

Водные биоресурсы и среда обитания

2019, том 2, номер 1, с. 7–19

<http://journal.azniir.kh.ru>, www.azniir.kh.ru

ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



Aquatic Bioresources & Environment

2019, vol. 2, no. 1, pp. 7–19

<http://journal.azniir.kh.ru>, www.azniir.kh.ru

ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

Экологические проблемы и состояние водной среды

УДК 551.464.6(262.5)

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИНАМИКИ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ АКВАТОРИИ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2019 Т. Е. Баскакова, Ю. В. Косенко, Е. И. Бурдина

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»),

Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), Ростов-на-Дону 344002, Россия

E-mail: lab.gidrochimiya@mail.ru

Аннотация. В работе проведено исследование пространственно-временной динамики биогенных веществ в глубоководной и прибрежной акваториях Черного моря за многолетний период 1996–2018 гг. Исследования осуществлялись в весенний (март–апрель–май) и летне-осенний (август–сентябрь) сезоны года. Отбор проб проводили по стандартным горизонтам до глубины 200 м. Показано, что на глубоководной акватории Черного моря сезонная динамика и экстремумы распределения биогенных веществ тесно связаны с биологическими и гидрологическими процессами в водной толще. При подъеме глубинных вод отмечено пополнение деятельного слоя минеральными азотом и фосфором. Накопление органических форм азот- и фосфорсодержащих соединений при фотосинтезе сопровождается истощением их минеральной составляющей. Динамика биогенных соединений в прибрежной части моря в гораздо меньшей степени подвержена сезонной изменчивости. Главной особенностью вертикального распределения биогенных веществ в прибрежной зоне является их максимум в поверхностном слое. Среди гидродинамических факторов в прибрежной зоне большое значение имеет апвеллинг. Анализ многолетних данных двух периодов 1960–1970 и 1996–2018 гг. показал идентичность вертикального распределения концентраций азота и фосфора в глубоководной части моря с увеличением доли органической составляющей в деятельном слое в современный период в сравнении с 1960–1970 гг.

Ключевые слова: Черное море, биогенные элементы, прибрежная зона, глубоководная зона, глубинные воды, фитопланктон

SPATIO-TEMPORAL FEATURES OF THE NUTRIENTS DYNAMICS IN THE NORTHEASTERN BLACK SEA

T. E. Baskakova, Yu. V. Kosenko, E. I. Burdina

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: lab.gidrochimiya@mail.ru

Abstract. Spatio-temporal dynamics of nutrients in the deep and coastal waters of the Black Sea for the long-term period of 1996–2018 was investigated. The research was carried out in the spring (March–April–May) and summer-autumn (August–September) periods of the year. Samples were collected at a standard depth down to 200 m. It has been shown that in the deep-water area of the Black Sea, seasonal dynamics of nutrients and their distribution extremes are closely related to biological and hydrological processes in the water column. During upwelling phenomena, supplementing of the active layer with mineral nitrogen and phosphorus is observed. Accumulation of organic forms of nitrogen- and phosphorus-containing compounds during a photosynthetic process is accompanied by depletion of their mineral constituent. The dynamics of biogenic compounds in the coastal part of the sea are much less susceptible to seasonal variation. The main feature of the vertical distribution of biogenic substances in coastal waters is their highest concentration in the surface layer. Among the dynamic factors in the coastal zone, upwelling is of great importance. Detailed analysis of multi-year data from two periods (1960–1970 and 1996–2018) showed the identity of the vertical distribution of nitrogen and phosphorus concentrations in the deep sea with an increase in the portion of the organic component in the active layer in the modern period in comparison with 1960–1970.

Keywords: Black Sea, biogenic elements, coastal zone, deep-water zone, deep water, phytoplankton

ВВЕДЕНИЕ

Отличительной особенностью Черного моря является слабый обмен между поверхностными и глубинными водами, обусловленный наличием постоянного галоклина, который разделяет его толщу на две относительно изолированные зоны. Основная часть продукционно-деструкционных процессов протекает в верхнем 100–200-метровом кислородсодержащем слое. В пределах сероводородной зоны, занимающей более 80 % объема моря, сосредоточена основная часть минеральных соединений азота (в форме аммония), фосфора, кремния. В Черном море биогенные вещества потребляются водными растениями в фотосинтезирующем слое 0–30 м. Пополнение продуктивной зоны глубоководной части моря биогенными веществами осуществляется турбулентным перемешиванием и вертикальной циркуляцией вод. Именно благодаря постоянно наблюдающемуся подъему глубинных вод, обогащающему зону фотосинтеза биогенными веществами, формируются промысловые районы и химическая база фотосинтеза [1–3].

Гидрохимическая структура прибрежных вод отличается от вод открытого моря. Среди динамических факторов в прибрежной зоне большое значение имеет прибрежный апвеллинг. Кроме того, прибрежная зона моря подвержена значительному антропогенному воздействию [4].

Показано, что в фотосинтезирующем слое также создается малый круговорот кремния, поэтому его концентрация в течение года варьирует в широких пределах — от 30 до 300 мг/м³, но никогда не падает до нуля [5]. Исследованиями А.П. Виноградова (1935) установлено, что в состав диатомовых

входит 17 % углеводов и 43 % оксида кремния (на сухой вес) [6], что позволило А.Н. Богоявленскому (1966) рассчитать, что на 1 м² поверхности воды связывается 0,20–0,43 кг/год оксида кремния [7].

Кроме автохтонных процессов, одним из важных факторов прихода соединений азота и фосфора является их поступление с атмосферными осадками. Так, концентрация нитритов в дождевых водах, по данным единичных наблюдений, выполненных в центральных районах Черного моря, изменяется от 0 до 5 мг/м³ при среднем значении 0,7 мг/м³. В этом случае в море ежегодно поступает 153 т нитритного азота с атмосферными осадками при их объеме 218 км³. Содержание растворенного фосфора в атмосферных осадках над акваторией Черного моря колеблется в пределах 0,3–6,0 мг/м³ при среднем значении 2 мг/м³. В этом случае в море с атмосферными осадками ежегодно поступает 436 т фосфатов [5].

Немаловажен также обмен биогенными элементами с Азовским морем через Керченский пролив. Концентрация нитритов в черноморских водах, поступающих в Азовское море, в среднем составляет 3 мг/м³. В азовоморских водах средняя концентрация нитритного азота 3–7 мг/м³, что в итоге определяет в среднем ежегодную аккумуляцию 100 т нитритного азота в Черном море. Обмен фосфатами через Керченский пролив характеризуется стоком фосфатов в пролив (380 т/год) и притоком из пролива (1000 т/год). Биогенный сток кремниевой кислоты из Азовского моря превышает отток из Черного на 9 тыс. т ежегодно [5].

Известно также, что различные виды водорослей нуждаются в разной концентрации солей азота.

Например, некоторые синезеленые водоросли *Anabaena*, *Microcystis pulverea*, а также молодые клетки диатомей усваивают в первую очередь аммонийный азот. При использовании в качестве источника азота азотнокислого аммония наблюдается сначала быстрое усвоение аммонийного иона, после полного поглощения которого водоросли начинают интенсивно использовать нитраты [8]. При дефиците в воде нитратов отмечается угнетение развития синезеленых и некоторых зеленых (хлорококковых) водорослей [9]. Одним из основных источников азотных соединений в водных объектах является усвоение азотфиксирующими бактериями и синезелеными водорослями молекулярного азота. Следует отметить также, что интенсивно развивающиеся в последнее десятилетие в Черном море кокколитофориды, обладая малыми линейными размерами (6–8 мкм), могут расти с максимальной скоростью даже при очень низких концентрациях биогенных веществ [10].

Таким образом, изучение распределения и круговорота биогенных элементов в Черном море необходимо для оценки первичной продукции органического вещества при фотосинтезе, которая

служит основой всех пищевых цепей и определяет его конечную рыбохозяйственную продуктивность. В силу вышеизложенного целью наших исследований явилась оценка динамики биогенных веществ в Черном море как основного фактора, определяющего условия создания первичного органического вещества для существования биопромысловых водных объектов Черного моря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Гидрохимические исследования в Черном море были проведены АзНИИРХ с 1996 по 2018 г. в весенний (март–апрель–май) и летне-осенний (август–сентябрь) периоды. Анализ выполненных в различные годы съемок позволил изучить реакцию гидрохимических показателей на фотосинтетические и гидрофизические процессы в водной толще. Материал был собран в северо-восточной части Черного моря, охватывающей прибрежную акваторию (15–19 станций) и глубоководную зону (8 станций, с 2016 г. — 2 станции), находящуюся под влиянием основного черноморского течения (рис. 1).

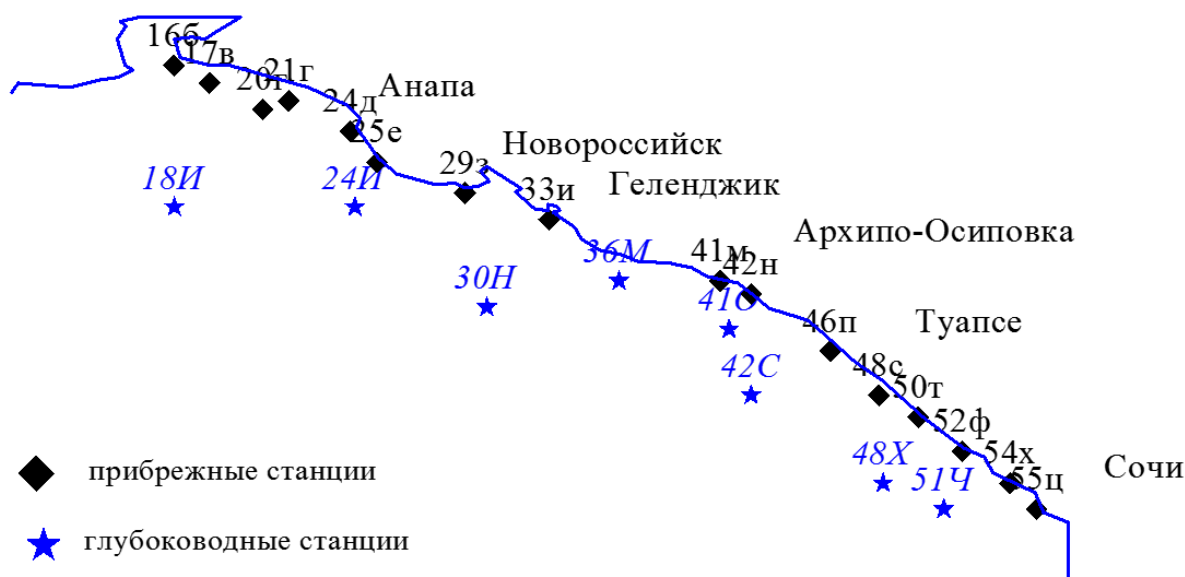


Рис. 1. Схема расположения стандартных гидрохимических станций

Fig. 1. Sites of standard hydrochemical stations

Отбор проб проводился в прибрежной зоне на горизонтах 0, 10, 20, 30, 50 м и в глубоководной — 0, 10, 20, 30, 50, 100, 200 м. Гидрофизическое зондирование осуществлялось СТД-зондом SBE-19 Plus. Пробы отбирались из винипластовых батометров, закрепленных в кассете вместе с зондом.

В воде определяли концентрации азота аммонийного (РД 52.24.383), нитритного (РД 52.24.518), нитратного (РД 52.24.523), фосфатов (РД 52.24.382), кремниевой кислоты (РД 52.24.433; РД 52.24.432), общего азота (РД 52.24.364) и общего фосфора (РД.52.24.387).

Отбор, хранение и транспортировку проб воды выполняли в соответствии с требованиями методик и согласно ГОСТ 31861-2012, ГОСТ 17.1.5.05-85.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственное распределение биогенных веществ в воде глубоководной зоны северо-восточной акватории Черного моря

Средние значения концентрации аммонийного азота в глубоководной части моря, рассчитанные по нашим данным в слое 0–30 м, составляют для весеннего сезона 39 мг/м³, летне-осеннего — 23 мг/м³, что близко к величинам, приводимым В.В. Сапожниковым (в среднем 40 мг/м³ ранней весной и 20 мг/м³ летом) [11] и В.Е. Виноградовым

(30 и 20 мг/м³, соответственно) [12]. При этом в летне-осенний период скорость потребления аммония как наиболее легко усваиваемой водорослями формы минерального азота может превышать скорость его регенерации микропланктоном, что приводило к достоверному ($p < 0,05$) снижению среднесезонного значения аммонийного азота в летне-осенний период относительно весеннего в деятельном слое. В редокс-слое (100–200 м) отмечается непрямая регенерация органических веществ, которая протекает крайне медленно под воздействием как нитрифицирующих (в присутствии кислорода), так и денитрифицирующих (в условиях дефицита кислорода) бактерий. Средняя концентрация аммонийного азота на глубинах 100–200 м достигает максимума 148–200 мг/м³ (табл. 1).

Табл. 1. Концентрации биогенных веществ в глубоководной зоне северо-восточной части Черного моря за период 1996–2018 гг., мг/м³

Table 1. Concentrations of nutrients in the deep-water zone of the north-eastern Black Sea for the period of 1996–2018, mg/m³

Горизонт, м Depth, m		0 (n = 106)	10 (n = 106)	20 (n = 106)	30 (n = 106)	50 (n = 106)	100 (n = 106)	200 (n = 106)
Показатель, период исследования Parameter, research period								
NH ₄	весенний spring	<u>38</u> 10–91	<u>40</u> 11–133	<u>39</u> 11–102	<u>40</u> 11–68	<u>57</u> 11–450	<u>42</u> 13–210	<u>200</u> 122–289
	летне-осенний summer-autumn	<u>26</u> 10–56	<u>38</u> 11–360	<u>21</u> 10–27	<u>23</u> 10–78	<u>26</u> 10–89	<u>31</u> 11–156	<u>148</u> 86–286
	среднее average value	32	33	30	33	32	36	174
NO ₂	весенний spring	<u>0,80</u> 0,08–6,0	<u>2,83</u> 0,08–19,0	<u>0,85</u> 0,08–2,5	<u>0,79</u> 0,07–3,2	<u>0,89</u> 0–2,1	<u>1,27</u> 0–7,7	<u>0,60</u> 0–1,57
	летне-осенний summer-autumn	<u>0,74</u> 0,07–2,18	<u>0,75</u> 0,2–2,09	<u>0,79</u> 0,24–2,44	<u>1,22</u> 0–4,42	<u>1,41</u> 0–5,1	<u>0,83</u> 0–2,3	<u>0,61</u> 0–0,12
	среднее average value	0,77	1,62	0,82	1,01	1,25	1,05	0,60
NO ₃	весенний spring	<u>7</u> 3–18	<u>5</u> 2–18	<u>7</u> 3–18	<u>9</u> 3–37	<u>15</u> 3–57	<u>50</u> 5–99	<u>11</u> 3–22
	летне-осенний summer-autumn	<u>7</u> 4–13	<u>8</u> 3–12	<u>5</u> 3–13	<u>7</u> 4–14	<u>11</u> 5–28	<u>52</u> 12–59	<u>13</u> 5–22
	среднее average value	7	7	6	8	13	51	12
PO ₄	весенний spring	<u>14</u> 1–63	<u>13</u> 2–28	<u>12</u> 0–24	<u>10</u> 1–28	<u>14</u> 3–35	<u>31</u> 6–183	<u>168</u> 26–350
	летне-осенний summer-autumn	<u>5</u> 2–9	<u>5</u> 2–12	<u>5</u> 2–13	<u>4</u> 1–16	<u>7</u> 3–16	<u>27</u> 6–50	<u>128</u> 57–203
	среднее average value	10	9	9	7	10	29	148
SiO ₃	весенний spring	<u>233</u> 90–980	<u>183</u> 10–410	<u>183</u> 90–290	<u>250</u> 100–300	<u>534</u> 120–1270	<u>890</u> 330–4300	<u>2850</u> 600–5600
	летне-осенний summer-autumn	<u>40</u> 10–170	<u>45</u> 10–20	<u>65</u> 10–240	<u>77</u> 60–250	<u>220</u> 70–320	<u>610</u> 180–1470	<u>2220</u> 530–4390
	среднее average value	136	114	124	163	370	750	2535

Колебания средних концентраций нитритов на глубине до 200 м варьируют в узком диапазоне 0,77–1,62 мг/м³. Присутствуют нитриты преимущественно в зоне фотосинтеза (0–30 м), где, по средним оценкам, их концентрация составляет 1,06 мг/м³ (табл. 1).

Нитраты являются конечным продуктом минерализации органического азота и в морской воде варьируют от 2 до 99 мг/м³. В верхних слоях в результате интенсивного фотосинтеза средняя концентрация их минимальна (5–9 мг/м³). С глубиной содержание нитратов повышается вследствие уменьшения их потребления и активизации процессов регенерации. Начиная с горизонта 50 м, средняя концентрация нитратного азота возрастает и достигает своего максимума (в среднем 51 мг/м³) в районе 100 м глубины (табл. 1).

Средняя концентрация минерального фосфора в приповерхностных водах Черного моря (0–30 м) составляла в весенний период 12 мг/м³, в летне-осенний — 5 мг/м³. В весенний период отмечено более высокое среднее содержание фосфатов относительно летне-осеннего, что обусловлено сезонным поднятием глубинных вод (табл. 1). Наибольшая концентрация фосфатов наблюдалась в глубоководных горизонтах (на 200 м в среднем 148 мг/м³), что согласуется с литературными данными [13].

Наиболее консервативным гидрохимическим показателем, не вовлеченным в процессы, протекающие при смене окислительно-восстановительных условий, является кремниевая кислота [1]. Основным путем выведения кремния из морской воды — биогенный (потребление фитопланктоном). Для вертикального распределения характерно монотонное увеличение концентрации кремниевой кислоты с глубиной. Наиболее часто слой минимальных концентраций кремния залегает на глубинах 10–30 м, где, по наблюдениям Н.В. Морозовой-Водяницкой (1954), расположен максимум концентрации диатомовых водорослей [14]. Пороговая концентрация кремния, ограничивающая фотосинтез диатомовых (500 мг/м³), фиксируется на 50 м весной и заглубляется до 75 м осенью. В деятельном слое в летне-осенний период концентрация кремниевой кислоты значительно ниже, чем в весенний, в связи с развитием осеннего комплекса диатомовых водорослей. Кроме того, ярко выраженная сезонная динамика содержания кремниевой кислоты свидетельствует о ее зависимости от внутренней динамики вод Черного моря.

Вертикальные максимумы биогенных веществ в глубоководной зоне Черного моря, связанные с их регенерацией, показаны нормированными рядами, в связи с трудностями визуализации данных, отличающихся величиной измерения на порядки относительно друг друга (рис. 2). Нормирование рядов осуществлялось в программе Descriptive Statistics и вычислялось по формуле $N = (n_i - n_{cp}) / S$, где S — стандартное отклонение [15]. Далее по тексту рассматриваются колебания содержания биогенных веществ в единицах измерения.

Установлено, что прямая регенерация биогенных веществ формирует верхние максимумы восстановленной и окисленной форм азота и фиксируется обычно в слое фотосинтеза или его подстилающем. Пик концентрации аммонийного азота отмечается весной в приповерхностных горизонтах 0–10 м (133 мг/м³) или на глубине 30–50 м (180–450 мг/м³). Осенью максимум аммония (120–360 мг/м³) фиксируется на глубине 10 м, что связано с оседанием значительного количества органических веществ, образованных при фотосинтезе. Нитритный азот характеризуется двумя резкими максимумами: в слое фотосинтеза (4,4–19,0 мг/м³) и в слое нитроклина на глубинах 50–100 м (5,1–7,7 мг/м³). Рост нитратов происходит в диапазоне глубин 50–100 м. Среднее содержание нитратов в этом слое варьирует от 15 до 52 мг/м³ с максимумом 99 мг/м³. Нитраты, фосфаты и кремниевая кислота в связи с полным исчерпанием при фотосинтезе явно выраженного верхнего максимума не имеют. Общий азот в деятельном слое максимален в слоях фотосинтеза: 460 мг/м³ весной на 20 м глубине и 330–390 мг/м³ в слоях 10–30 м осенью. Максимальные значения общего фосфора отмечены на глубинах более 100 м, где в восстановительных условиях он представлен минеральной составляющей.

На глубине 200 м происходит непрямая регенерация биогенных веществ, приводящая к высоким концентрациям аммонийного азота (365 мг/м³), фосфатов (375 мг/м³) и кремния (5600 мг/м³). Для окисленных форм азота характерен, соответственно, минимум нитритов (0–0,12 мг/м³) и нитратов (2–3 мг/м³).

В глубоководной зоне северо-восточной части Черного моря наибольшая скорость фотосинтеза приходится на зимний и ранневесенний периоды, когда обеспеченность биогенным питанием самая высокая. В результате чередования вихрей различных знаков (циклоны и антициклоны в гидро-

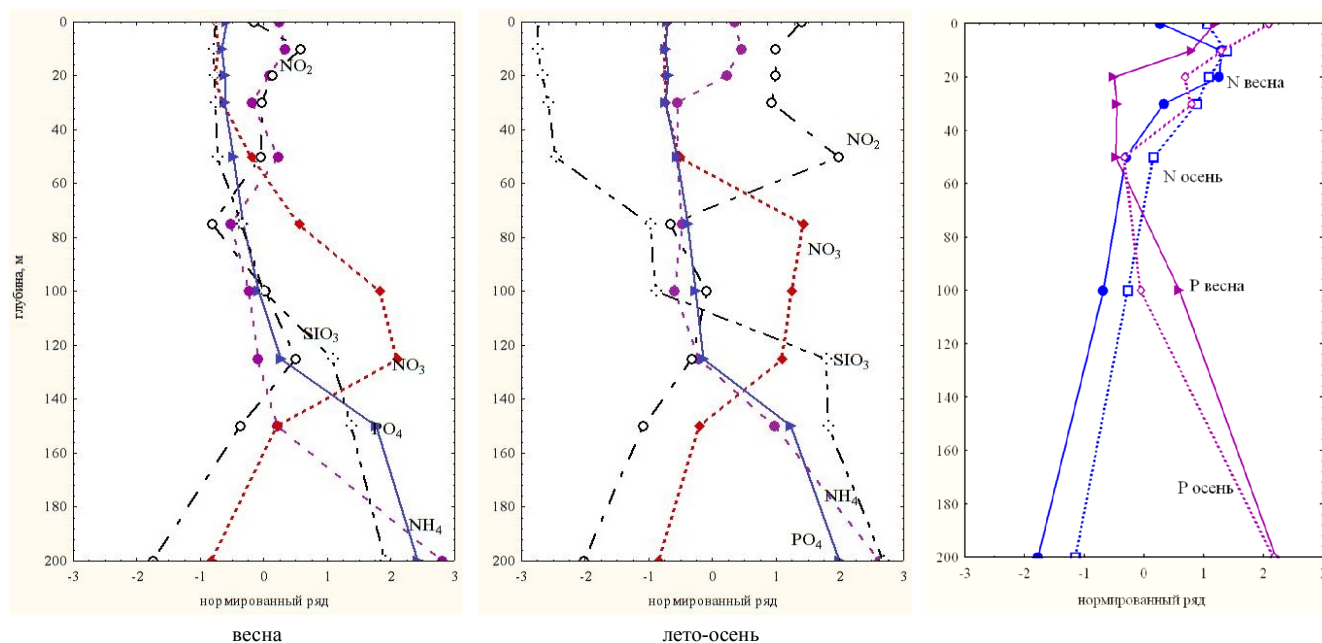


Рис. 2. Вертикальная структура экстремумов биогенных веществ в северо-восточной части Черного моря по многолетним данным 1996–2018 гг. по сезонам

Fig. 2. Vertical structure of the extremes of nutrients in the north-eastern Black Sea according to the long-term data of 1996–2018 as per seasons

сфере) создаются восходящие потоки, выносящие минеральные вещества в слой фотосинтеза, и нисходящие потоки, опускающие органические остатки, которые образуются при создании первичного органического вещества [16].

Весной происходит потребление элементов минерального питания интенсивно развивающимся фитопланктоном и увеличение содержания органического вещества в фотическом слое. Ранневесенний период (март) совпадает с началом сезона вегетации при условиях обеспеченности биогенными элементами, высокой освещенности и низкой температуры воды. В поверхностном слое в результате активизации циклонической деятельности и выноса глубинных вод отмечается избыток минерального азота. На рис. 3 на примере 1996 г. показаны изолинии, направленность которых отражает восходящие потоки минерального азота и фосфора в районах Новороссийска–Геленджика, Туапсе. Накопление органического азота и фосфора в зонах активного фотосинтеза фитопланктона сопровождается истощением их минеральных форм (рис. 3).

В апреле–мае формируется сезонный термоклин (ТК), происходит смена диатомового комплекса микроводорослей на динофитовые, отмечается истощение запасов минерального азота и фосфора в слоях фотосинтеза. Горизонтальное положение изолиний показывает нарушение водообмена между слоями и снижение скорости проникновения глу-

бинных вод. На фоне снижения минеральной составляющей отмечено накопление органических форм азота и фосфора в деятельном слое. В качестве примера ниже представлено пространственное распределение биогенных веществ в апреле–мае 2015 г. (рис. 4).

В летне-осенний период определяющей в формировании гидрохимического режима становится стратификация вод, характеризующаяся значительным заглублением изолиний минерального азота (до 100 м) и фосфора и приводящая к их дефициту в фотосинтезирующем слое. С другой стороны, возрастает накопление азот- и фосфорсодержащего органического вещества в деятельном слое. В этот период определяющим становится миксотрофное и гетеротрофное питание фитопланктона [17]. На рис. 5 отражено распределение биогенных веществ, характерное для летне-осеннего периода года на примере сентябрьской съемки 2010 г.

Таким образом, установлена четко выраженная зависимость вновь создаваемого азот- и фосфорсодержащего органического вещества от минерального в исследуемые сезоны года, что подтверждает генезис их формирования. Статистическая достоверность связи выбранных параметров достаточна высока ($r = 0,79–0,88$) (рис. 6).

Анализ многолетних данных на глубоководной акватории двух периодов 1960–1970 гг. [18] и 1996–2018 гг. (данные АзНИИРХ) показал идентичность

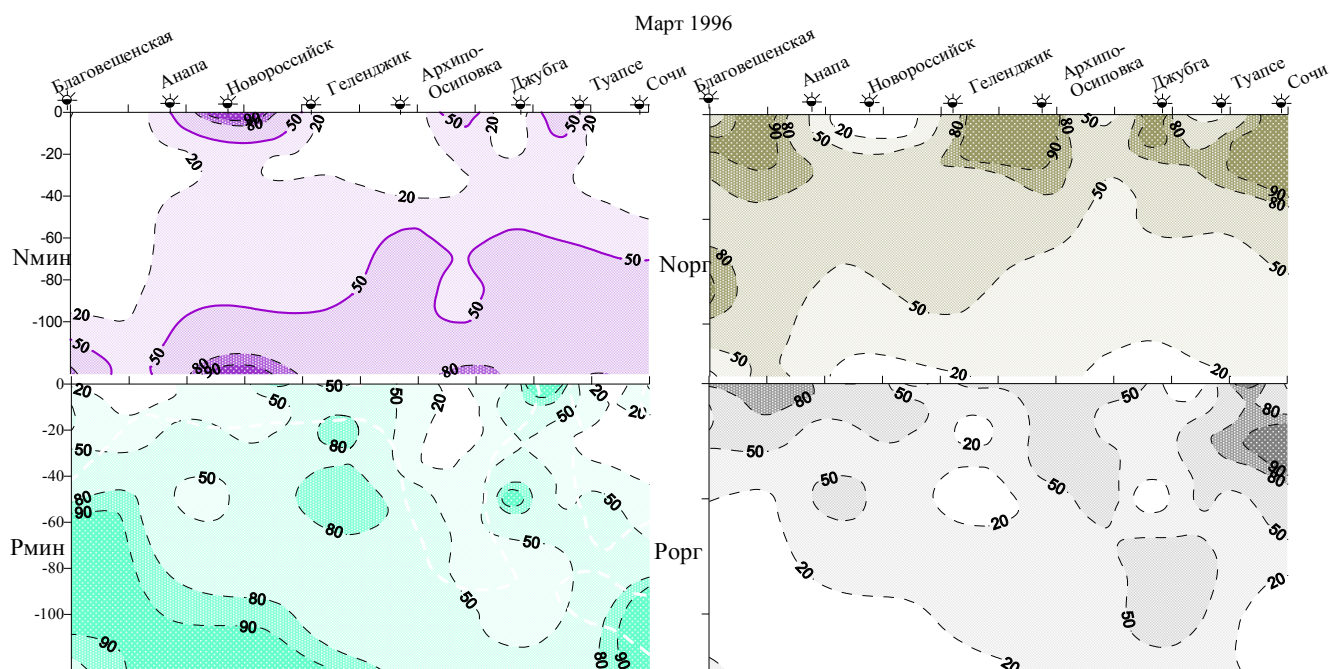


Рис. 3. Распределение минерального и органического азота и фосфора на исследуемой акватории Черного моря в ранневесенний период года

Fig. 3. Distribution of mineral and organic nitrogen and phosphorus in the studied area of the Black Sea in early spring period

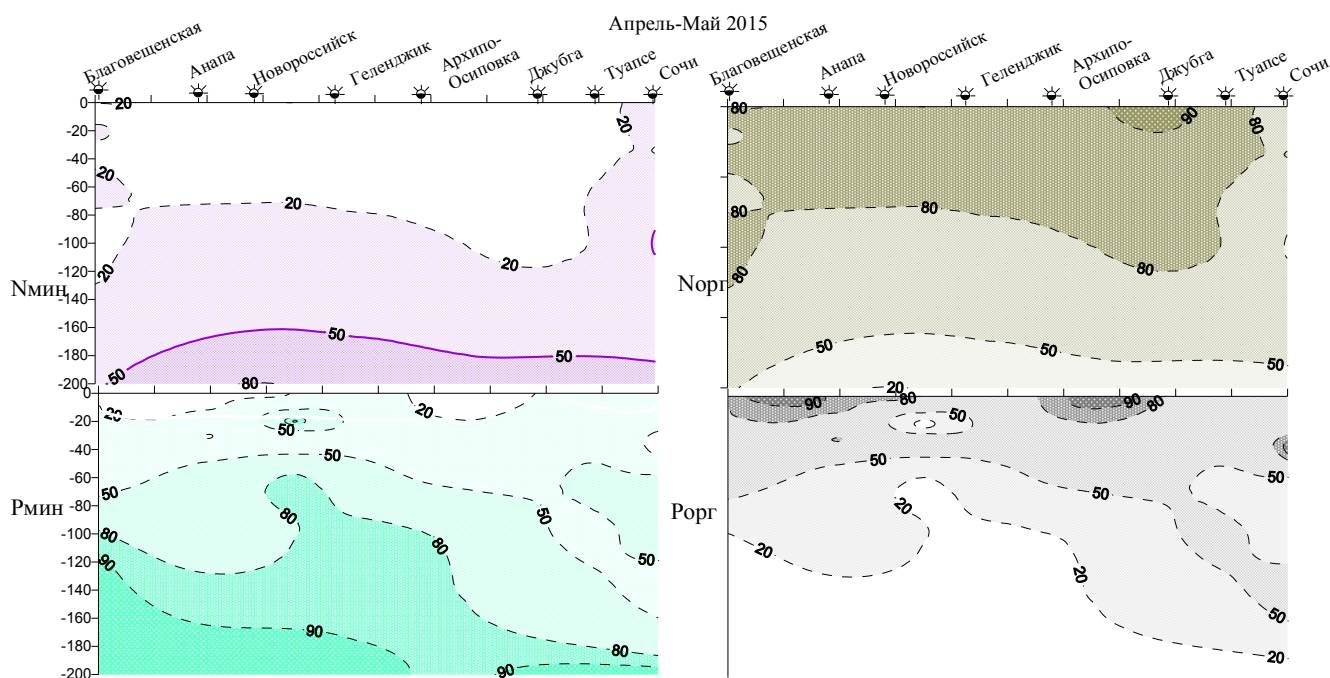


Рис. 4. Распределение минерального и органического азота и фосфора на исследуемой акватории Черного моря в весенний период года

Fig. 4. Distribution of mineral and organic nitrogen and phosphorus in the studied area of the Black Sea in spring period

вертикального распределения и концентраций минеральных форм азота и фосфора. Содержание общего азота и фосфора в деятельном слое, по оцен-

ке исследований 1960–1970 гг., составляло 310 и 16 мг/м³, соответственно. По нашим данным, содержание общего азота и фосфора характеризовалось

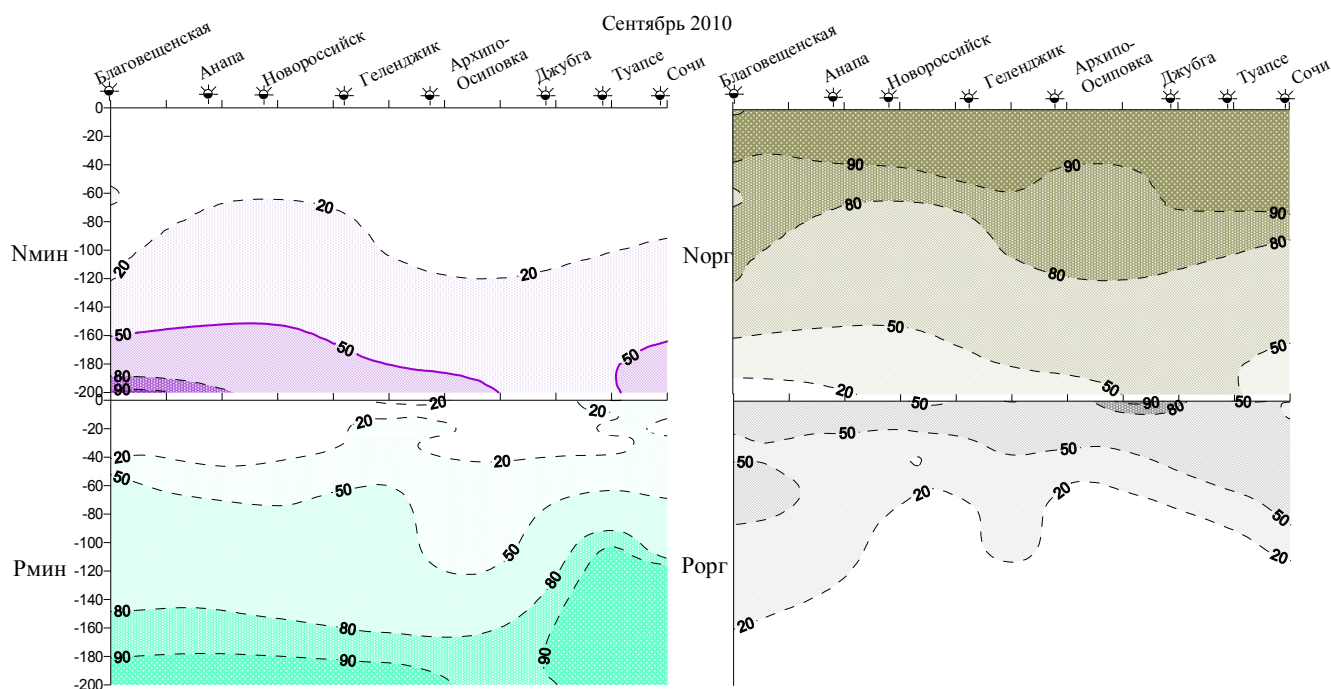


Рис. 5. Распределение минерального и органического азота и фосфора на исследуемой акватории Черного моря в летне-осенний период года

Fig. 5. Distribution of mineral and organic nitrogen and phosphorus in the studied area of the Black Sea in summer-autumn period

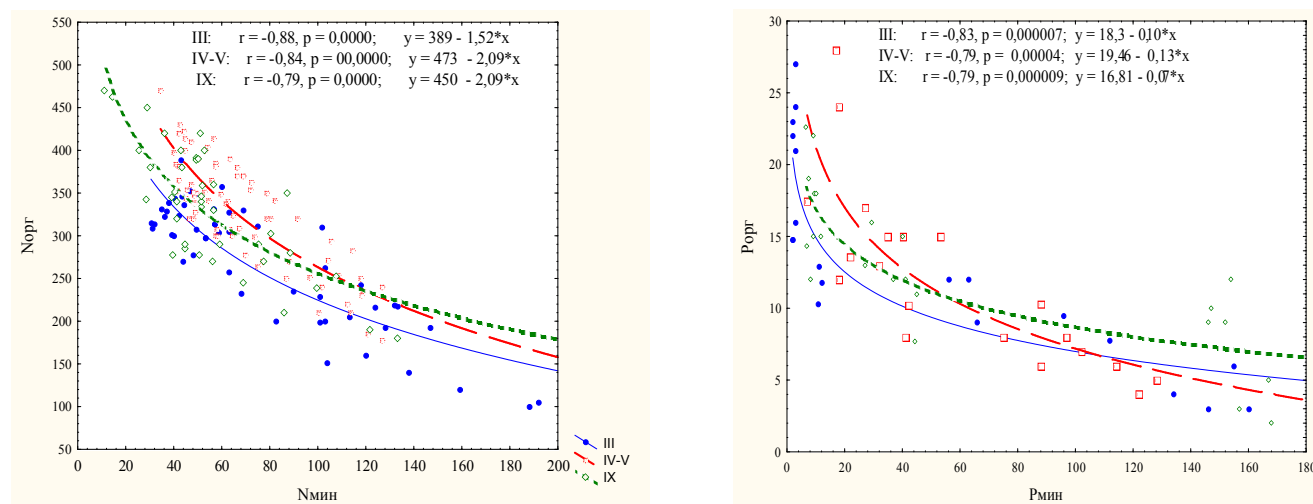


Рис. 6. Зависимость органической формы азота и фосфора от минеральной в воде Черного моря

Fig. 6. Dependence of organic forms of nitrogen and phosphorus from the mineral one in the Black Sea water

средними значениями 370 и 15 мг/м³, соответственно. Таким образом, значимых достоверных различий среднего содержания в воде общих форм азота и фосфора в Черном море в многолетнем аспекте не выявлено. Анализ относительного содержания минеральной и органической составляющей показал, что в период 1996–2018 гг., в сравнении с 1960–1970 гг., доля органического азота и фосфора в деятельном слое возросла на 9 и 20 %, соответственно (табл. 2).

Таким образом, можно констатировать, что содержание биогенных веществ в глубоководной зоне Черного моря в современный период достаточно близко к результатам исследований предшествующих лет, что свидетельствует об относительно благополучном состоянии экосистемы. При этом отмечена тенденция увеличения степени эвтрофикации воды Черного моря, которая интенсифицирует гетеротрофные процессы, что, согласно данным литературы, выражается в преимущественном

Табл. 2. Среднегодовые концентрации общего азота и фосфора и их форм в северо-восточной акватории Черного моря**Table 2.** Long-term annual average concentrations of total nitrogen and phosphorus and their forms in the north-eastern Black Sea

Горизонт, м Depth, m	N _{мин} , мг/м ³ N _{min} , mg/m ³				N _{общ} , мг/м ³ N _t , mg/m ³				N _{орг} , % N _{org} , %			
	весна spring	лето-осень summer-autumn	среднее average value	1960–1970	весна spring	лето-осень summer-autumn	среднее average value	1960–1970	весна spring	лето-осень summer-autumn	среднее average value	1960–1970
0	46	34	40	50	399	374	387	300	90	91	91	83
10	48	34	41		432	394	413		90	92	91	
20	47	27	37	47	465	327	396	320	89	93	91	81
30	50	31	41		403	331	367		86	94	90	
50	53	39	46	61	360	320	340		86	88	87	
100	93	84	89	107	335	294	315	330	69	87	78	68
200	212	177	187	270	262	242	252	290	18	25	22	7
	P _{мин} , мг/м ³ P _{min} , mg/m ³				P _{общ} , мг/м ³ P _t , mg/m ³				P _{орг} , % P _{org} , %			
	весна spring	лето-осень summer-autumn	среднее average value	1960–1970	весна spring	лето-осень summer-autumn	среднее average value	1960–1970	весна spring	лето-осень summer-autumn	среднее average value	1960–1970
0	9	5	7	4	14	13	14	8	34	62	48	50
10	11	6	8		16	17	17		31	68	49	
20	6	5	6	15	12	13	13	24	50	62	56	36
30	8	5	7		15	15	15		47	67	57	
50	10	7	8		14	21	18		29	68	48	
100	31	27	29	32	40	35	37	47	22	23	23	32
200	147	128	137	146	153	144	148	159	4	11	7	8

увеличении биомассы гетеротрофных микроорганизмов по сравнению с фитопланктоном [19]. Преобладание гетеротрофов (синезеленых, динофитовых, кокколитофорид), у которых содержание органического вещества достигает 80–95 % от сухого веса, делает их более конкурентоспособными по сравнению с автотрофами (диатомовыми), доля органического вещества которых составляет 22–50 % [18].

Пространственное распределение биогенных веществ в воде прибрежной зоны северо-восточной акватории Черного моря

Главной особенностью вертикального распределения биогенных веществ в прибрежной зоне является их максимум в поверхностном слое, что указывает на источники его формирования (поверхностный и речной сток, атмосферные осадки) (табл. 3).

Динамика биогенных соединений в прибрежной части моря в гораздо меньшей степени подвержена сезонной изменчивости, среди динамических факторов большое значение имеет прибрежный апвеллинг, возникающий при сгоне прибрежных поверхностных вод от берега сильным ветром. Сгон воды

у Кавказского побережья Черного моря, вызванный сильным северо-восточным ветром (бора), бывает столь мощным, что уровень моря у берега может понизиться за один день на 40 см. К районам, где прибрежный апвеллинг более интенсивен, относятся прибрежные акватории городов Анапа, Геленджик, Туапсе, Сочи. Районы активного черноморского апвеллинга отличаются высокой биологической продуктивностью. На струях апвеллинга формируются промысловые скопления шпрота [20]. В связи с этим аномально высокая концентрация аммонийного азота (360 мг/м³) и фосфатов (35–53 мг/м³) в придонных горизонтах может быть сформирована прибрежным апвеллингом (табл. 3).

Многолетний анализ материалов гидрохимических показателей по станциям позволил выявить акватории, испытывающие влияние поверхностного материкового стока вдоль северо-восточного побережья Черного моря. Обычно повышенные концентрации минерального азота и фосфора фиксируются в узкой полосе побережья, ограниченной 20 м глубиной в течение всего периода наблюдений. Наиболее заметное влияние ливневых потоков

ощущается в створах Анапы и Геленджика, где максимальные концентрации в поверхностном слое достигают по аммонийному азоту 80–128 мг/м³ и фосфатам 45 мг/м³; в районе Туапсе — по нитратам 26 мг/м³ и в акватории Сочи — по аммонийному азоту 80 мг/м³, нитратам — 21 мг/м³, фосфатам — 33 мг/м³ (рис. 7).

Влияние речного стока проявляется повышенным содержанием растворенной кремнекислоты (940 мг/м³) в створе Архипо-Осиповки, что благоприятствует интенсивному фотосинтезу, который

наблюдается ежегодно и указывает на влияние стока р. Вулкан с дождевым типом питания. Акватория влияния рек сочинского комплекса также характеризуется повышенным содержанием кремнекислоты.

ВЫВОДЫ

1. Сезонная динамика и экстремумы распределения биогенных веществ в глубоководной акватории Черного моря тесно связаны с биологическими и гидрологическими процессами в

Табл. 3. Концентрации биогенных веществ в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря за период 1996–2018 гг., мг/м³

Table 3. Concentrations of nutrients in the coastal zone of the northeastern Black Sea for the period of 1996–2018, mg/m³

Горизонт, м Depth, m		0 (n = 208)	10 (n = 208)	20 (n = 208)	30 (n = 208)	50 (n = 208)
Показатель, период исследования Parameter, research period						
NH ₄	весенний spring	<u>42</u> 10–128	<u>39</u> 10–56	<u>28</u> 14–77	<u>39</u> 15–360	<u>30</u> 17–55
	летне-осенний summer-autumn	<u>53</u> 10–106	<u>39</u> 12–88	<u>37</u> 11–83	<u>43</u> 21–150	<u>28</u> 17–62
	среднее average value	46	39	31	41	29
NO ₂	весенний spring	<u>1,49</u> 1–19	<u>1,27</u> 0–5,8	<u>1,42</u> 0–6,42	<u>1,63</u> 0–5,65	<u>2,1</u> 0,1–2,5
	летне-осенний summer-autumn	<u>3,6</u> 0,12–9,5	<u>1,9</u> 0,3–5,6	<u>1,88</u> 0,1–2,3	<u>1,95</u> 0,3–3,6	<u>3,47</u> 0,2–4,2
	среднее average value	2,68	1,62	1,79	1,85	2,74
NO ₃	весенний spring	<u>8</u> 0–26	<u>6</u> 1–28	<u>7</u> 2–16	<u>9</u> 3–19	<u>12</u> 3–25
	летне-осенний summer-autumn	<u>13</u> 1–26	<u>10</u> 2–19	<u>6</u> 3–10	<u>8</u> 2–9	<u>10</u> 3–12
	среднее average value	11	9	6	8	11
PO ₄	весенний spring	<u>8</u> 0–26	<u>8</u> 2–18	<u>7</u> 0–15	<u>7</u> 1–13	<u>4</u> 0–10
	летне-осенний summer-autumn	<u>22</u> 0–45	<u>18</u> 2–30	<u>13</u> 1–27	<u>10</u> 3–35	<u>14</u> 10–53
	среднее average value	14	8	10	8	7
SiO ₃	весенний spring	<u>220</u> 100–840	<u>180</u> 120–560	<u>250</u> 90–420	<u>260</u> 220–560	<u>220</u> 280–480
	летне-осенний summer-autumn	<u>220</u> 30–940	<u>150</u> 30–700	<u>110</u> 40–640	<u>130</u> 30–650	<u>220</u> 40–620
	среднее average value	220	170	180	190	220



Рис. 7. Пространственное распределение максимального содержания биогенных веществ в поверхностном слое прибрежной зоны северо-восточной части Черного моря

Fig. 7. Spatial distribution of the maximum content of nutrients in the surface layer of the coastal zone of the north-eastern Black Sea

водной толще. Показано, что при подъеме глубинных вод отмечено пополнение деятельного слоя минеральными азотом и фосфором. Накопление органических форм азот- и фосфорсодержащих соединений при фотосинтезе сопровождается истощением минеральной составляющей.

2. Анализ многолетних данных двух периодов (1960–1970 и 1996–2018 гг.) в глубоководной зоне показал идентичность вертикального распределения азота и фосфора с тенденцией увеличения доли органических форм в деятельном слое (0–50 м) в современный период.
3. Динамика биогенных соединений в прибрежной части моря в гораздо меньшей степени подвержена сезонной изменчивости, среди динамических факторов большое значение имеет прибрежный апвеллинг. Главной особенностью вертикального распределения биогенных веществ в прибрежной зоне является их максимум в поверхностном слое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безбородов А.А., Еремеев В.Н. Черное море. Зона взаимодействия аэробных и анаэробных вод. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1993. 298 с.
2. Безруков Ю.Ф. Океанология / Физические явления и процессы в океане. Симферополь: Изд-во ТНУ, 2006. Ч. 1. 159 с.
3. Иваненков В.Н. Общие сведения об азоте, фосфоре и кремнии // Химия вод океана / Под ред. А.С. Мониной, О.К. Бордовского, В.Н. Иваненкова. М.: Наука, 1979. С. 176–184.
4. Часовников В.К. Особенности гидрохимической структуры северо-восточной части Черного моря : автореф. дис. канд. геогр. наук. М.: Изд-во Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2002. 24 с.
5. Моря СССР. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР / Под ред. Ф.С. Терзиева. СПб: Гидрометеиздат, 1992. Т. 4, вып. 2. 219 с.
6. Виноградов А.П. Химический элементарный состав организмов моря // Труды биогеохим. лаб. АН СССР. 1935. Т. 3. С. 63–278.
7. Богоявленский А.Н. Распределение и миграция растворенной кремнекислоты в океанах // Геохимия кремнезема / Под ред. Н.М. Страхова. М.: Наука, 1966. С. 11–36.
8. Syrett P.J. Nitrogen metabolism. Physiological bases of phytoplankton ecology // Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences. 1981. Vol. 210. Pp. 182–210.
9. Beasley V.R., Cook W.O., Dahlem A.M., Hooser S.B., Lovell R.A., Valentine W.M. Algae intoxication in livestock and waterfowl // Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice. 1989. Vol. 5. Pp. 345–361.
10. Стельмах Л.В., Сеничева М.И., Бабич И.И. Эколого-физиологические основы «цветения» воды, вызываемого *Emiliania huxleyi* в Севастопольской бухте // Экология моря. 2009. Вып. 77. С. 28–32.
11. Сапожников В.В. Новые представления о гидрохимической структуре Черного моря // Изменчивость экосистемы Черного моря: естественные и антропогенные факторы. М.: Наука, 1991. С. 34–46.
12. Виноградов В.Е., Сапожников В.В., Шушкина Э.А. Экосистемы Черного моря. М.: Наука, 1992. 112 с.
13. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
14. Морозова-Водяницкая Н.В. Суточные изменения численности и биомассы фитопланктона в Черном море // Труды Севастопольской биологической станции АН СССР. 1954. Т. 8, ч. 1. С. 40–97.
15. Бронфман А.М., Воловик С.П., Козлитина С.В., Кучай Л.А., Попов И.В. Статистическая структура океанологических и биологических параметров экосистемы Азовского моря. Ростов-н/Д.: Изд-во РГУ, 1979. 160 с.
16. Кривенко О.В., Пархоменко А.В. Восходящий и регенерационный потоки неорганических соедине-

- ний азота и фосфора в глубоководной области Черного моря // Журнал общей биологии. 2014. Т. 75, № 5. С. 394–408.
17. Кузьменко М.И. Миксотрофизм синезеленых водорослей и его экологическое значение. К.: Наукова думка, 1981. 212 с.
 18. Скопинцев Б.А. Формирование современного химического состава Черного моря. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 336 с.
 19. Куманцов М.И., Сапожников В.В. Изменения экосистемы Черного моря и перспективы дальнейших исследований // Современные проблемы экологии Азово-Черноморского региона: матер. VI Междунар. конф. (г. Керчь, 6 октября 2010 г.). Керчь: Изд-во ЮгНИРО, 2010. С. 3–5.
 20. Боровская Р.В., Ломакин П.Д., Панов Б.Н., Спиридонова Е.О. Структура и межгодовая изменчивость характеристик прибрежного черноморского апвеллинга на основе данных спутникового мониторинга // Исследования земли из космоса. 2008. № 2. С. 23–36.
- ## REFERENCES
1. Bezborodov A.A., Ereemeev V.N. Chernoe more. Zona vzaimodeystviya aerobnykh i anaerobnykh vod [The Black Sea. The zone of interaction of aerobic and anaerobic waters]. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika [EKOSI-Hydrophysics], 1993, 298 p. (In Russian).
 2. Bezrukov Yu.F. Okeanologiya. Chast' 1. Fizicheskie yavleniya i protsessy v okeane [Oceanology. Part 1. Physical phenomena and processes in the ocean]. Simferopol: V.I. Vernadsky Taurida National University Publ., 2006, 159 p. (In Russian).
 3. Ivanenkov V.N. Obshchie svedeniya ob azote, fosfore i kremnii [General data on the nitrogen, phosphorus and silica]. In: *Khimiya vod okeana* [Chemistry of the ocean]. A.S. Monin, O.K. Bordovskiy, V.N. Ivanenkov. (Eds.). Moscow: Nauka [Science], 1979, pp. 176–184. (In Russian).
 4. Chasovnikov V.K. Osobennosti gidrokhimicheskoy struktury severo-vostochnoy chasti Chernogo morya [Special features of hydrochemical structure of the north-eastern part of the Black Sea]: avtoref. dis. kand. geogr. nauk [Extended abstract of Candidate's (Geography) thesis]. Moscow: Shirshov Institute of Oceanology of the RAS Publ., 2002, 24 p. (In Russian).
 5. Morya SSSR. Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR [The seas of the USSR. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR]. F.S. Terziev (Ed.). Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 1992, vol. 4, issue 2, 219 p. (In Russian).
 6. Vinogradov A.P. Khimicheskiy elementarnyy sostav organizmov morya [The elementary chemical composition of marine organisms]. *Trudy biogeokhimicheskoy laboratorii AN SSSR* [Proceedings of the Laboratory of Biogeochemistry of the Academy of Sciences of the USSR], 1935, vol. 3, pp. 63–278. (In Russian).
 7. Bogoyavlenskiy A.N. Raspredelenie i migratsiya rastvorennoy kremnekisloty v okeanakh [Distribution and migration of dissolved silica in oceans]. In: *Geokhimiya kremnezema* [Geochemistry of silica]. N.M. Strakhov. (Ed.). Moscow: Nauka [Science], 1966, pp. 11–36. (In Russian).
 8. Syrett P.J. Nitrogen metabolism. In: *Physiological bases of phytoplankton ecology. Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1981, vol. 210, pp. 182–210.
 9. Beasley V.R., Cook W.O., Dahlem A.M., Hooser S.B., Lovell R.A., Valentine W.M. Algae intoxication in livestock and waterfowl. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 1989, vol. 5, pp. 345–361.
 10. Stel'makh L.V., Senicheva M.I., Babich I.I. Ekologo-fiziologicheskie osnovy "tsveteniya" vody, vyzyvaemogo *Emiliania huxleyi* v Sevastopol'skoy bukhte [Ecological and physiological bases of *Emiliania huxleyi* "bloom" in Sevastopol Bay]. *Ekologiya morya* [Ecology of the Sea], 2009, issue 77, pp. 28–32. (In Russian).
 11. Sapozhnikov V.V. Novye predstavleniya o gidrokhimicheskoy strukture Chernogo morya [New understanding of the geochemical structure of the Black Sea]. In: *Izmenchivost' ekosistemy Chernogo morya: estestvennye i antropogennye faktory* [Variability of the Black Sea ecosystem: natural and anthropogenic factors]. Moscow: Nauka [Science], 1991, pp. 34–46. (In Russian).
 12. Vinogradov V.E., Sapozhnikov V.V., Shushkina E.A. Ekosistemy Chernogo morya [The Black Sea ecosystem]. Moscow: Nauka [Science], 1992, 112 p. (In Russian).
 13. Dobrovol'skiy A.D., Zalogin B.S. Morya SSSR [Seas of the USSR]. Moscow: Lomonosov Moscow State University Publ., 1982, 192 p. (In Russian).
 14. Morozova-Vodyanitskaya N.V. Sutochnye izmeneniya chislennosti i biomassy fitoplanktona v Chernom more [Daily changes in phytoplankton abundance and biomass in the Black Sea]. *Trudy Sevastopol'skoy biologicheskoy stantsii AN SSSR* [Proceedings of the Sevastopol Biological Station of the Academy of Sciences of the USSR], 1954, vol. 8, part 1, pp. 40–97. (In Russian).
 15. Bronfman A.M., Volovik S.P., Kozlitina S.V., Kuchay L.A., Popov I.V. Statisticheskaya struktura okeanologicheskikh i biologicheskikh parametrov ekosistemy Azovskogo morya [Statistical structure of the oceanological and biological parameters of the Azov Sea ecosystem]. Rostov-on-Don: RSU Publ., 1979, 160 p. (In Russian).
 16. Krivenko O.V., Parkhomenko A.V. Voskhodyashchiy i regeneratsionnyy potoki neorganicheskikh soedineniy azota i fosfora v glubokovodnoy oblasti Chernogo morya [Upward and regeneration fluxes of inorganic nitrogen

- and phosphorus in the deep-water areas of the Black Sea]. *Zhurnal obshchey biologii* [Journal of General Biology], 2014, vol. 75, no. 5, pp. 394–408. (In Russian).
17. Kuz'menko M.I. Miksotrofizm sinezelenykh vodorosley i ego ekologicheskoe znachenie [Mixotrophy of blue-green algae and its ecological importance]. Kiev: Naukova dumka [Scientific Thought], 1981, 212 p. (In Russian).
 18. Skopintsev B.A. Formirovanie sovremennogo khimicheskogo sostava Chernogo morya [Formation of the present chemical structure of the Black Sea]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 1975, 336 p. (In Russian).
 19. Kumantsov M.I., Sapozhnikov V.V. Izmeneniya ekosistemy Chernogo morya i perspektivy dal'neyshikh issledovaniy [Changes of the Black Sea ecosystem and prospects of future research]. In: *Sovremennye problemy ekologii Azovo-Chernomorskogo regiona : materialy VI Mezhdunarodnoy konferentsii (Kerch', 6 oktyabrya 2010 g.)* [Current problems of the Azov-Black Sea Region ecology. Proceedings of the 6th International Conference (Kerch, 6 October, 2010)]. Kerch: YugNIRO Publ., 2010, pp. 3–5. (In Russian).
 20. Borovskaya R.V., Lomakin P.D., Panov B.N., Spiridonova E.O. Struktura i mezhgodovaya izmenchivost' kharakteristik pribrezhnogo chernomorskogo apvellina na osnove dannykh sputnikovogo monitoringa [Structure and inter-annual variability of characteristics of the Black Sea coastal upwelling, based on the satellite data]. *Issledovaniya zemli iz kosmosa* [Studies of Earth from Space], 2008, no. 2, pp. 23–36. (In Russian).
- Поступила 09.02.2019
- Принята к печати 14.03.2019