHİK AREA IN 2019

P. A. Borodulina, V. K. Chasovnikov, A. V. Fedorov

FSBIS “Shirshov Institute of Oceanology RAS”, Moscow 117997, Russia
E-mail: borodulina-polina@mail.ru

Abstract. Investigation of the vertical distribution of nutrients is an important component in studying the entire ecosystem of the Black Sea. Biogenic elements play a crucial role in the primary production in the sea coastal zone and are among the main indicators of the ecological state of marine waters. Any changes in nutrient regime are reflected in biological marine plankton communities. This work was aimed at the investigation of the seasonal vertical dynamics of biogenic elements in the northeastern part of the Black Sea near the city of Gelendzhik in 2019. To determine concentration of nutrients, the methods standard to the practice of marine hydrochemical studies have been used. As a result of this investigation, it has been found that nitrate and ammonium forms of nitrogen, and mineral phosphorus have well-defined concentration maxima that correspond to certain values of conditional density. There is one deep maximum in the vertical distribution of nitrates; on average, the concentration of nitrate nitrogen is $5.57 \mu\text{mol/L}$. Vertical profile of phosphates has an upper maximum (average concentration of $1.39 \mu\text{mol/L}$), a minimum ($1.19 \mu\text{mol/L}$) and a lower maximum ($6.64 \mu\text{mol/L}$) of concentrations. Seasonal changes in climatic conditions, coastal runoff and rate of phytoplankton consumption determine the dynamics of nutrient concentrations in the photic layer of marine waters.

Keywords: biogenic elements, Black Sea, nitrate nitrogen, nitrite nitrogen, ammonium nitrogen, mineral phosphorus, silicon

ВВЕДЕНИЕ

Гидрохимическая структура Черного моря является уникальной, так как имеет такую характерную черту, как сероводородное заражение нижних слоев воды. Главным фактором, который определяет распределение гидрохимических параметров, является гидрологическая структура толщи Черного моря, а точнее — ярко выраженная плотностная стратификация. Плотностная структура вод затрудняет перемешивание и способствует появлению сероводорода, аммиака и других восстановленных форм в глубоких слоях. По мере уменьшения концентрации кислорода процессы взаимодействия восстановленных и окисленных форм химических элементов различаются, что проявляется в вертикальной гидрохимической структуре в виде экстремумов распределения, горизонтов выклинивания и изменений вертикальных градиентов химических параметров [1].

Изучение динамики и концентрации биогенных элементов имеет большое значение для экосистемы Черного моря [2]. Для биогенных элементов в вертикальной гидрохимической структуре характерны определенные зоны аккумуляции, и нарушение закономерностей распределения биогенных веществ может привести к изменению трансформационных и миграционных циклов химических элементов, что в свою очередь вызовет системное нарушение равновесия [3]. В течение последних десятилетий Черное море подвергалось интенсивному антропогенному воздействию, кроме того отмечались климатические изменения [1, 4]. Объем кислородной зоны моря составляет всего около 10 % от общего

объема, что обуславливает большую чувствительность аэробных процессов к воздействию внешних факторов [5].

Цель данной работы — исследование сезонной динамики вертикального распределения биогенных веществ в открытой части Черного моря. Содержание биогенных веществ в морской воде зависит от поступления с пресноводными источниками, которые собирают растворенные элементы с водосборов, а также от потребления живыми организмами. Именно концентрация биогенных веществ в воде является в большинстве случаев ограничительным фактором для развития фитопланктона, а также влияет на его количественные показатели [6, 7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вертикальная структура биогенных элементов исследовалась в рейсах, выполненных в 2019 г. на НИС «Ашамба» в северо-восточной части Черного моря. Отбор проб производился на горизонтах от поверхностного слоя до изопикнической поверхности ($16,20 \text{ кг/м}^3$). Так как вертикальная структура биогенных элементов и плотностная стратификация вод связаны между собой, горизонты отбора проб воды выбирались по значению условной плотности. Кроме того, ориентиром для отбора проб являлось вертикальное распределение гидрологических параметров, которые были получены в режиме реального времени при зондировании. Для измерений использовался STD-зонд SBE 19Plus производства Sea-Bird, объединенный с комплексом Electronics Rosetta SBE 32, который передает данные в режиме реального времени через

кабель-трос и палубный блок SBE 33. За 2019 г. было выполнено 14 мониторинговых экспедиций. Для изучения вертикального распределения биогенных элементов были выбраны данные со станции с максимальной глубиной 500 м, чтобы минимизировать влияние речного стока и антропогенной нагрузки вблизи берега (рис. 1).

Отбор проб морской воды производился непосредственно после подъема измерительного комплекса на палубу; пробы для определения аммиачного азота сразу фиксировались. Аналитические определения проводились в лаборатории химии Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. В данной работе из всех определяемых гидрохимических параметров исследовалась вертикальная структура биогенных элементов — нитратный, нитритный и аммонийный азот, минеральный фосфор и кремний. Аналитические определения проводились по следующим методикам: нитратный азот — РД 52.24.523-2009, нитритный азот — РД 52.24.518-2008, аммонийный азот — РД 52.24.383-2018, минеральный фосфор — РД 52.24.382-2019, кремний — РД 52.24.432-2018.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Нитратный азот ($N-NO_3^-$)

Нитраты являются одним из наиболее важных биогенных веществ, так как необходимы для питания фитопланктона, который усваивает их в процессе фотосинтеза [9]. В глубоководной части Черного моря нитраты поступают в поверхностные воды из нижних слоев, прилегающих к зоне максимума концентраций нитратного азота, с более высокими концентрациями в результате интенсивного перемешивания зимой. Также нитраты поступают в прибрежные районы моря с речным стоком и затем переносятся в центральную часть моря с помощью мезомасштабных вихрей [10] и вследствие сезонной изменчивости. Минимальное содержание нитратного азота наблюдается в зоне фотосинтеза, что вызвано интенсивным потреблением нитратов фитопланктоном [9]. В океанах и морях с нормальным кислородным режимом глубже фотического слоя вод (100–200 м) концентрация нитратного азота увеличивается в результате процесса нитрификации, но в Черном море нарастание концентрации нитратов ограничено

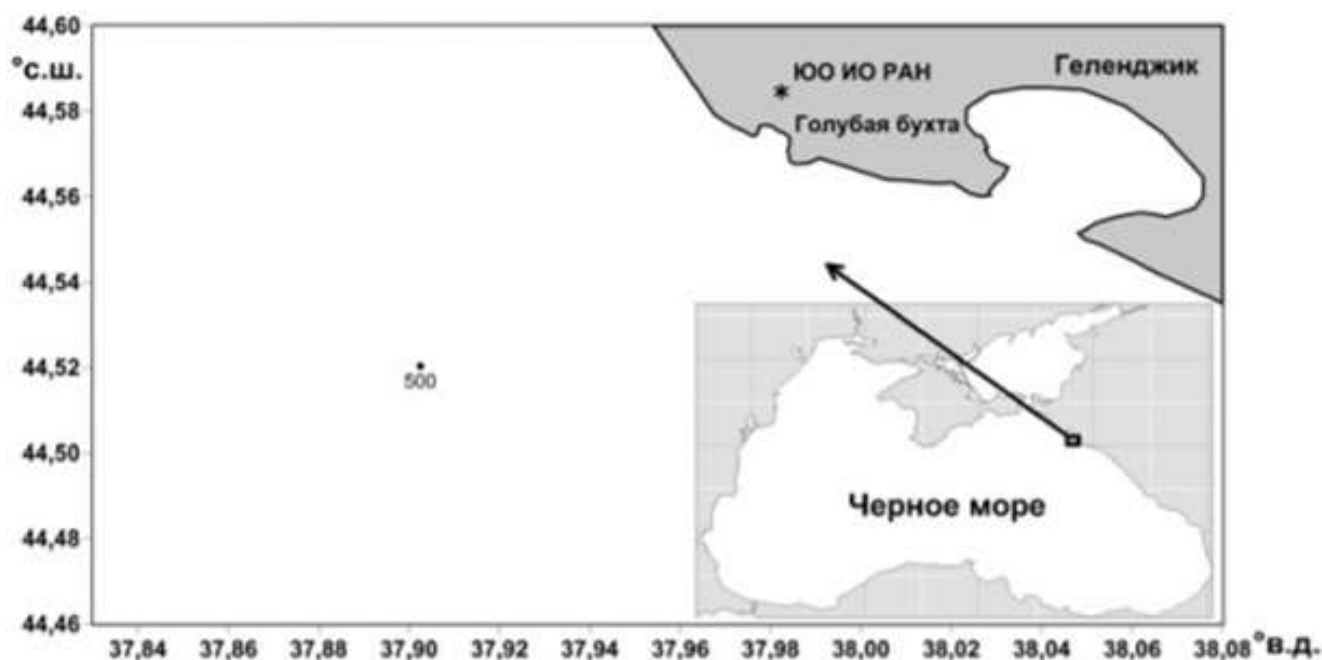


Рис. 1. Район проведения системного мониторинга в северо-восточной части Черного моря и расположение исследуемой станции с максимальной глубиной 500 м [8]

Fig. 1. Area of systematic monitoring in the northeastern part of the Black Sea and the location of the investigated station with a maximum depth of 500 m [8]

глубиной 175–200 м. На горизонтах с отсутствием кислорода содержание нитратного азота резко снижается из-за процессов денитрификации и тиоденитрификации (в сероводородной зоне). В результате этих процессов образуется молекулярный азот [11]. Сезонная динамика содержания нитратов характеризуется зимним максимумом и летним минимумом концентраций, что чаще всего связано с потреблением нитратного азота фитопланктоном [9].

В весенний период пик концентраций нитратного азота находился на глубине примерно 130 м, что соответствовало условной плотности около $15,25 \text{ кг/м}^3$ (рис. 2а).

Содержание нитратов в слое максимума концентраций составило в среднем $5,30 \text{ мкмоль/л}$. Из особенностей вертикального распределения нитратного азота можно выделить чуть более высокие концентрации нитратов на поверхности в мае, а также резкое снижение условной плотности на горизонтах от 0 до 30 м — с $13,8$ до $12,6 \text{ кг/м}^3$, которое связано с прогревом поверхностных вод. Повышенные концентрации нитратного азота на поверхности, вероятно, объясняются слабым перемешиванием морских вод и фотоингибированием.

Летом распределение нитратного азота практически ничем не выделяется — на горизонтах от 0 до примерно 30 м нитраты отсутствуют, что типично для летнего периода и объясняется активным потреблением фитопланктоном в процессе фотосинтеза (рис. 2б). В июне концентрации нитратного азота на горизонтах 0 и 15 м выше, чем в последующие месяцы. Скорее всего, эти концентрации являются остаточными, так как в мае содержание нитратов было достаточно высоким. Кроме того, в июне на горизонте 154 м (условная плотность $16,05 \text{ кг/м}^3$) наблюдается «всплеск» содержания нитратного азота, который, вероятно, связан с высокой мутностью на этой глубине.

В осенний период концентрации нитратов на верхних горизонтах (от 0 до 50 м) заметно выше, чем весной и летом, что обосновывается снижением численности фитопланктона и, соответственно, снижением потребления им нитратного азота (рис. 2в). Кроме того, на графике вертикального распределения нитратов относительно условной плотности видно, как последняя с течением времени увеличивается на верхних горизонтах. В сентябре и октябре наблюдаются увеличения концентраций нитратного азота на некоторых

горизонтах — 50 м (до $1,41 \text{ мкмоль/л}$) и 10 м (до $0,94 \text{ мкмоль/л}$), соответственно. Возможно, что такие возрастания содержания нитратов связаны со снижением их потребления фитопланктоном на определенных горизонтах либо с увеличением скорости процесса нитрификации.

Максимальная концентрация нитратного азота в течение года составила в среднем $5,57 \text{ мкмоль/л}$ и соответствовала диапазону условной плотности от $15,43$ до $15,47 \text{ кг/м}^3$. Средняя глубина, на которой находился пик концентрации нитратов — 119 м. Весной глубина залегания экстремума нитратного азота больше — в среднем 161 м.

Аммонийный азот ($N-NH_4^+$)

Аммонийный азот содержится в морской воде в виде катиона NH_4^+ и является конечным звеном трансформации азота в процессе минерализации органического вещества. Аммоний потребляется растениями при фотосинтезе, а также при окислении в нитриты и нитраты. Аммонийный азот не только образуется в процессе круговорота органического вещества, но и поступает с речным стоком и атмосферными осадками [9]. В фотическом слое вертикальное распределение аммония имеет сезонный характер [12]. Осенью усиливаются процессы бактериального разложения органических веществ в периоды отмирания водных организмов, и концентрация аммонийного азота увеличивается. Зимой содержание ионов аммония достигает максимума, что связано с продолжающимся процессом минерализации органики в условиях слабого потребления фитопланктоном и уменьшения скорости окисления при низких температурах воды. В весенне-летний период аммонийный азот активно потребляется фитопланктоном и окисляется до нитритов и нитратов [13]. На глубине около 150–200 м, т. е. с появлением и последующим увеличением содержания сероводорода, концентрация ионов аммония резко возрастает до $3\text{--}4 \text{ мкг/л}$ [9]. В теплый период года концентрация аммонийного азота влияет на скорость роста фитопланктона, что, возможно, объясняется проявлением ингибирующего действия аммония на скорость поглощения нитратов микроводорослями [14].

В весенний период рост концентраций аммонийного азота начинался с глубины около 160 м; максимальное значение составило больше $6,5 \text{ мкмоль/л}$ (рис. 3а).

На более верхних горизонтах содержание ионов аммония было примерно одинаковым; в среднем

их концентрация составляла от 1 до 2 мкмоль/л. Из весенних месяцев можно выделить май — он отличается чуть более высокими концентрациями аммонийного азота по всей вертикали. Такая особенность, как и в случае с динамикой нитратного азота в этом же месяце, возможно, связана с фотоингибированием. При этом процессе часть фитопланктона отмирает, т. е. превращается в органическое вещество, и затем преобразуется в аммонийную форму азота.

Летом средние концентрации аммонийного азота варьировались от 1 до 3 мкмоль/л (рис. 3б). Рост содержания ионов аммония начинается в этот сезон на глубине около 140 м, что выше, чем весной. При этом значения условной плотности не меняются. В июле концентрация аммонийного азота заметно больше, чем в июне и в августе — 4 мкмоль/л. Предположительно, такое высокое содержание ионов аммония в поверхностном слое связано с сильными северо-восточными ветрами,

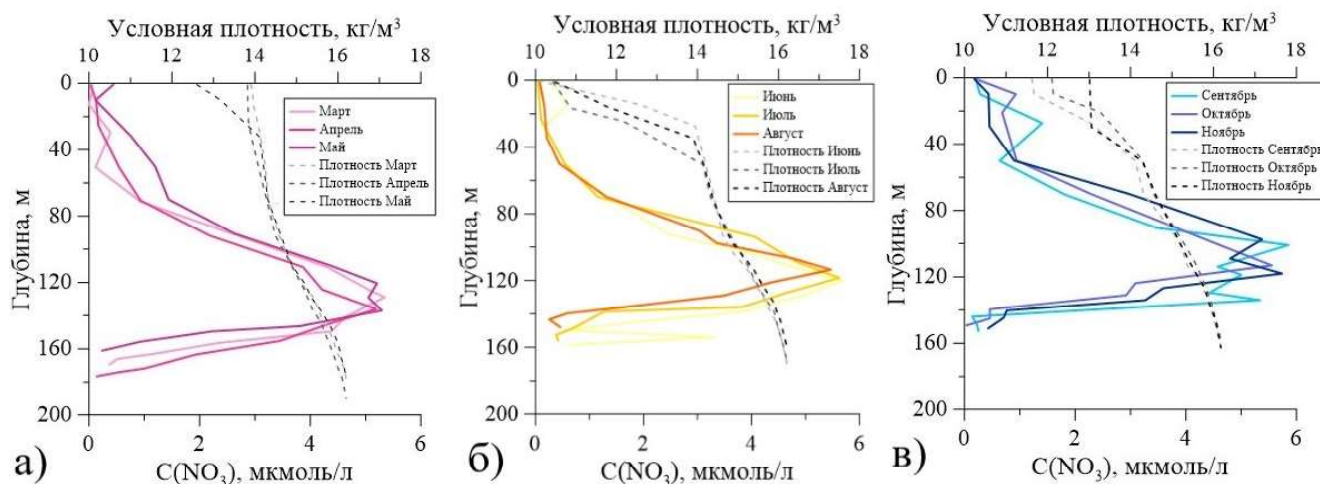


Рис. 2. Сезонная вертикальная динамика нитратного азота (мкмоль/л) относительно глубины и условной плотности: а) весной, б) летом, в) осенью 2019 г.

Fig. 2. Seasonal vertical dynamics of nitrate nitrogen ($\mu\text{mol/L}$) relative to depth and conditional density: а) in spring, б) in summer, в) in autumn, 2019

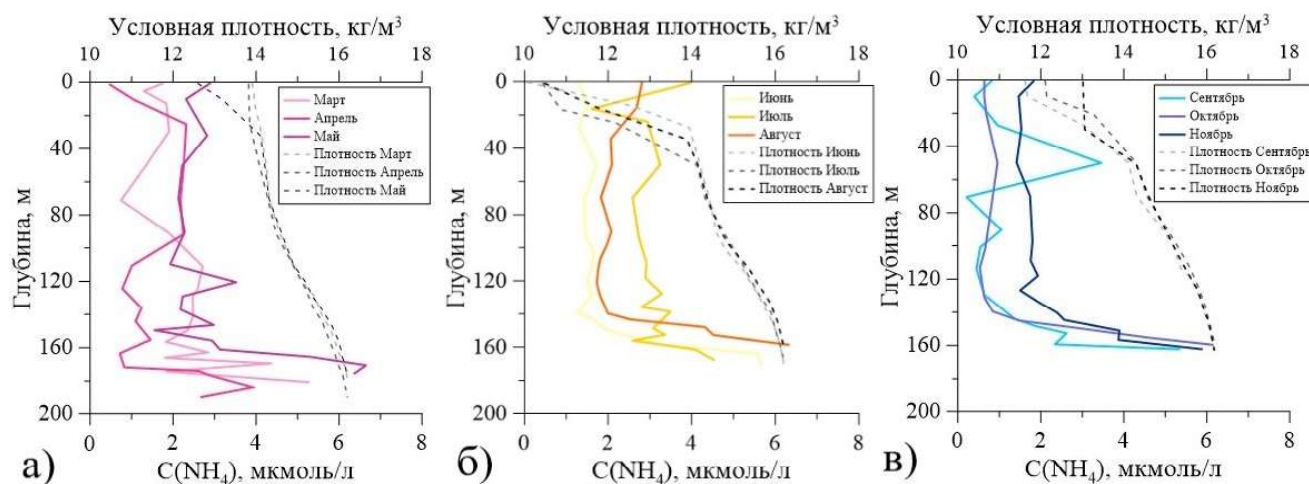


Рис. 3. Сезонная вертикальная динамика аммонийного азота (мкмоль/л) относительно глубины и условной плотности: а) весной, б) летом, в) осенью 2019 г.

Fig. 3. Seasonal vertical dynamics of ammonium nitrogen ($\mu\text{mol/L}$) relative to depth and conditional density: а) in spring, б) in summer, в) in autumn, 2019

которые наблюдались в этот период. Ветры данного направления имеют свойство сгонять в открытую часть моря прибрежные поверхностные воды, которые характеризуются повышенным содержанием всех биогенных веществ, в т. ч. и аммонийного азота.

В осенний период увеличение концентраций ионов аммония наблюдается с примерно 150 м (рис. 3в). Максимальные концентрации аммонийного азота составили около 6 мкмоль/л. На графике динамики аммонийного азота осенью резко выделяется горизонт 50 м в сентябре — концентрация ионов аммония возросла до 3,46 мкмоль/л. На данной глубине, как было отмечено в предыдущих разделах, увеличивается содержание не только аммонийной, но и нитратной и нитритной форм азота. Скорее всего, на горизонте 50 м в этот период было много органических остатков, которые подвергались активному разложению, из-за чего повысились концентрации всех элементов азотной группы.

Нитритный азот ($N-NO_2^-$)

Нитриты являются промежуточным продуктом процессов нитрификации и денитрификации [12]. В Черном море максимальные концентрации нитритного азота образуются в результате восстановления нитратов бактериями-денитрификаторами на глубинах, которым свойственны очень низкие концентрации кислорода [11]. В теплый период года в большинстве случаев нитриты отсутствуют в поверхностном слое до глубины 50 м, а горизонтальное распределение нитритного азота характеризуется увеличением его концентраций по мере приближения к берегу [9]. В поверхностном слое наблюдается хорошо выраженная сезонная динамика нитритов. В летний период концентрация нитритного азота минимальна, а максимума она достигает зимой [9].

Вертикальная динамика нитритного азота характеризуется двумя слоями высоких концентраций: один находится на глубине около 40–50 м, а второй — на глубинах между максимумами нитратного и аммонийного азота (рис. 4).

Эти пики концентраций нитритов связаны с активно протекающими на данных глубинах окислительно-восстановительными процессами. Максимальные значения во все времена года совпадают либо с высокими концентрациями нитратов, либо с большим содержанием аммонийной формы азота, что свидетельствует о процессах денитрификации и нитрификации, соответственно.

Весной наибольшая концентрация нитритного азота отмечалась в марте на горизонте 170 м (0,18 мкмоль/л), что, вероятно, связано с большими концентрациями аммонийного азота (рис. 4а). В летний период общий фон содержания нитритов меньше — максимальная концентрация составила 0,14 мкмоль/л в июне. Июнь заметно выделяется среди других летних месяцев повышенными значениями концентраций нитритного азота по всей вертикали (рис. 4б). Как отмечалось ранее, в июне в поверхностном слое наблюдались более высокие концентрации нитратов, что, скорее всего, и объясняет такие концентрации нитритного азота. Осенью содержание нитритов увеличивается (рис. 4в), так как начинает интенсивно проходить процесс деструкции органического вещества, накопившегося за летний период [15]. Максимальная концентрация нитритного азота была отмечена в октябре и составила 0,19 мкмоль/л на глубине около 145 м. На графике вертикального распределения нитритов выделяется слой от 30 до 70 м: содержание нитритного азота практически достигает максимального значения за весь наблюдаемый период. Данное увеличение концентраций, предположительно, связано с высокими концентрациями как нитратного, так и аммонийного азота.

Минеральный фосфор (фосфаты)

Основной неорганической формой фосфора в море являются фосфаты [16]. Они усваиваются фитопланктоном и переводятся в фосфорорганические соединения, становясь компонентом питания зоопланктона [16]. Сезонная динамика минерального фосфора в поверхностных слоях вод характеризуется минимальными концентрациями в летний период и максимумом содержания фосфатов зимой. Рост концентраций осенью объясняется тем, что интенсивный обмен вод в период осенне-зимнего конвективного перемешивания приводит к обогащению слоя фотосинтетической деятельности минеральным фосфором [17]. Весеннее снижение концентраций в этом слое связано с активным потреблением минерального фосфора фитопланктоном [18]. Для вертикального распределения фосфатов характерно наличие двух максимумов и двух минимумов концентраций, которые отличаются стабильным положением относительно условной плотности [1]. Этим объясняется расположение минимальных и максимальных значений содержания фосфатов на разных глубинах в разные сезоны года (рис. 5).

В весенний период увеличение содержания фосфатов начинается с глубины около 90 м и достигает максимума в диапазоне от 170 до 180 м, что связано с разной глубиной залегания условной плотности. Наибольшая концентрация минерального фосфора весной наблюдалась в мае и составила больше 6,2 мкмоль/л (рис. 5а).

Летом рост концентраций также начинается на горизонте примерно 90 м (рис. 5б). Максимальное содержание минерального фосфора отмечается на приблизительно одинаковой глубине (160 м) и достигает порядка 8 мкмоль/л. При этом относи-

тельно условной плотности максимум концентраций остался на прежней отметке — 16,15 кг/м³.

В осенний период содержание минерального фосфора в фотической зоне увеличивается и фосфаты присутствуют в небольшом количестве даже в поверхностных водах (рис. 5в). Это связано, вероятно, со снижением потребления фосфатов фитопланктоном в данный период, а также с поступлением минерального фосфора из глубинных вод.

Верхний максимум содержания минерального фосфора привязан к диапазону условной плотнос-

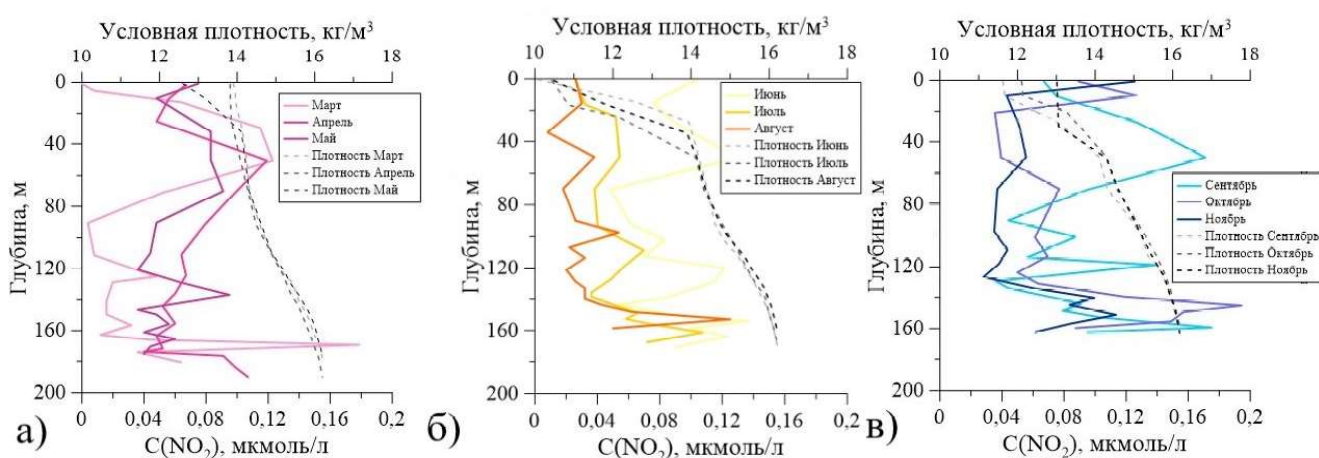


Рис. 4. Сезонная вертикальная динамика нитритного азота (мкмоль/л) относительно глубины и условной плотности: а) весной, б) летом, в) осенью 2019 г.

Fig. 4. Seasonal vertical dynamics of nitrite nitrogen ($\mu\text{mol/L}$) relative to depth and conditional density: а) in spring, б) in summer, в) in autumn, 2019

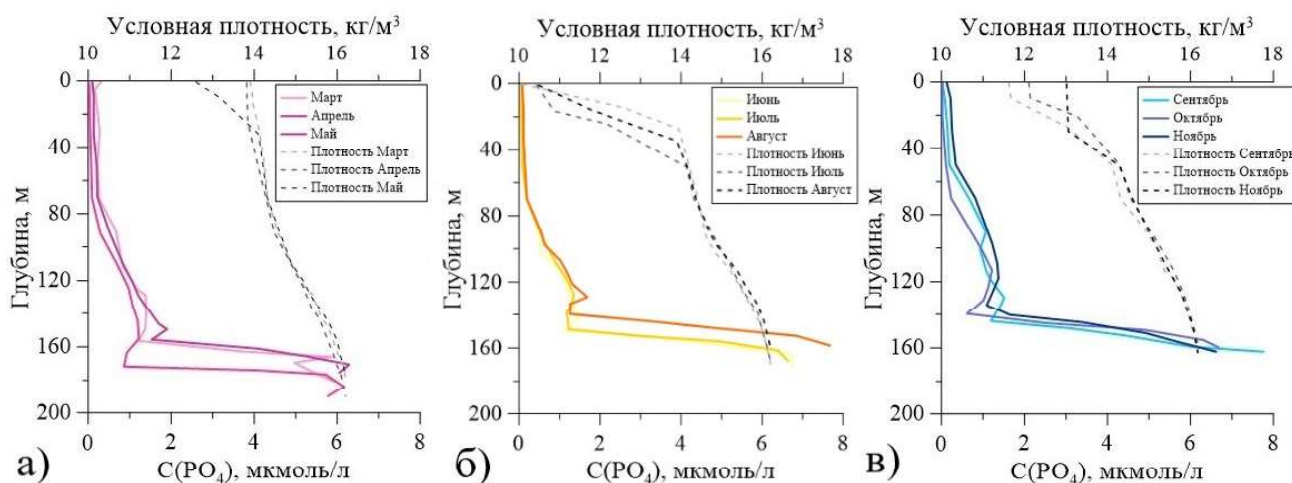


Рис. 5. Сезонная вертикальная динамика фосфатов (мкмоль/л) относительно глубины и условной плотности: а) весной, б) летом, в) осенью 2019 г.

Fig. 5. Seasonal vertical dynamics of phosphates ($\mu\text{mol/L}$) relative to depth and conditional density: а) in spring, б) in summer, в) in autumn, 2019

ти от 15,6 до 15,9 кг/м³. Глубина залегания данного слоя концентраций была около 130 м, весной — 149 м. Средняя концентрация фосфатов за весь год составила 1,39 мкмоль/л.

Слой минимума концентраций минерального фосфора располагается на глубине 143 м, в весенний период — около 161 м. Условная плотность варьировалась от 15,9 до 16,00 кг/м³. Среднее содержание фосфатов за год в данном слое — 1,19 мкмоль/л.

Нижний максимум содержания фосфатов размещается в слое с условной плотностью 16,10–16,20 кг/м³, глубина залегания которого около 167 м; весной она была немного больше — примерно 174 м. Концентрация минерального фосфора в нижнем максимуме в среднем за год составила 6,64 мкмоль/л.

Кремний

Неорганические формы кремния активно потребляются и переходят в состав синтезируемой биомассы диатомовых водорослей, а затем выделяются в воду в процессе осаждения органи-

ческого вещества. Таким образом, вертикальная динамика кремния характеризуется ростом концентраций с глубиной [16]. Сезонная изменчивость содержания кремния зависит от потребления фитопланктоном и, соответственно, характеризуется его снижением в вегетационный период и возрастанием в течение дальнейшего года [19]. Кремний является наиболее консервативным параметром из всех биогенных элементов, т. к. не участвует в окислительно-восстановительных реакциях.

Концентрация кремния постепенно возрастает от 0–6 мкмоль/л на поверхности до 65–70 мкмоль/л на горизонте с условной плотностью 16,20 кг/м³ (рис. 6).

Летом и осенью кремний в поверхностном слое практически отсутствует, что связано с развитием фитопланктона в этот период и, соответственно, активным потреблением кремния. Небольшие изменения содержания кремния на глубинах более 120 м вероятнее всего связаны с перемешиванием вод соседних горизонтов.

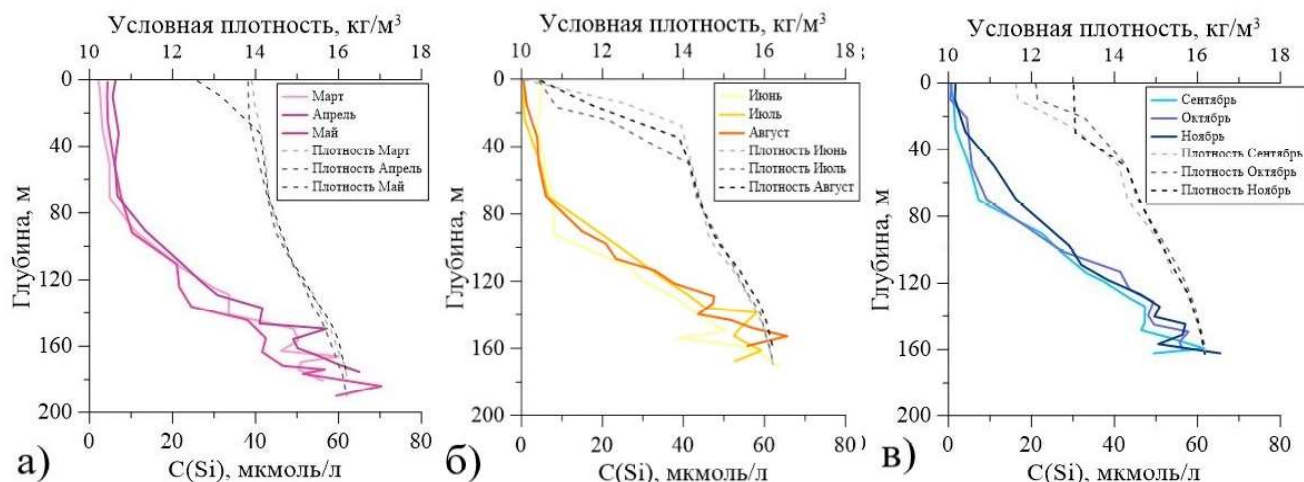


Рис. 6. Сезонная вертикальная динамика кремния (мкмоль/л) относительно глубины и условной плотности: а) весной, б) летом, в) осенью 2019 г.

Fig. 6. Seasonal vertical dynamics of silicon ($\mu\text{mol/L}$) relative to depth and conditional density: a) in spring, б) in summer, в) in autumn, 2019

ВЫВОДЫ

Исследована сезонная динамика вертикального распределения биогенных веществ на склоновой станции у побережья северо-восточной части Черного моря в районе г. Геленджик в 2019 г. Нитратный и аммонийный азот, а также минеральный фосфор обладают ярко выраженными экстремума-

ми по глубине, в течение года меняющими глубину залегания, которая привязана к показателю условной плотности. Наибольшие глубины, на которых находятся максимумы концентраций биогенных элементов, наблюдались в весенний период.

В вертикальном распределении нитратного азота хорошо проявляется глубинный максимум

в слое с условной плотностью 15,43–15,47 кг/м³. Абсолютные концентрации в слое максимума изменялись от 5,20 до 5,86 мкмоль/л.

Вертикальное распределение минерального фосфора характеризуется наличием верхнего и нижнего максимума и минимума. Верхний максимум располагается в слое с условной плотностью 15,6–15,9 кг/м³; концентрации фосфатов составляли от 1,21 до 1,89 мкмоль/л. Ниже находится слой минимума концентраций минерального фосфора; условная плотность варьировалась в диапазоне от 15,9 до 16,00 кг/м³. Средняя концентрация фосфатов за год составила 1,19 мкмоль/л. Нижний максимум привязан к значениям условной плотности 16,10–16,20 кг/м³; среднее содержание минерального фосфора — 6,64 мкмоль/л.

Полученные данные в целом соотносятся с ранее проведенными подобными исследованиями [1], однако было выявлено увеличение значений условной плотности, которые характерны для глубин выклинивания и экстремумов биогенных элементов.

Содержание биогенных веществ и их распределение в верхних слоях воды в значительной степени зависит от сезонной стратификации, поступления стоков с побережья, а также от интенсивности потребления фитопланктоном.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН» № 0128-2021-0013.

Авторы заявляют об **отсутствии конфликта интересов**, требующего раскрытия в данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Часовников В.К. Особенности вертикального распределения гидрохимических параметров в Черном море // Комплексные исследования Черного моря. М.: Научный мир, 2011. С. 224–239.
2. Андреев В.В., Алымов М.В. Современная структура вертикального распределения биогенных элементов в Среднем и Южном Каспии // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2008. № 3 (4). С. 49–53.
3. Антипова Е.А., Часовников В.К., Подымов О.И., Якушев Е.В., Ковалева И.А., Куприкова Н.Л., Меньшикова Н.М., Подымова О.И., Чжу В.П. Изучение сезонной изменчивости биогенных элементов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря на примере Геленджикской и Голубой бухт // Современные проблемы аридных и семиаридных экосистем юга России : сб. науч. ст. / Под ред. Г.Г. Матишова. Ростов-н/Д.: Изд-во Южного научного центра Российской академии наук, 2006. С. 504–517.
4. Ерофеева И.А., Михайлов В.А., Рогожин В.С., Самборский Т.В. Экологическое состояние вод Голубой бухты города Геленджик // Морские исследования и образование (MARESEDU-2017) : матер. VI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 30 октября – 2 ноября 2017 г.). М.: Изд-во Центра морских исследований Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, ПолиПРЕСС, 2017. С. 162–165.
5. Подымов О.И., Зацепин А.Г., Очеретник В.В. Рост солености и температуры в деятельном слое северо-восточной части Черного моря с 2010 по 2020 год // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 3 (219). С. 279–287. doi: 10.22449/0233-7584-2021-3-279-287.
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности / Под ред. Д.Е. Гершановича, А.И. Рябинина, А.И. Симонова. СПб: Гидрометеорологическое издательство, 1992. 218 с.
7. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К., Сухих Л.И. Моделирование долговременной изменчивости экосистемы Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. № 24. С. 99–115.
8. Скопинцев Б.А. Формирование современного химического состава вод Черного моря. СПб: Гидрометеорологическое издательство, 1975. 336 с.
9. Shapiro G.I., Stanichny S.V., Stanychna R.R. Anatomy of shelf–deep sea exchanges by a mesoscale eddy in the North West Black Sea as derived from remotely sensed data // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114, no. 4. Pp. 867–875. doi: 10.1016/j.rse.2009.11.020.
10. Кубрякова Е.А., Коротаев Г.К. Сезонная изменчивость циркуляции и формирование солености поверхностных вод Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2013. № 3. С. 3–12.
11. Совга Е.Е., Жоров В.А., Богуславский С.Г., Сидень В.П. Потоки минеральных форм азота в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2001. № 3. С. 112–123.
12. Кубрякова Е.А., Коротаев Г.К. Влияние вертикальных движений на поддержание баланса нитратов в Черном море на основе численного моделирования // Океанология. 2016. Т. 56, № 1. С. 1–11. doi: 10.7868/S0030157416010081.
13. Косенко Ю.В. Основные аспекты баланса биогенных элементов в Азовском море // Водные биоре-

- сурсы и среда обитания. 2019. Т. 2, № 4. С. 24–37. doi: 10.47921/2619-1024_2019_2_4_24.
14. Стельмах Л.В., Губанов В.И., Бабич И.И. Сезонные изменения скорости роста и лимитирование фитопланктона питательными веществами в прибрежных водах Черного моря в районе Севастополя // *Морской экологический журнал*. 2004. Т. 3, № 4. С. 55–73.
 15. Лопухин А.С., Овсяный Е.И., Романов А.С., Ковардаков С.А., Сысоева И.В., Брянцева Ю.В., Рылькова О.А., Гаврилова Н.А., Губанов В.В., Лопухин С.А., Каменир Ю.Г., Гомис К., Вильсон Д.Г., Кемп Р.Б. Сезонные особенности гидролого-гидрохимической структуры вод Севастопольской бухты, микропланктон и распределение его биохимических компонент (Черное море, наблюдения 2004–2005 гг.) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2007. № 15. С. 74–109.
 16. Экологический атлас. Черное и Азовское моря / Под ред. А.И. Исаченко, Е.А. Смирновой. М.: Изд-во Фонда «Национальное интеллектуальное развитие», 2019. 464 с.
 17. Финкельштейн М.С., Проненко С.М. Тенденции многолетних изменений концентраций фосфатов в западной части Черного моря // *Экология моря*. 1991. Т. 39. С. 1–5.
 18. Полухин А.А. Гидрохимические параметры и методы их определения // *Плавающий университет ИО РАН : матер. 1-ой науч. школы (г. Москва, 15–18 апреля 2018 г.)*. URL: <https://www.ocean.ru/index.php/homepage/item/1083-poleznye-materialy> (дата обращения 20.09.2021).
 19. Алекин О.А., Ляхин Ю.И. *Химия океана*. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 344 с.
- ## REFERENCES
1. Chasovnikov V.K. Osobennosti vertikal'nogo raspredeleniya gidrokhimicheskikh parametrov v Chernom more [Features of vertical distribution of hydrochemical parameters in the Black Sea]. In: *Kompleksnyye issledovaniya Chernogo morya [Multidisciplinary studies of the Black Sea]*. Moscow: Nauchnyy mir [Scientific World Publishing House], 2011, pp. 224–239. (In Russian).
 2. Andreev V.V., Alymov M.V. Sovremennaya struktura vertikal'nogo raspredeleniya biogenykh elementov v Srednem i Yuzhnom Kaspii [Modern structure of vertical distribution of biogenic elements in the Middle and Southern Caspian Sea]. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki [Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences]*, 2008, no. 3 (4), pp. 49–53. (In Russian).
 3. Antipova E.A., Chasovnikov V.K., Podymov O.I., Yakushev E.V., Kovaleva I.A., Kuprikova N.L., Menshikova N.M., Podymova O.I., Chzhu V.P. Izucheniye sezonnoy izmenchivosti biogenykh elementov v pribrezhnoy zone severo-vostochnoy chasti Chernogo morya na primere Gelendzhikskoy i Goluboy bukht [The study of the seasonal variability of nutrients in the Northeastern Black Sea coastal region through the example of the Gelendzhik and Golubaya (Blue) Bays]. In: *Sovremennyye problemy aridnykh i semiaridnykh ekosistem yuga Rossii : sbornik nauchnykh statey [Modern problems of arid and semiarid ecosystems of the South of Russia. Collection of scientific papers]*. G.G. Matishov (Ed.). Rostov-on-Don: Yuzhnyy nauchnyy tsentr Rossiyskoy akademii nauk [Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2006, pp. 504–517. (In Russian).
 4. Erofeeva I.A., Mikhaylov V.A., Rogozhin V.S., Samborskiy T.V. Ekologicheskoye sostoyaniye vod Goluboy bukhty goroda Gelendzhik [Ecological state of the waters of the Blue Bay of Gelendzhik]. In: *Morskie issledovaniya i obrazovaniye (MARESEDU-2017) : materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Moskva, 30 oktyabrya – 2 noyabrya 2017 g.) [Marine research and education (MARESEDU-2017). Proceeding of the 6th International Research and Practice Conference (Moscow, 30 October –2 November, 2017)]*. Moscow: Tsentr morskikh issledovaniy Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta imeni M.V. Lomonosova [Lomonosov Moscow State University Marine Research Center] Publ., PoliPRESS [PolyPRESS], 2017, pp. 162–165. (In Russian).
 5. Podymov O.I., Zatsepin A.G., Ocherednik V.V. Rost solenosti i temperatury v deyatel'nom sloe severo-vostochnoy chasti Chernogo morya s 2010 po 2020 god [Increase of temperature and salinity in the active layer of the North-Eastern Black Sea from 2010 to 2020]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal [Marine Hydrophysical Journal]*, 2021, vol. 37, no. 3 (219), pp. 279–287. doi: 10.22449/0233-7584-2021-3-279-287. (In Russian).
 6. Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. T. 4. Chernoe more. Vyp. 2. Gidrokhimicheskie usloviya i okeanologicheskie osnovy formirovaniya biologicheskoy produktivnosti [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. 4. The Black Sea. Issue 2. Hydrochemical conditions and oceanological fundamentals for biological productivity formation]. D.E. Gershanovich, A.I. Ryabinin, A.I. Simonov (Eds.). Saint Petersburg: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 1992, 218 p. (In Russian).
 7. Dorofeev V.L., Korotaev G.K., Sukhikh L.I. Modelirovaniye dolgovremennoy izmenchivosti ekosistemy Chernogo morya [Modeling of long-term variability of the Black Sea ecosystem]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoye ispol'zovaniye resursov shel'fa [Ecological Safety of*

- Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*], 2011, no. 24, pp. 99–115. (In Russian).
8. Skopintsev B.A. Formirovanie sovremennogo khimicheskogo sostava vod Chernogo morya [Formation of the present-day chemical composition of the Black Sea waters]. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat [Hydro-meteorological Publishing House], 1975, 336 p. (In Russian).
 9. Shapiro G.I., Stanichny S.V., Stanychna R.R. Anatomy of shelf–deep sea exchanges by a mesoscale eddy in the North West Black Sea as derived from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, vol. 114, no. 4, pp. 867–875. doi: 10.1016/j.rse.2009.11.020.
 10. Kubryakova E.A., Korotaev G.K. Sezonnaya izmenchivost' tsirkulyatsii i formirovanie solenosti poverkhnostnykh vod Chernogo morya [Seasonal variability of circulation and formation of salinity of surface waters of the Black Sea]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal [Marine Hydrophysical Journal]*, 2013, no. 3, pp. 3–12. (In Russian).
 11. Sovga E.E., Zhorov V.A., Boguslavskiy S.G., Siden V.P. Potoki mineral'nykh form azota v Chernom more [Flows of mineral forms of nitrogen in the Black Sea]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]*, 2001, no. 3, pp. 112–123. (In Russian).
 12. Kubryakova E.A., Korotaev G.K. Influence of vertical motions on maintaining the nitrate balance in the Black Sea based on numerical simulation. *Oceanology*, 2016, vol. 56, no. 1, pp. 30–40. doi: 10.1134/S0001437016010082.
 13. 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, pp. 24–37. doi: 10.47921/2619-1024_2019_2_4_24. (In Russian).
 14. Stelmakh L.V., Gubanov V.I., Babich I.I. Sezonnaya izmeneniya skorosti rosta i limitirovanie fitoplanktona pitatel'nymi veshchestvami v pribrezhnykh vodakh Chernogo morya v rayone Sevastopolya [Seasonal variations of phytoplankton growth rate and its limitation by nutrients in coastal waters of the Black Sea near Sevastopol]. *Morskoy ekologicheskii zhurnal [Marine Ecological Journal]*, 2004, vol. 3, no. 4, pp. 55–73. (In Russian).
 15. Lopukhin A.S., Ovsyanyy E.I., Romanov A.S., Kovardakov S.A., Syssoeva I.V., Bryantseva Yu.V., Rylkova O.A., Gavrilova N.A., Gubanov V.V., Lopukhin S.A., Kamenir Yu.G., Gomis K., Vilson D.G., Kemp R.B. Sezonnnye osobennosti gidrologo-gidrokhimicheskoy struktury vod Sevastopol'skoy bukhty, mikroplankton i raspredelenie ego biokhimicheskikh komponent (Chernoe more, nablyudeniya 2004–2005 gg.) [Seasonal features of the hydrological and hydrochemical structure of the waters of the Sevastopol Bay, microplankton and distribution of its biochemical components (Black Sea, observations 2004–2005)]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]*, 2007, no. 15, pp. 74–109. (In Russian).
 16. *Ekologicheskii atlas. Chernoe i Azovskoe morya [Environmental atlas. Black and Azov Seas]*. A.I. Isachenko, E.A. Smirnova (Eds.). Moscow: Fond “Natsional'noe intellektual'noe razvitie” [Foundation “National Intellectual Development”] Publ., 2019, 464 p. (In Russian).
 17. Finkelshteyn M.S., Pronenko S.M. Tendentsii mnogoletnykh izmeneniy kontsentratsiy fosfatov v zapadnoy chasti Chernogo morya [Tendencies of many-year variations in phosphate concentration in the western part of the Black Sea]. *Ekologiya morya [Ecology of the Sea]*, 1991, vol. 39, pp. 1–5. (In Russian).
 18. Polukhin A.A. Gidrokhimicheskie parametry i metody ikh opredeleniya [Hydrochemical parameters and methods of their determination]. In: *Plavuchiy universitet IO RAN : materialy 1-oy nauchnoy shkoly (g. Moskva, 15–18 aprelya 2018 g.) [Floating University of the Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences. Proceedings of the 1st Scientific School (Moscow, 15–18 April, 2018)]*. Available at: <https://www.ocean.ru/index.php/homepage/item/1083-poleznye-materialy> (accessed 20.09.2021). (In Russian).
 19. Alekin O.A., Lyakhin Yu.I. Khimiya okeana [Ocean chemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydro-meteorological Publishing House], 1984, 344 p. (In Russian).

Поступила 16.11.2021

Принята к печати 22.12.2021