

УДК 579:582.26/.27:639.4(262.5)

**МИКРОВОДОРОСЛИ ЭПИЗООНА  
КУЛЬТИВИРУЕМОГО МОЛЛЮСКА *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* LAM. 1819,  
ФИТОПЛАНКТОН И ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
АКВАТОРИИ МИДИЙНО-УСТРИЧНОЙ ФЕРМЫ  
(СЕВАСТОПОЛЬ, ЧЁРНОЕ МОРЕ)**

© 2017 г. **Л. И. Рябушко**, д-р биол. наук, вед. н. с., **Н. В. Поспелова**, канд. биол. наук, ст. н. с.,  
**Д. С. Балычева**, канд. биол. наук, н. с., **Н. П. Ковригина**, канд. геогр. наук, ст. н. с.,  
**О. А. Трощенко**, канд. геогр. наук, ст. н. с., **С. В. Капранов**, м. н. с.

Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия  
E-mail: [larisa.ryabushko@yandex.ru](mailto:larisa.ryabushko@yandex.ru)

Поступила в редакцию 10.07.2017 г. Принята к публикации 18.12.2017 г.

В местах культивирования моллюсков накапливается большая биомасса органических веществ и метаболитов, поэтому биомониторинг микроводорослей (далее — МВ) как показателей качества среды в районе марихозяйств является актуальной задачей. Образцы мидий, собранные с коллекторов мидийно-устричной фермы на глубине 6 м в период с февраля 2015 г. по март 2016 г., использовали для изучения МВ, входящих в состав эпизоона моллюсков. Одновременно отбирали пробы воды на горизонтах 0 и 6 м для определения структурных показателей фитопланктона и гидрохимических параметров среды. В воде устанавливали содержание растворённого кислорода, биохимическое потребление кислорода на пятые сутки (БПК<sub>5</sub>), перманганатную окисляемость в щелочной среде, концентрацию кремния, неорганических и органических форм азота и фосфора согласно общепринятым методам. В эпизооне раковин мидии обнаружено 108 видов и внутривидовых таксонов МВ из 4 отделов: Цуанопрокариота — 3 вида, Dinophyta и Haptophyta — по 6, Bacillariophyta — 93. Максимальные значения обилия видов (26) и численности МВ эпизоона отмечены в феврале ( $74,78 \cdot 10^3$  кл.·см<sup>-2</sup>,  $t = 9,7$  °C) и апреле 2015 г. ( $62,0 \cdot 10^3$  кл.·см<sup>-2</sup>,  $t = 10,3$  °C), а также в январе 2016 г. ( $65,1 \cdot 10^3$  кл.·см<sup>-2</sup>,  $t = 9,5$  °C), биомассы — в августе ( $0,272$  мг·см<sup>-2</sup>,  $t = 25,5$  °C). Основной вклад в общую численность МВ вносили диатомовые водоросли *Tabularia fasciculata* (C. Agardh) D. M. Williams & Round 1986 и *Navicula ramosissima* (C. Agardh) Cleve 1895, а в биомассу — цианобактерии. В фитопланктоне на горизонтах 0 и 6 м обнаружено 135 видов и внутривидовых таксонов МВ, относящихся к 8 отделам водорослей: Цуанопрокариота — 2, Bacillariophyta — 47, Dinophyta — 57, Haptophyta — 17, Chlorophyta — 5, Euglenophyta — 2, Cryptophyta — 3 и Chrysophyta — 2. Наибольшее обилие видов диатомовых представлено родом *Chaetoceros* (18). По численности и биомассе преобладали динофлагелляты *Prorocentrum micans* Ehrenb. 1833 и гаптофитовая *Emiliania huxleyi* (Lohmann) W. W. Nau & H. P. Mohler 1967. Максимальная численность ( $3700 \cdot 10^6$  кл.·м<sup>-3</sup>) и биомасса ( $7560$  мг·м<sup>-3</sup>) фитопланктона отмечены весной и осенью. Всего в фитопланктоне и эпизооне раковин мидии обнаружено 213 таксонов МВ, из них 30 являются общими. Обнаружено 26 потенциально токсичных видов и 24 вида-биоиндикатора, из них 16 являются бетамезопробионтами — индикаторами умеренного загрязнения вод. Термохалинные характеристики вод в районе марихозяйств не выходят за пределы многолетних наблюдений. На всех горизонтах содержание кислорода находится на уровне 93–125 % насыщения. Окисляемость воды по рыбохозяйственным нормативам не превышает предельно допустимые концентрации. Биогенные вещества имеют высокий уровень концентрации с широким диапазоном колебаний, что свидетельствует об антропогенном воздействии на акваторию. По соотношению концентраций минеральных форм азота к фосфору и кремния к фосфору отмечено лимитирование развития сообщества МВ азотом и кремнием с июля по декабрь. Выявлены сильные корреляционные

связи между численностью МВ эпизоона мидии и температурой воды, между численностью МВ эпизоона мидии и содержанием растворённого кислорода, а также между биомассой и неорганическим фосфором, средние — с минеральным фосфором и органическим азотом. Для фитопланктона установлены средние корреляционные связи между численностью и гидролого-гидрохимическими показателями: в поверхностном слое воды — с нитратами, в придонном — с температурой, кислородом и органическим азотом. Биомасса фитопланктона имеет среднюю корреляционную связь с концентрацией кремния в воде. Гидролого-гидрохимическая структура морских вод оказывает влияние на видовой состав и количественные характеристики МВ планктона и бентоса, особенно в местах культивирования моллюсков.

**Ключевые слова:** фитопланктон, микроводоросли эпизоона, гидрохимические характеристики, мидийно-устричная ферма, Чёрное море

Прибрежные акватории Чёрного моря — полигоны для создания ферм по воспроизводству пищевых продуктов для людей, в т. ч. по выращиванию средиземноморской мидии *Mytilus galloprovincialis*, имеющей изысканный вкус и пользующейся большой популярностью в кулинарии. Комплексное изучение этого объекта является особенно перспективно для крымского побережья моря [2, 6, 17]. Для этого региона достаточно полно описаны биология и экология мидии, видовой состав фитопланктона, входящего в спектр питания мидии, а также гидролого-гидрохимические характеристики обитания моллюсков как в природной среде, так и в условиях культивирования. Однако при мониторинге состояния марихозяйств необходимо учитывать взаимодействие объекта культивирования со всеми живыми компонентами, участвующими в этом процессе. Впервые комплексное изучение диатомовых водорослей эпизоона культивируемой мидии *M. galloprovincialis*, фитопланктона и гидролого-гидрохимических показателей воды выполнено в Казачьей бухте Чёрного моря в 1995–1996 гг. [13, 14, 16]. Установлено, что поверхность мидии и конструкции для её выращивания довольно интенсивно обрастают донными диатомовыми водорослями. В ряде работ указано, что моллюски выедают диатомеи и снижают их численность и биомассу, тем самым изменяя видовое разнообразие сообществ микроводорослей (далее — МВ) [9, 13, 14, 19, 20]. В Чёрном море встречаются потенциально токсичные виды микроводорослей, и их яды могут быть опасными для человека, использующего в пищу моллюсков [12, 13]. Некоторые из них найдены в пищеварительном тракте, фекалиях и псевдофекалиях мидии из марихозяйства близ Карантинной бухты, в частности динофитовые водоросли рода *Prorocentrum* Ehrenb. 1834, которые обнаруживают в пищевых комках мидии чаще, чем в составе фитопланктона и эпизоона моллюска [9]. Микроводоросли планктона и бентоса не только являются кормовой базой для обитателей моря, но и служат биоиндикаторами сапробности водоёмов [1, 5], однако их характеристики довольно редко используют для оценки качества среды морских акваторий [13–16].

Цель настоящей работы — изучить сезонную изменчивость видового состава и количественных показателей микроводорослей фитопланктона и эпизоона раковин мидии *Mytilus galloprovincialis* при одновременном исследовании термохалинных и гидрохимических характеристик в районе фермы по культивированию двустворчатых моллюсков в прибрежной зоне Чёрного моря близ г. Севастополя.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Ферма находится в акватории крымского побережья Чёрного моря, прилегающей к лабораторному корпусу ИМБИ РАН между южным молотом Севастопольской бухты и западной границей гидрологического памятника природы «Прибрежный аквальный комплекс у Херсонеса Таврического» (44°61'83.46"N, 33°50'33.80"E). Пробы в районе фермы и контрольной станции, расположенной в 0,1 мили на северо-запад от марихозяйства, отбирали ежемесячно с февраля 2015 г. по март 2016 г. [9, 14]. Мидии разного возраста по 6 экз. собирали с коллекторов с глубины 6 м, а воду для изучения фитопланктона и для гидролого-гидрохимических анализов — с горизонтов 0 и 6 м.

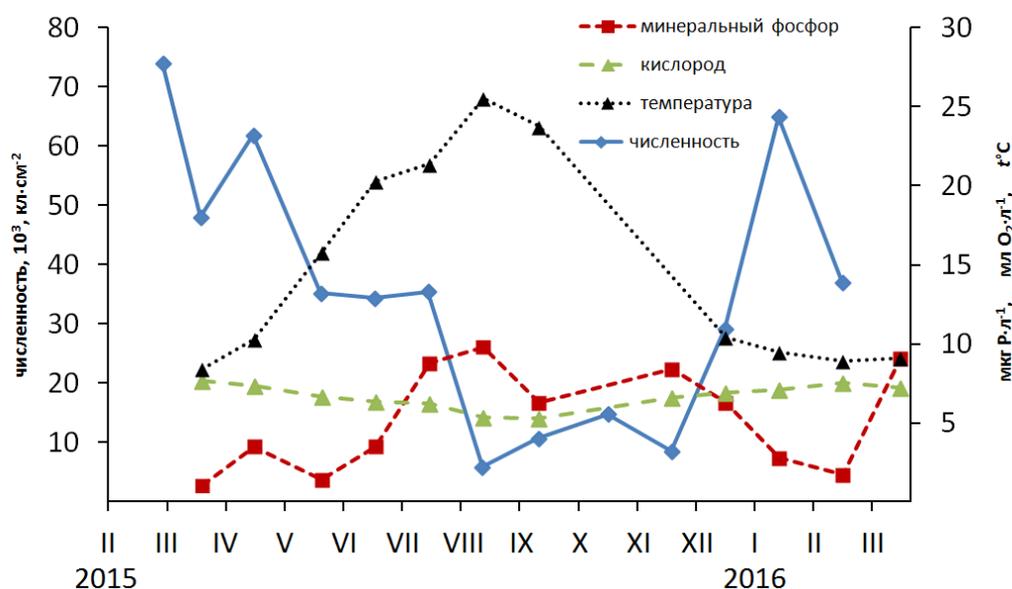
С каждого экземпляра раковин мидии производили соскобы и смывы обрастания фильтрованной морской водой. Полученную суспензию изучали под световым микроскопом Axioskop 40 C. Zeiss при увеличениях 10×20, 10×40 и 10×100. Количественный учёт клеток микроводорослей выполняли в ка-

мере Горяева объёмом  $0,9 \text{ мм}^3$  в трёх повторностях. Расчёт численности, биомассы и обилия видов проводили по методике [13]. Всего обработано 78 проб. Для изучения видового разнообразия и численности фитопланктона пробы воды объёмом 1,5 л сгущали до 25–50 мл методом обратной фильтрации через ядерные мембраны ( $D_{\text{пор}} = 1 \text{ мкм}$ ). Обработку проб фитопланктона проводили методом прямого счёта МВ в живой и сгущённой капле ( $V = 0,01 \text{ мл}$ ) и в камере ( $V = 1 \text{ мл}$ ) в трёх повторностях с использованием светового микроскопа Jenaval C. Zeiss при увеличении  $10 \times 25$ . Расчёты численности и биомассы МВ выполнены с помощью компьютерной программы «Планктон» [4]. Всего обработана 31 проба фитопланктона.

В пробах воды определяли содержание растворённого кислорода, биохимическое потребление кислорода на пятые сутки (БПК<sub>5</sub>), перманганатную окисляемость в щелочной среде, концентрацию кремния, неорганических и органических форм азота и фосфора согласно общепринятым методам [7]. Всего собрано 78 проб и выполнено 676 гидрохимических анализов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Микроводоросли эпизоона мидии.** Всего на раковинах мидии обнаружено 108 видов и внутривидовых таксонов МВ отделов: Cyanoprokaryota — 3 вида, Dinophyta и Haptophyta — по 6 видов, Bacillariophyta — 93. В течение годового цикла наибольший вклад (87–99 %) в суммарную численность сообщества МВ вносят диатомовые водоросли. В феврале — июне доминирует по численности прикреплённый колониальный вид-образователь диатомовой водоросли *T. fasciculata* (табл. 1). В это время значительный вклад по численности и биомассе вносят характерные для зимне-весеннего сезона колониальные виды диатомовых водорослей *Licmophora abbreviata* C. Agardh 1831, *L. flabellata* (Greville) C. Agardh 1831, *Navicula ramosissima* (C. Agardh) Cleve 1895 и *Pseudo-nitzschia calliantha* Lundholm, Moestrup & Hasle 2003, а также одиночноживущие *Cylindrotheca closterium* (Ehrenb.) Reimann et J. C. Lewin 1964 и *Halamphora coffeiformis* (C. Agardh) Levkov 2009. С мая по июль с повышением температуры воды в море показатели численности сообщества МВ имеют близкие низкие значения (рис. 1).



**Рис. 1.** Сезонная динамика численности диатомовых водорослей эпизоона мидии *Mytilus galloprovincialis*, температуры воды, концентраций кислорода и минерального фосфора

**Fig. 1.** Seasonal dynamics of diatom algae abundance (blue line) in the *Mytilus galloprovincialis* mussel epizoon, water temperature (black dotted line), concentration of oxygen (green dashed line) and mineral phosphorus (red dashed line)

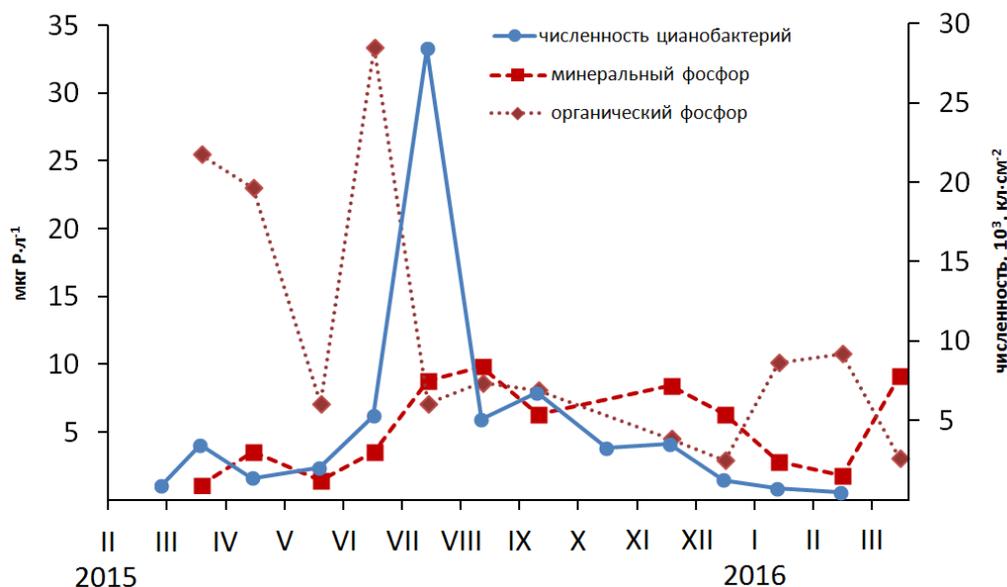
**Таблица 1.** Средние значения обилия видов (*s*), численности (*N*) и биомассы (*B*) микроводорослей эпизоона *Mytilus galloprovincialis***Table 1.** Average values of species richness (*s*), abundance (*N*) and biomass (*B*) of microalgae of *Mytilus galloprovincialis* epizoon

Дата	t, °C	Обилие видов ( <i>s</i> ), численность ( <i>N</i> ) и биомасса ( <i>B</i> )							
		Микроводоросли			Диатомовые водоросли				Цианобактерии
		<i>s</i>	$N_{\text{общ}} \cdot 10^3$ , кл.·см <sup>-2</sup>	$B_{\text{общ}}$ , мг·см <sup>-2</sup>	<i>N</i> , %	<i>B</i> , %	Виды-доминанты	$N \cdot 10^3$ , кл.·см <sup>-2</sup> доминанта	$N \cdot 10^3$ , экз.·см <sup>-2</sup>
2015 г.									
27.02	9,7	26	74,78	0,051	99	96	<i>Tabularia fasciculata</i>	12,9	0,90
19.03	8,4	11	48,53	0,025	99	77	- « -	36,1	3,46
15.04	10,3	14	61,97	0,033	99	62	- « -	29,6	1,35
20.05	15,8	16	35,63	0,008	99	84	- « -	18,3	2,02
17.06	19,2	15	34,72	0,031	99	57	- « -	13,8	5,27
15.07	21,4	19	36,85	0,062	96	21	<i>Cylindrotheca closterium</i>	11,2	28,42
12.08	25,5	6	6,15	0,272	94	0,3	<i>T. fasciculata</i>	3,1	5,04
10.09	23,7	14	11,88	0,021	89	27	<i>Navicula ramosissima</i>	2,1	6,73
16.10	19,3	9	16,88	0,003	87	44	<i>Nitzschia tenuirostris</i>	11,9	3,23
18.11	12,9	11	8,65	0,167	98	2	<i>N. ramosissima</i>	3,33	3,52
16.12	10,3	10	31,90	0,006	91	72	- « -	16,2	1,22
2016 г.									
13.01	9,5	17	65,10	0,048	99	34	- « -	15,9	0,68
15.02	8,9	18	38,02	0,017	97	75	- « -	8,2	0,43

Вклад диатомовых в общую биомассу сообщества МВ эпизоона мидии значительно различался по сезонам года (от 0,3 до 96,0 %). В марте количественные показатели диатомовых снижаются, а их вклад в общую биомассу сообщества ещё достаточно высок (77 %). Остальная часть биомассы — цианобактерии, которые в ноябре вместе с диатомовыми составляют второй пик биомассы сообщества МВ. Крупноклеточные колониальные виды диатомовых уступают по количеству мелкоклеточным одиночноживущим, поэтому их общая биомасса в мае является достаточно низкой. В последующие месяцы биомасса диатомовых снижается за счёт мелкоклеточных видов с минимумом в августе, а значения общей биомассы возрастают, т. к. увеличивается вклад в сообщество цианобактерии *Spirulina tenuissima* Kütz 1836. Последний вид встречается в эпизооне мидии круглогодично, но наибольший вклад в общую численность и биомассу вносит в летне-осенний период, что соответствует динамике содержания минерального фосфора (рис. 2). Пики численности цианобактерий и концентрации минерального фосфора в море совпадают в летний период, а минимумы отмечены зимой.

В октябре отмечен минимум биомассы при доминировании мелкоклеточного бентопланктонного вида диатомовой водоросли *Nitzschia tenuirostris* Mereshkovsky 1902 (табл. 1). С ноября 2015 по февраль 2016 г. при снижении температуры воды в море доминирует диатомея *N. ramosissima*. Динамика общей численности и биомассы МВ эпизоона мидии соответствует изменениям концентраций органических форм азота и фосфора (рис. 3).

**Фитопланктон.** Всего обнаружено 135 видов и внутривидовых таксонов водорослей, относящихся к 8 отделам: Cyanoprokaryota — 2, Bacillariophyta — 47, Dinophyta — 57, Haptophyta — 17, Chlorophyta — 5, Euglenophyta — 2, Cryptophyta — 3 и Chrysophyta — 2. Наибольший вклад в общее количество видов вносят диатомовые и динофитовые водоросли (77 %). В зимне-весенний период преобладают диатомовые, а в летний и осенний — динофитовые. Максимальное видовое разнообразие отмечено с мая по июнь (76–94 вида), минимальное — в августе (34). Наиболее многочисленными являются



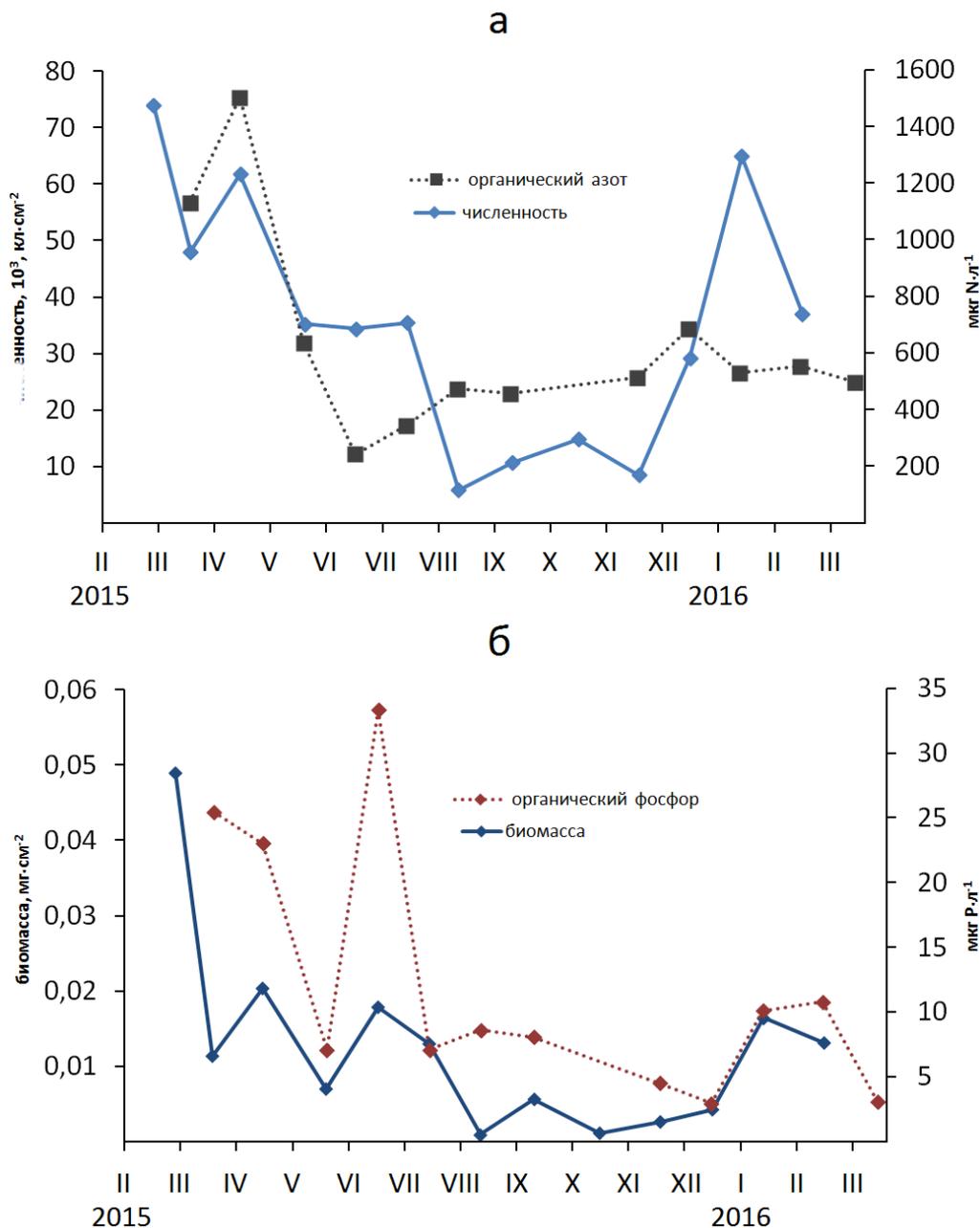
**Рис. 2.** Сезонная динамика численности цианобактерий эпизоона мидии *Mytilus galloprovincialis*, показателей концентраций минерального и органического фосфора в воде

**Fig. 2.** Seasonal dynamics of cyanobacteria abundance (blue line) in the *Mytilus galloprovincialis* shell epizoon, concentration of mineral (red dashed line) and organic phosphorus (red dotted line) in water

водоросли родов *Chaetoceros* Ehrenb. 1844 (18), *Protoperidinium* Berg 1881 (11) и *Prorocentrum* (8). Наибольшая частота встречаемости отмечена для диатомовых *Pseudo-nitzschia seriata* (Cleve) H. Peragallo 1899 (87 %), *Cyclotella choctawhatcheeana* Prasad 1990 (67 %), *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve 1873 (71 %), *Pseudosolenia calcar-avis* (Schultze) Sundström 1986 (62 %), *Chaetoceros compressus* Lauder 1864 (72 %), *Ch. wighamii* Brightwell 1856 (52 %), *Ch. socialis* Lauder 1864 (52 %), *Nitzschia tenuirostris* (81 %), динофитовых *Prorocentrum micans* Ehrenb. 1833 (100 %), *Pr. compressum* (Bail.) Abe ex Dodge 1975 (57 %), *Pr. cordatum* (Ostenf.) Dodge 1975 (72 %), *Gymnodinium wulfii* Schiller 1933 (76 %), *Heterocapsa triquetra* (Ehrenb.) Stein 1883 (81 %), а также гаптофитовой *Emiliania huxleyi* (Lohmann) W. W. Hay & H. P. Mohler 1967 (100 %). Численность фитопланктона в акватории марихозия варьировала от  $13 \cdot 10^6$  до  $3700 \cdot 10^6$  кл·м<sup>-3</sup>, биомасса — от 30 до 7560 мг·м<sup>-3</sup> (табл. 2, рис. 4). Почти круглый год диатомовые и гаптофитовые водоросли доминируют, составляя 30–96 % численности и биомассы.

В феврале — марте 2015 г. в фитопланктоне поверхностных вод отмечено «цветение» воды, вызванное диатомовыми водорослями рода *Pseudo-nitzschia* H. Peragallo 1900, численность которых достигала  $2030 \cdot 10^6$  кл·м<sup>-3</sup> (91 %). На горизонте 6 м при увеличении численности фитопланктона до  $3700 \cdot 10^6$  кл·м<sup>-3</sup> доминировал вид *Sk. costatum* ( $1900 \cdot 10^6$  кл·м<sup>-3</sup>). В марте — апреле 2015 г. и январе — феврале 2016 г. развивались мелкоклочные виды *Chaetoceros compressus* и *Ch. curvisetus* (до 75 и 77 % суммарной численности и биомассы соответственно). В мае с прогревом поверхностного слоя воды до 17 °С при формировании сезонного термоклина виды рода *Chaetoceros* Ehrenb. 1844 вызывали «цветение» воды. В слое 6 м ( $t_{\text{воды}} = 15,8$  °С) отмечено резкое снижение всех количественных показателей фитопланктона.

Весной основу численности и биомассы фитопланктона составляют мелкоклочные динофитовые *Gymnodinium wulfii* и *G. kowalevskii* Pitzik 1967 и крупноклочные виды рода *Ceratium* F. Schrank 1793, доминируют также виды рода *Prorocentrum* (*P. compressum*, *P. cordatum*, *P. micans*) и *Scrippsiella trochoidea* (Stein) Loeblich III 1976, отмеченные в пищевом спектре культивируемой мидии [9], которые могут продуцировать фитотоксины. Для марта 2016 г. характерно снижение всех количественных показателей до минимальных значений. С апреля по июль и в ноябре значительный вклад в суммарную биомассу фитопланктона вносят динофитовые водоросли (30–68 %).



**Рис. 3.** Сезонная динамика численности и биомассы микроводорослей эпизоона мидии *Mytilus galloprovincialis*, показателей концентраций органического азота (а) и фосфора (б) в воде

**Fig. 3.** Seasonal dynamics of microalgae abundance (а, upper panel, blue solid line) and biomass (б, lower panel, blue solid line) of the *Mytilus galloprovincialis* shell epizoon, concentration of organic nitrogen (а, black dotted line) and organic phosphorus (б, red dotted line) in water

Летний фитопланктон представлен диатомовыми (крупноклеточным видом *P. calcar-avis*, составлявшим 97 % суммарной биомассы, и видами рода *Chaetoceros*). В июле отмечены *Leptocylinndrus danicus* Cleve 1889 и *S. choctawhatcheeana*. Особое место в фитопланктоне моря летом занимает мелкоклеточная гаптофитовая водоросль *E. huxleyi*, достигающая в июне максимальных значений (85 % суммарной численности). Этот вид доминировал в мае — июле 2015 г. и октябре — феврале 2016 г.

На горизонте 0 м по численности доминируют мелкие жгутиковые и зелёные водоросли рода *Platymonas* G.S. West 1916 — обитатели вод, загрязнённых растворённым органическим веществом. В сентябре на всех глубинах отмечено «цветение» воды, вызванное крупноклеточной диатомовой во-

**Таблица 2.** Численность ( $N$ ) и биомасса ( $B$ ) фитопланктона при различных соотношениях концентраций неорганических форм азота, фосфора и кремния в воде на глубине 0 и 6 м**Table 2.** The abundance ( $N$ ) and biomass ( $B$ ) of phytoplankton and the ratio of inorganic nitrogen concentrations, phosphorus and silicon in water at depths of 0 and 6 m

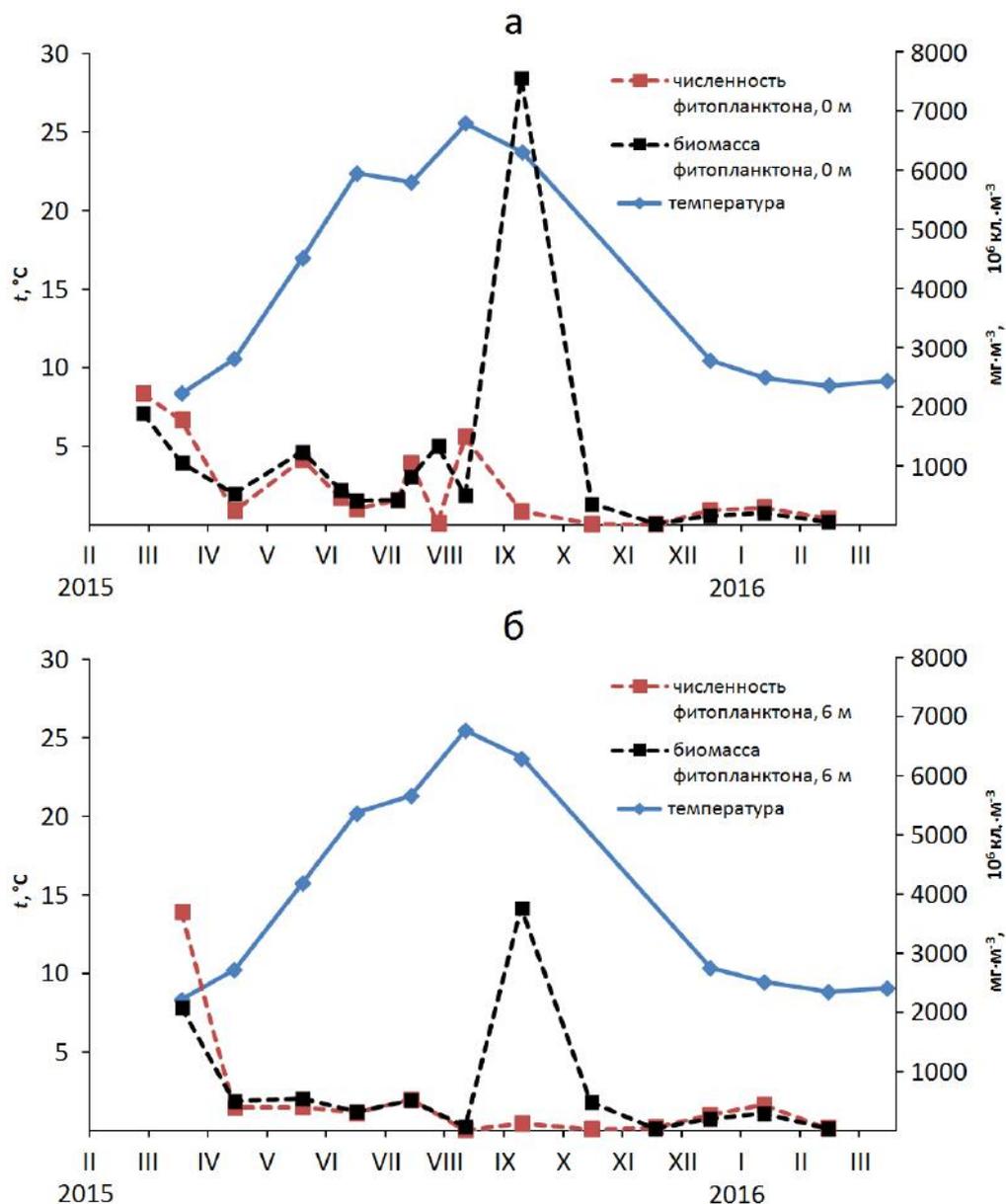
Дата	Фитопланктон				$N/P$		$Si/P$		$Si/N$	
	$N_{\text{сум}} \cdot 10^6$ , кл.·м <sup>-3</sup>		$B_{\text{сум}}$ , мг·м <sup>-3</sup>		Норма = 16		Норма = 23		Норма = 1,4	
	0 м	6 м	0 м	6 м	0 м	6 м	0 м	6 м	0 м	6 м
27.02.2015	2223,87	–	1889,75	–						
19.03.2015	1779,93	3703,86	1056,16	2083,42	10,1	51,7	7,7	48,1	0,76	0,93
15.04.2015	240,77	396,28	528,64	495,17	39,0	22,2	18,9	11,8	0,48	0,53
20.05.2015	1110,47	404,19	1243,05	543,90	9,6	32,7	18,6	28,9	1,95	1,20
17.06.2015	279,25	304,37	419,70	317,98	18,8	7,09	40,0	34,8	2,12	0,54
15.07.2015	1050,83	527,31	817,95	523,25	7,2	3,68	9,6	8,2	1,33	2,24
12.08.2015	1494,67	14,17	507,28	63,13	1,5	2,47	4,4	6,6	3,02	2,65
10.09.2015	231,71	130,45	7566,52	3767,72	3,2	6,05	2,0	4,7	0,63	1,00
16.10.2015	24,73	29,04	362,15	487,00	3,4	–	5,9	–	1,18	–
18.11.2015	16,12	60,54	30,54	44,00	10,9	13,3	9,6	13,1	0,88	0,98
16.12.2015	245,61	264,60	154,99	197,36	9,3	15,5	14,8	14,2	1,59	0,91
13.01.2016	299,48	435,40	209,78	287,34	22,1	25,3	23,6	43,8	1,06	1,72
15.02.2016	108,27	44,42	58,23	32,57	347,0	37,0	598,0	103,0	1,72	2,78
16.03.2016	561,80	230,77	1367,35	227,11	14,5	12,8	3,53	4,72	0,24	0,37

дорослю *Proboscia alata* (Brightwell) Sundström 1986. В октябре — ноябре суммарные значения численности и биомассы микроводорослей снижались, при этом в октябре снова доминировал *P. alata* (77–95 численности и 91–96 % биомассы), а с ноября 2015 г. до февраля 2016 г. — *E. huxleyi*. В фитопланктоне отмечено 27 видов гаптофитовых и диатомовых водорослей, в т. ч. 18 видов рода *Chaetoceros*, вызывающих «цветение» воды в море.

В эпизооне мидии и фитопланктоне обнаружено 22 вида динофитовых и 4 вида диатомовых водорослей, которые относятся к потенциально токсичным МВ. Для фитопланктона и микроводорослей эпизоона выявлено 30 общих видов и отмечена тенденция увеличения численности диатомовых водорослей в зимне-весенний период. К индикаторам органического загрязнения вод относятся 24 вида МВ, из них 16 видов являются бетамезосапробионтами (индикаторами умеренного загрязнения), 4 — альфамезосапробионтами (индикаторами значительного загрязнения) и 4 — олигосапробионтами (индикаторами чистых вод). Бетамезосапробионт *T. fasciculata* встречается в эпизооне мидии круглогодично и доминирует в течение 6 мес. К альфамезосапробионтам относятся *Melosira moniliformis* (O. F. Müller) C. Agardh 1824 и *Sk. costatum*, которые встречаются в фитопланктоне и эпизооне.

Для установления экологических факторов, влияющих на структуру сообществ МВ, проведён анализ содержания биогенных элементов в воде, а также солёности и температуры воды в море (рис. 5). В марте отмечена гомотермия вод (8,4 °С) на всех горизонтах (рис. 5а). В апреле происходит слабый прогрев воды и формируется сезонный термоклин, занимающий всю толщу вод со средним вертикальным градиентом температуры 0,4 °С·м<sup>-1</sup>. В мае начинается самый интенсивный прогрев поверхностного слоя воды — от 10,6 до 17,0 °С. В это время формируется верхний квазиоднородный слой толщиной в 5 м и отмечается вертикальное термическое расслоение воды. Средняя солёность в районе исследования достигала 17,9 ‰, а её ежемесячные колебания на двух горизонтах имели близкие значения и не превышали 0,4 ‰ (рис. 5б).

В июне при температуре 22,4 °С летний пик численности фитопланктона совпал с максимумом концентрации органического фосфора, что обусловлено, по-видимому, накоплением биомассы и продуктов разложения гидробионтов. В июле отмечен «скрытый» прибрежный апвеллинг, когда темпе-



**Рис. 4.** Сезонная динамика численности и биомассы фитопланктона и температуры воды на 0 м (а), 6 м (б)

**Fig. 4.** Seasonal dynamics of phytoplankton abundance (red dashed line), biomass (black dashed line) and water temperature (blue solid line) at (a) 0 m and (b) 6 m

ратура в придонном слое снижалась на  $8^\circ\text{C}$ , а в поверхностном — на  $2^\circ\text{C}$ . В августе температура воды во всей толще составляла  $26^\circ\text{C}$  и вертикальное термическое расслоение прекращалось. В сентябре поверхность воды охлаждалась до  $23,8^\circ\text{C}$ , и с октября до декабря темпы снижения температуры были аналогичны скорости её повышения в мае — июне ( $4\text{--}5^\circ\text{C}$  в месяц). В это время наблюдается осенне-зимнее конвективное перемешивание вод с однородной температурой от поверхности до дна.

Концентрация кислорода в воде в течение годового цикла находилась на достаточно высоком уровне, а диапазон колебаний составлял 93–125 % насыщения (рис. 5в). В среднем содержание кислорода на поверхности воды составляло 106 % насыщения, по сравнению с контрольной станцией было выше на 1 % и с 2000–2001 гг. — на 5 % [3]. Концентрации кислорода на горизонтах 0 и 6 м практически совпадали (кроме июля в сторону повышения на поверхности воды и марта с максимумом после вспышки численности МВ). На контрольной станции в это время отмечено равномерное снижение концентрации кислорода от поверхности к нижнему горизонту. В летние месяцы содержание кислорода

в воде выше нормального: на поверхности максимум составлял 125 %, в придонном слое — 112 % насыщения.

Впервые определено БПК<sub>5</sub> для всех горизонтов (интервал варьирования от 0,11 до 2,10 мг О<sub>2</sub>·л<sup>-1</sup>), в то время как раньше этот параметр определяли только в поверхностном слое воды. С июня по сентябрь отмечено повышение БПК<sub>5</sub>, а с октября по март — понижение. Средние значения БПК<sub>5</sub> снижались с глубиной (от 1,27 на поверхности до 0,62 мг О<sub>2</sub>·л<sup>-1</sup> в придонном слое воды). Максимальная величина БПК<sub>5</sub>, превышающая предельно допустимую концентрацию (ПДК) по рыбохозяйственным нормативам (2,0 мг О<sub>2</sub>·л<sup>-1</sup>), отмечена в поверхностных водах в сентябре (2,10 мг О<sub>2</sub>·л<sup>-1</sup>). За весь период исследования это был единственный случай незначительного превышения ПДК.

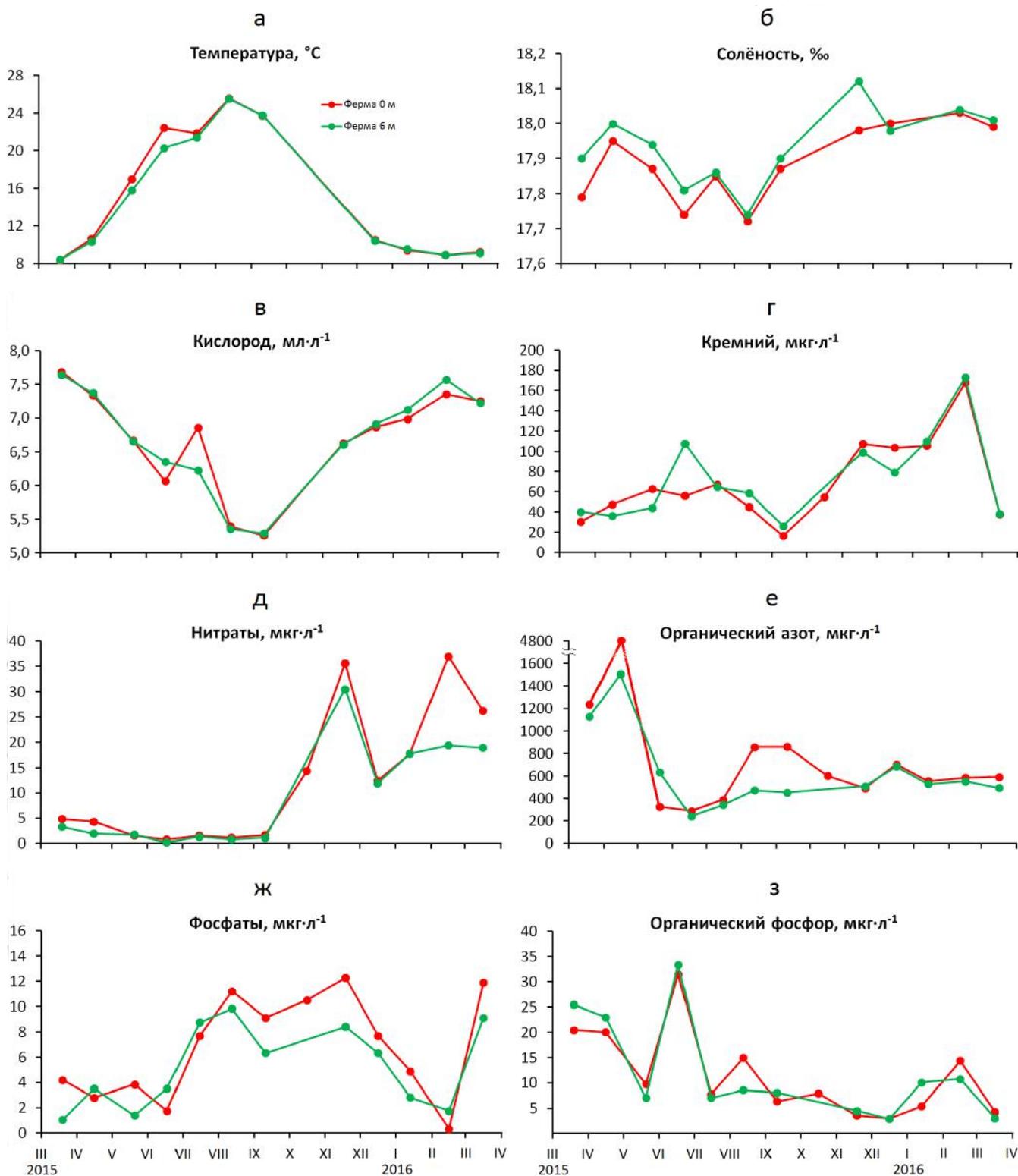
Диапазон изменчивости окисляемости воды составил от 2,17 до 3,11 мг О<sub>2</sub>·л<sup>-1</sup>, и эти параметры повышались в весенне-летний период и снижались в осенне-зимний. Окисляемость поверхностных и придонных вод практически совпадала (2,73–2,76 мг О<sub>2</sub>·л<sup>-1</sup>). Значения окисляемости, превышающие ПДК по рыбохозяйственным нормативам (4,0 мг О<sub>2</sub>·л<sup>-1</sup>), в районе марихозяйства не отмечены.

Годовой диапазон концентраций кремния в воде акватории фермы варьировал от 16,5 до 167,6 мкг·л<sup>-1</sup> на поверхности воды и от 26,4 до 172,9 мкг·л<sup>-1</sup> на 6 м при средних значениях 70 и 79 мкг·л<sup>-1</sup> соответственно (рис. 5г). Сезонная изменчивость содержания кремния на всех горизонтах отличалась синхронностью. Минимальные концентрации кремния отмечены в марте и сентябре после периода увеличения численности диатомовых водорослей планктона и микрофитобентоса [13].

Показатели концентраций аммонийного (от 4,7 до 50,2 мкг·л<sup>-1</sup>) и нитратного (от 0,2 до 37 мкг·л<sup>-1</sup>) азота (рис. 5д) в воде колебались наиболее сильно. В меньшей степени отмечены вариации содержания минерального фосфора (0,4–14 мкг·л<sup>-1</sup>) (рис. 5ж) и нитритного азота (0,1–4,7 мкг·л<sup>-1</sup>). Максимальные значения концентраций нитритного азота не превышали ПДК (20 мкг·л<sup>-1</sup>). В целом содержание биогенных веществ в воде в районе марихозяйства увеличивалось с марта по июнь и снижалось с августа по октябрь, что соответствует изменениям количественных характеристик МВ (рис. 1, рис. 4). Изменение концентрации биогенных веществ на двух горизонтах происходило синхронно, а размах варьирования уменьшался от поверхности ко дну. Увеличение этих показателей на поверхности обусловлено, вероятно, влиянием на акваторию муниципальных сточных вод г. Севастополя.

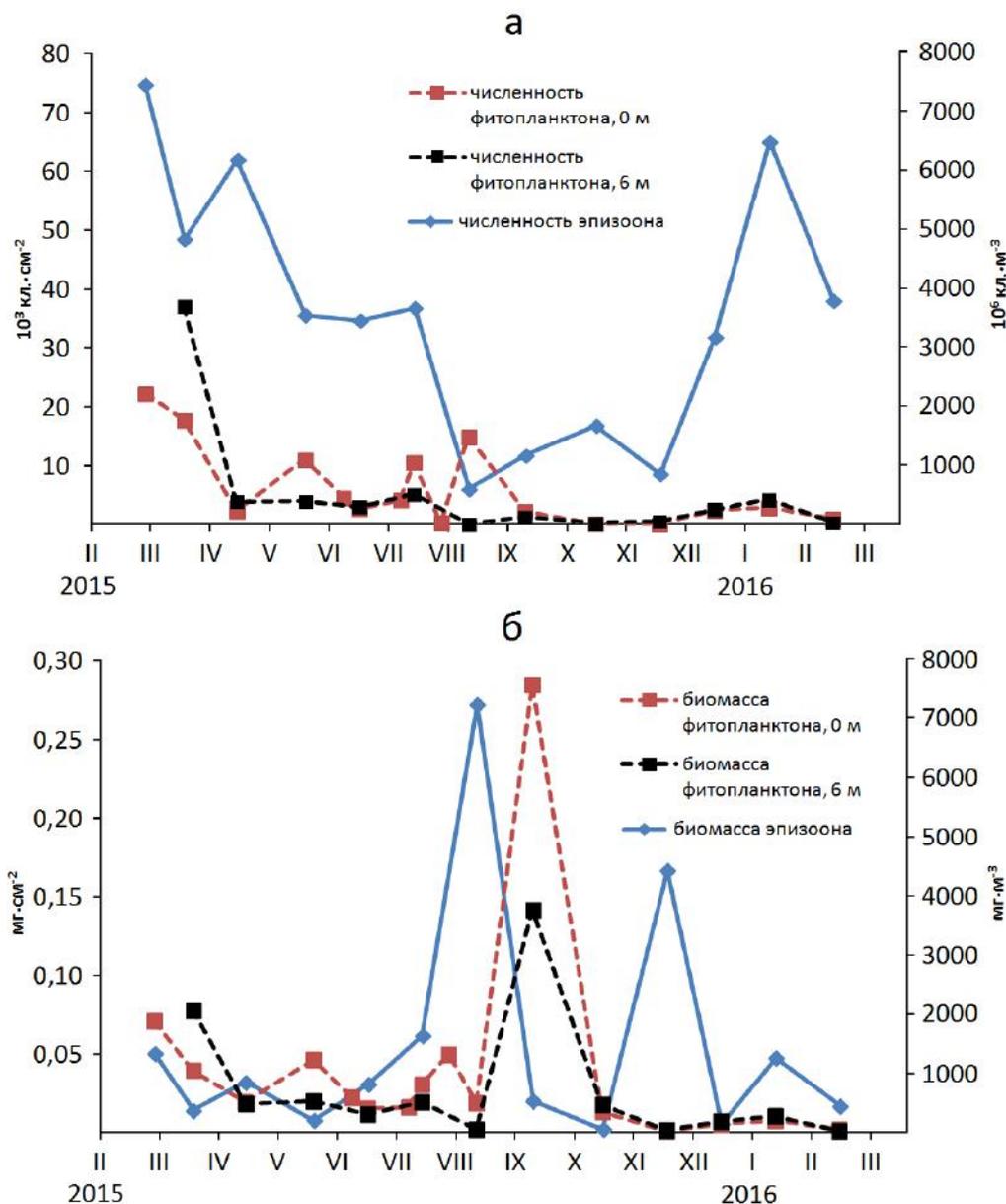
Не менее важными элементами для МВ являются органические формы азота и фосфора. В поверхностном слое воды концентрации органического азота варьировали от 290 до 4800 мкг·л<sup>-1</sup>, в придонном слое — от 206 до 1135 мкг·л<sup>-1</sup> (рис. 5е, рис. 5з). Диапазон изменений концентрации органического фосфора на глубине 0 м составлял от 3 до 31 мкг·л<sup>-1</sup>, а в придонном слое не отличался от поверхностного (2,2–29,1 мкг·л<sup>-1</sup>). При высокой температуре воды органический фосфор быстро переходит в минеральный и потребляется МВ. В целом четкой сезонной изменчивости концентраций органических форм азота и фосфора не наблюдали. Существенное влияние на гидрохимический режим акватории оказывает антропогенный фактор. Так, максимальные значения концентраций органического, аммонийного и нитритного азота, а также высокая величина БПК<sub>5</sub>, отмеченные 15 апреля 2015 г., объясняются, вероятно, влиянием загрязнённых вод Севастопольской бухты. Наибольшая величина концентрации органического фосфора на поверхности воды, полученная 17 июня 2015 г., обусловлена влиянием аварийного выпуска хозяйственно-бытовых сточных вод.

Сравнительный анализ сезонной динамики количественных характеристик фитопланктона и МВ эпизоона раковин мидии показал, что численность МВ выше в зимне-весенний сезон, а биомасса — в летне-осенний (рис. 6). При этом сопряжённость между общей численностью и биомассой МВ двух биотопов слабая (для эпизоона) или практически отсутствует (для фитопланктона). Это объясняется, прежде всего, разнородностью видового состава МВ, особенно фитопланктона, и сезонностью развития мелко- и крупноклеточных видов диатомовых и цианобактерий эпизоона мидии.



**Рис. 5.** Сезонная динамика основных гидрохимических характеристик воды: температура воды (а), солёность (б), значения концентраций кислорода (в), кремния (г), нитратов (д), органического азота (е), фосфатов (ж) и органического фосфора (з)

**Fig. 5.** Seasonal dynamics of the main hydrochemical characteristics of the water at 0 m (red line) and 6 m (green line): water temperature (a), salinity (б), concentration of dissolved oxygen (в), silicon (г), nitrates (д), organic nitrogen (е), inorganic phosphorus (ж), and organic phosphorus (з)



**Рис. 6.** Сезонная динамика численности (а) и биомассы (б) фитопланктона и микроводорослей эпизоона мидии в районе мидийно-устричной фермы

**Fig. 6.** Seasonal dynamics of (a) abundance (red dashed line: at the depth of 0 m; black dashed line: at the depth of 6 m) and (b) biomass (red dashed line: at the depth of 0 m; black dashed line: at the depth of 6 m) of phytoplankton and mussel epizoon microalgae (blue solid line) in the mussel-and-oyster farm area

В результате сопоставления динамики количественных характеристик МВ планктона и эпизоона мидии с гидролого-гидрохимическими показателями воды в районе марихозяйства установлены некоторые закономерности и корреляционные связи между биотой и параметрами среды их обитания. Следует отметить, что микроводоросли сами оказывают влияние на гидрохимическую структуру морских вод, обогащая их органическим веществом, особенно в местах культивирования моллюсков. От пространственно-временной изменчивости гидрологических параметров во многом зависит формирование гидрохимической структуры морской воды. Особую роль в этих процессах играет в первую очередь динамика температуры воды и биогенных элементов, которые оказывают существенное влияние на состав и изменения численности и биомассы альгофлоры. Установлено, что при достаточном количестве биогенных элементов донные МВ, относящиеся к видам-образателям, увеличивают свою численность и биомассу на поверхности гидробионтов и на конструкциях марихозяйств [13, 14].

Изучение механизмов потребления азота и фосфора разными видами МВ Чёрного моря может быть использовано для оценки влияния биогенных элементов на развитие фитопланктона в районе марихозяйства. Так, при исследовании влияния добавок фосфора и азота на культивируемую планктонную гаптофитовую водоросль *E. huxleyi* установлено, что при невысокой концентрации фосфора и низком отношении содержания азота к фосфору происходит доминирование этого вида в фитопланктоне моря [15]. При этом оптимальным для её роста является соотношение в среде азота и фосфора ниже соотношения Редфилда. Авторы полагают, что этот вид может расти при малых концентрациях азота, что связано с более низкой константой полунасыщения для поглощения азота. Именно в июне, при наибольших концентрациях фосфора в воде в районе марихозяйства, отмечена максимальная численность этой водоросли, что согласуется с данными, указанными для фитопланктона шельфа северо-восточной части моря [8, 15].

В холодное время года в период конвективного перемешивания вод обеднённые поверхностные слои опускаются ко дну, а обогащённые придонные воды поступают в толщу. В июне в районе фермы биогенные элементы сбалансированы между собой и не лимитируют рост МВ. С мая по июль, а также в январе — феврале соотношение между концентрациями кремния и азота является оптимальным. С июля по ноябрь происходит истощение эвфотического слоя кремнием. В другие месяцы МВ не испытывали недостатка в азотном и фосфорном питании. Содержание кремния сохранялось стабильным в течение года.

Следует подчеркнуть, что кремний — важнейший и необходимый жизненный микроэлемент для большинства организмов, включая человека. Он активно участвует в метаболизме и построении панциря у диатомовых водорослей, особенно донных видов. Поскольку диатомовые планктона и бентоса являются ведущей группой МВ в Чёрном море, целесообразно рассмотреть динамику содержания кремния в воде. В акватории марихозяйства при максимальном развитии диатомового комплекса концентрация растворённого кремния резко снижается до минимума (рис. 5г, рис. 6). Ранее подобное падение содержания кремния отмечено в зал. Восток Японского моря в марте 1980 г. при максимуме биомассы бентосных диатомовых водорослей [10, 13]. В б. Казачья Чёрного моря содержание кремния снижалось до аналитического нуля [13, 16]. Диатомовые способны извлекать кремний из воды и накапливать запасы кремнезёма в своих клетках, поэтому во время массового развития этих водорослей концентрация кремния в природных водах значительно снижается [22].

Анализ степени обеспеченности вод биогенными элементами, лимитирующими развитие МВ, основан на сопоставлении отношений их молярных концентраций в среде с классическим соотношением  $C : Si : N : P = 106 : 23 : 16 : 1$  [18, 21]. С июля по декабрь вода в акватории марихозяйства лимитирована минеральными формами азота. При норме соотношения азота к фосфору  $N : P = 16$  превалируют фосфаты (табл. 2), поступающие с бытовыми сточными водами от береговых источников загрязнения ( $N : P < 16$ ). В январе и феврале нитраты поступают в прибрежье в основном с речным стоком во время зимнего конвективного перемешивания вод ( $N : P > 16$ ).

Между элементами абиотических и биотических составляющих акватории морской фермы проведён корреляционный анализ (рассчитаны коэффициенты парной корреляции  $R$ ). Для анализа использовали только значения, входящие в 95 % доверительный интервал и соответствующие следующим критериям статистики:  $0,5 < R < 0,7$  — средняя связь;  $0,7 < R < 0,9$  — сильная;  $0,9 < R < 1$  — очень сильная. Корреляция численности диатомовых водорослей эпизоона и концентрации минеральной формы фосфора отрицательная, т. е. концентрация фосфатов снижается в зимне-весенний сезон при высокой численности МВ и повышается в летне-осенний. Высокая отрицательная корреляция численности диатомовых с температурой воды отражает общую тенденцию их сезонной динамики, характерной для микрофитобентоса Чёрного моря: увеличение  $N$  и  $B$  в зимне-весенний период при низкой температуре воды и снижение в летне-осенний сезон при её повышении [13].

Установлено, что общая численность фитопланктона имеет средние корреляционные связи с солёностью ( $R = -0,68$ ) и концентрацией нитратов ( $R = -0,51$ ) в поверхностном слое и температурой ( $R = -0,62$ ), содержанием растворённого кислорода ( $R = 0,57$ ) и органического азота ( $R = 0,52$ ) в придонном горизонте. Биомасса фитопланктона имеет среднюю корреляцию только с концентрацией кремния ( $R = -0,52$  и  $R = -0,55$  на 0 и 6 м соответственно).

Численность МВ эпизоона имеет сильную корреляционную связь с температурой воды ( $R = -0,71$ ), содержанием растворённого кислорода ( $R = 0,76$ ) и минерального фосфора ( $R = -0,70$ ) и среднюю — с концентрацией органического азота ( $R = 0,54$ ). Общая биомасса МВ эпизоона имеет среднюю корреляцию только с содержанием минерального фосфора. В отличие от состава органических форм фосфора, в состав органического азота входят, по-видимому, медленно утилизируемые микроводорослями продукты метаболизма планктона и бентоса, а также поллютанты, поступающие с хозяйственно-бытовыми сточными водами, что объясняет слабую корреляцию концентрации данной формы азота с биомассой и среднюю — с численностью МВ эпизоона. Между содержанием кислорода и количественными показателями фитопланктона связь отсутствует.

Анализ гидролого-гидрохимических характеристик показал, что между температурой и содержанием растворённого кислорода в воде наблюдается очень сильная корреляция, а между температурой и солёностью — средняя. Сильная взаимозависимость отмечена между солёностью, концентрацией нитратов и нитритов на горизонте 6 м. Между остальными параметрами установлены средние связи. Севастопольская бухта является основным источником загрязнения, оказывающим влияние на формирование качества воды и на количественные характеристики МВ акватории марихозяйства. Для этого района и ранее отмечали повышенные, по сравнению с фоном, концентрации минеральных и органических форм азота, фосфора, растворённого органического вещества, БПК<sub>5</sub> [3]. Для данной акватории с помощью комплексного индекса эвтрофикации E-TRIX [23] определён уровень трофности, который составил 2,73 при варьировании от 1,68 до 4,33 [3].

Таким образом, установлены общие тенденции изменения абиотических и биотических факторов среды, определяющих особенности формирования сезонной структуры фитопланктона и микрофитобентоса как единого эколого-флористического комплекса микроводорослей в прибрежной акватории мидийно-устричного марихозяйства.

#### **Выводы.**

1. В эпизооне мидии обнаружено 108 видов и внутривидовых таксонов микроводорослей с преобладанием бентосных диатомовых (93 вида), максимальными значениями обилия видов (26) и численности в феврале. Основной вклад в общую численность МВ вносят донные диатомовые водоросли *Tabularia fasciculata* и *Navicula ramosissima*, а в биомассу — цианобактерии. Отмечены следующие тенденции сезонной динамики количественных характеристик МВ: обилие диатомовых водорослей в зимне-весенний сезон, снижение численности в летне-осенний период и увеличение биомассы летом за счёт цианобактерий, что в целом характерно для микрофитобентоса Чёрного моря.
2. В фитопланктоне обнаружено 135 видов и внутривидовых таксонов, относящихся к 8 отделам водорослей: Cyanoprokaryota — 2, Bacillariophyta — 47, Dinophyta — 57, Naptophyta — 17, Chlorophyta — 5, Euglenophyta — 2, Cryptophyta — 3 и Chrysophyta — 2. Наибольшее обилие видов диатомовых отмечено у рода *Chaetoceros* (18). По численности и биомассе преобладают динофлагеллята *Prorocentrum micans* и гаптофитовая *Emiliania huxleyi*. Максимальная численность и биомасса фитопланктона отмечена весной и осенью.
3. Всего в фитопланктоне и эпизооне мидии обнаружено 213 таксонов МВ, из них 30 видов являются общими. Выявлено 26 потенциально токсичных видов и 24 вида-индикатора, из них 16 бетамезосапробионтов — индикаторов умеренного загрязнения вод.
4. Установлены корреляционные связи для гидролого-гидрохимических показателей водной среды в районе марихозяйства: средняя связь между температурой и солёностью, очень сильная между температурой и содержанием растворённого кислорода, а также численностью микроводорослей

- эпизоона мидии. Численность донных МВ эпизоона мидии имеет среднюю корреляционную связь с концентрацией минерального фосфора и органического азота, биомасса МВ — среднюю с концентрацией минерального фосфора. Численность фитопланктона имеет среднюю связь с концентрацией нитратов в поверхностном слое воды, температурой, кислородом и органическим азотом на 6 м.
5. Внутригодовые термохалинные характеристики не выходили за диапазон многолетних наблюдений. Содержание растворённого в воде кислорода на всех горизонтах находилось на высоком уровне (93–125 % насыщения). Соотношение концентраций минеральных форм азота к фосфору и концентраций кремния к фосфору с июля по декабрь ниже нормы, что вызывает лимитирование развития автотрофов азотом и кремнием.
  6. При выборе мест размещения марихозяйств необходимо учитывать гидролого-гидрохимические и экологические условия обитания гидробионтов, в т. ч. кормовую базу моллюсков, состоящую преимущественно из микроводорослей. В районе фермы по культивированию двустворчатых моллюсков в прибрежной зоне Чёрного моря близ г. Севастополя имеются благоприятные условия для развития экологически сбалансированного марихозяйства.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ИМБИ по теме «Разработка научных основ решения гидробиологических и биотехнологических проблем интегрированного управления прибрежными зонами» (№ 115081110011).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баринаева С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. *Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды*. Тель-Авив, 2006. 498 с. [Barinova S. S., Medvedeva L. A., Anisimova O. V. *Bioraznoobrazie vodoroslei-indikatorov okruzhayushchei sredy*. Tel'-Aviv, 2006, 498 p. (in Russ.)].
2. Иванов В. Н., Холодов В. И., Сеничева М. И., Пиркова А. В., Булатов К. В. *Биология культивируемых мидий*. Киев : Наукова думка, 1989. 100 с. [Ivanov V. N., Kholodov V. I., Senicheva M. I., Pirkova A. V., Bulatov K. V. *Biologiya kul'tiviruemyykh midii*. Kiev: Naukova dumka, 1989, 100 p. (in Russ.)].
3. Куфтаркова Е. А., Немировский М. С., Родионова Н. Ю. Гидрохимический режим района экспериментальной мидиевой фермы (рейд Севастополя, Чёрное море) // *Экология моря*. 2002. Вып. 59. С. 61–65. [Kuftarkova E. A., Nemirovsky M. S., Rodionova N. Yu. Hydrochemical regime of the region of the experimental mussel farm (the outer harbor of Sevastopol, the Black Sea). *Ekologiya morya*, 2002, iss. 59, pp. 61–65. (in Russ.)].
4. Лях А. М., Брянцева Ю. В. Компьютерная программа для расчёта основных параметров фитопланктона // *Экология моря*. 2001. Вып. 58. С. 87–90. [Lyakh A. M., Bryantseva Yu. V. Computer's program for the calculation of basic phytoplankton parameters. *Ekologiya morya*, 2001, iss. 58, pp. 87–90. (in Russ.)].
5. Макрушин А. В. *Биологический анализ качества вод*. Ленинград, 1974. 60 с. [Makrushin A. V. *Biologicheskii analiz kachestva vod*. Leningrad, 1974, 60 p. (in Russ.)].
6. *Марикультура мидий на Чёрном море* / под ред. В. Н. Иванова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. 314 с. [*Marikul'tura midii na Chernom more* / V. N. Ivanov (Ed.). Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2007, 314 p. (in Russ.)].
7. *Методы гидрохимических исследований основных гидрохимических элементов*. Москва : ВНИРО, 1988. 120 с. [*Metody gidrokhimicheskikh issledovaniy osnovnykh gidrokhimicheskikh elementov*. Moscow: VNIRO, 1988, 120 p. (in Russ.)].
8. Паутова Л. А., Микаэлян А. С., Силкин В. А. Структура планктонных фитоценозов шельфовых вод северо-восточной части Чёрного моря в период массового развития *Emiliania huxleyi* в 2002–2005 гг. // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 3. С. 408–417. [Pautova L. A., Mikaelyan A. S., Silkin V. A. Structure of

- plankton phytocoenoses in the shelf waters of the northeastern Black Sea during the *Emiliania huxleyi* bloom in 2002–2005. *Okeanologiya*, 2007, vol. 47, no. 3, pp. 408–417. (in Russ.).
9. Поспелова Н. В., Балычева Д. С., Рябушко Л. И. Микроводоросли в спектре питания культивируемых мидий (Крым, Чёрное море) // *Труды V Международ. науч.-практ. конф. «Морские исследования и образование (MARESEDU–2016)»*. Москва : Феория, 2016. С. 434–438. [Pospelova N. V., Balycheva D. S., Ryabushko L. I. Mikrovodorosli v spektre pitaniya kul'tiviruyemykh midii (Krym, Chernoe more). In: *Trudy V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Morskie issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU–2016)"*. Moscow: Feoriya, 2016, pp. 434–438. (in Russ.)].
  10. Пропп М. В., Пропп Л. Н. Гидрохимические основы процесса первичного продуцирования в прибрежном районе Японского моря // *Биология моря*. 1981. № 1. С. 29–38. [Propp M. V., Propp L. N. Gidrohimicheskie osnovy protcessa pervichnogo productsirovaniya v pribrezhnom rayone Yaponskogo morya. *Biologiya morya*, 1981, no. 1, pp. 29–38. (in Russ.)].
  11. Рябушко Л. И. *Диатомовые водоросли верхней сублиторали северо-западной части Японского моря* : автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.18-гидробиология. Севастополь, 1986. 24 с. [Ryabushko L. I. *Diatomovye vodorosli verkhnei sublitorali severo-zapadnoi chasti Yaponskogo morya*: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk: 03.00.18. Sevastopol, 1986, 24 p. (in Russ.)].
  12. Рябушко Л. И. *Потенциально опасные микроводоросли Азово-Черноморского бассейна*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 288 с. [Ryabushko L. I. *Potentially harmful microalgae of the Azovo-Black sea basin*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizica, 2003, 288 p. (in Russ.)].
  13. Рябушко Л. И. *Микрофитобентос Чёрного моря*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. 416 с. [Ryabushko L. I. *Microphytobenthos of the Black Sea*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizica, 2013, 416 p. (in Russ.)].
  14. Рябушко Л. И., Балычева Д. С., Козинцев А. Ф., Рябушко В. И. Диатомовые водоросли эпизоона мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. в марихозяйствах крымского побережья (Чёрное море) // *Вода: химия и экология*. 2017. № 6. С. 52–64. [Ryabushko L. I., Balycheva D. S., Kozintsev A. F., Ryabushko V. I. Epizoon diatoms of the mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. in marineshops in the Crimean coastal waters (the Black Sea). *Voda: khimiya i ekologiya*, 2017, no. 6, pp. 52–64. (in Russ.)].
  15. Силкин В. А., Паутова Л. А., Лифанчук А. В., Фёдоров А. В. Морфофизиологические стратегии фитопланктонных сообществ [Электронный ресурс] // *Вопросы современной альгологии*. 2015. № 1 (8). Режим доступа: <http://algology.ru/651>. [дата обращения: 06.12.2017]. [Silkin V. A., Pautova L. A., Lifanchuk A. V., Fedorov A. V. Morphological and physiological strategies of phytoplankton communities. *Voprosy sovremennoi al'gologii*, 2015, no. 1 (8). Available at: <http://algology.ru/651>. [accessed 06.12.2017]. (in Russ.)].
  16. Смирнова Л. Л., Рябушко В. И., Рябушко Л. И., Бабич И. И. Влияние концентрации биогенных элементов на сообщества микроводорослей прибрежного мелководья Чёрного моря // *Альгология*. 1999. Т. 9, № 3. С. 32–42. [Smirnova L. L., Ryabushko V. I., Ryabushko L. I., Babich I. I. Influence of concentration of biogen elements on the microalgae communities of the Black Sea shallow-water. *Al'gologiya*, 1999, vol. 9, no. 3, pp. 32–42. (in Russ.)].
  17. Холодов В. И., Пиркова А. В., Ладыгина Л. В. *Выращивание мидий и устриц в Чёрном море*. Воронеж: ООО «Издат-Принт», 2017. 508 с. [Kholodov V. I., Pirkova A. V., Ladygina L. V. *Vyrashchivanie midii i ustrits v Chernom more*. Voronezh: ООО "Izdat-Print", 2017, 508 p. (in Russ.)].
  18. Brzezinski M. A. The Si:C:N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables. *Journal of Phycology*, 1985, vol. 21, no. 3, pp. 347–357. doi: [10.1111/j.0022-3646.1985.00347.x](https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1985.00347.x).
  19. Castenholz R. W. The effect of grazing on marine littoral diatom populations. *Ecology*,

- 1961, vol. 42, no. 4, pp. 783–794. doi: [10.2307/1933507](https://doi.org/10.2307/1933507).
20. Medlin L. K. Effects of grazers on epiphytic diatom communities. In: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Symp. on Recent and Fossil Diatoms* / R. Ross (Ed.). Koenigstein, Germany: Koeltz Sci. Books, 1981, pp. 399–412.
21. Redfield A. C. On the Proportions of Organic Derivatives in Sea Water and Their Relation to the Composition of Plankton. In: *James Johnstone Memorial Volume*. Liverpool: University Press of Liverpool, 1934, pp. 176–192.
22. Volcani B. E. *Role of silicon in diatom metabolism and silicification*. In: *Biochemistry of Silicon and Related Problems* / G. Bendz, I. Lindqvist, V. Runnström-Reio (Eds). Boston, MA : Springer, 1978, pp. 177–204. (Nobel Foundation Symp.; vol. 40).
23. Vollenweider R., Giovanardi F., Montanari G., Rinaldi A. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*, 1998, vol. 9, iss. 3, pp. 329–357. doi: [10.1002/\(SICI\)1099-095X\(199805/06\)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9).

**EPIZOOON MICROALGAE  
OF THE CULTIVATED MOLLUSK *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* LAM. 1819,  
PHYTOPLANKTON,  
HYDROLOGICAL AND HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS  
IN THE MUSSEL-AND-OYSTER FARM AREA (SEVASTOPOL, BLACK SEA)**

**L. I. Ryabushko, N. V. Pospelova, D. S. Balycheva,  
N. P. Kovrigina, O. A. Troshchenko, S. V. Kapranov**

Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS, Sevastopol, Russian Federation  
E-mail: [larisa.ryabushko@yandex.ru](mailto:larisa.ryabushko@yandex.ru)

In mollusk cultivation areas large amount of biomass and metabolites is accumulated. For this reason, biological monitoring in the farming areas, which includes study of microalgae as environmental quality indicators, is of considerable importance. Samples of mussels harvested from collectors at 6 m depth over the period February 2015 – March 2016 have been utilized for studying epizoon microalgae residing on mollusk shells. At the same time, sea water at depths of 0 and 6 m was sampled for determining phytoplankton and hydrochemical parameters of environment in the mussel-and-oyster farm area. Dissolved oxygen, biological oxygen demand after five days of incubation in the dark (BOD<sub>5</sub>), alkaline permanganate oxidizability, silicates, organic and inorganic forms of nitrogen and phosphorus have been quantified in the water samples using conventional methods. In the epizoon of the mussel shells, 108 taxa of microalgae of four phyla have been identified: 3 species of Cyanoprokaryota, 6 of Dinophyta, 6 of Haptophyta and 93 of Bacillariophyta. The maximum values of the species richness (26) and abundance of microalgae were observed in February (74,78·10<sup>3</sup> cells·cm<sup>-2</sup>, t = 9,7 °C) and April 2015 (62,0·10<sup>3</sup> cells·cm<sup>-2</sup>, t = 10,3 °C), as well as in January 2016 (65,1·10<sup>3</sup> cells·cm<sup>-2</sup>, t = 9,5 °C). The highest biomass was registered in August (0,272 mg·cm<sup>-2</sup>, t = 25,5 °C). The main contribution to the total abundance was made by the diatoms *Tabularia fasciculata* while *Navicula ramosissima*, and cyanobacteria were prevalent in the total biomass. In phytoplankton at the depths of 0 and 6 m, 135 taxa belonging to eight phyla have been found: 2 species of Cyanoprokaryota, 47 of Acillariophyta, 57 of Inophyta, 17 of Haptophyta, 5 of Chlorophyta, 2 of Euglenophyta, 3 of Cryptophyta and 2 of Chrysophyta. The genus *Chaetoceros* dominated by the number of diatoms species (18). In terms of abundance and biomass, the dinoflagellate *Prorocentrum micans* and haptophyte *Emiliania huxleyi* were dominant. The maximum abundance (370·10<sup>7</sup> cells·m<sup>-3</sup>) and biomass (7560 mg·m<sup>-3</sup>) of the phytoplankton were observed in spring and autumn. In total, 213 of microalgae taxa have been identified in the phytoplankton and mussel shell epizoon, with 30 ones being common for both. Furthermore, 26 potentially toxic species and 24 indicator species have been determined, among which 26 ones are betamesosaprobionts, the indicators of moderate level of water pollution. Thermohaline characteristics of water in the mollusk farm area did not exceed those of the long-term observations. At all horizons, the oxygen content was at the level of 93–125 % of saturation. The sea water oxidizability did not exceed the maximum permissible level established

by fishery standards. The concentration of nutrients was high with a large fluctuation range, which indicates anthropogenic impact on the water area. The values of the total inorganic nitrogen-to-phosphorus and silicon-to-phosphorus ratios suggested nitrogen and silicon limitations for the microalgae community development from July to December. The mussel epizoon microalgae abundance strongly correlated with water temperature and dissolved oxygen, and a strong correlation of the biomass with inorganic phosphorus was observed, too. Moderate correlations were also found with inorganic phosphorus and organic nitrogen. For the phytoplankton, moderate correlations of abundance with hydrological and hydrochemical characteristics were identified: with nitrates in the surface layer and with temperature, dissolved oxygen, and organic nitrogen in the subsurface water layer. The phytoplankton biomass moderately correlated with the silicate concentration. The hydrological and hydrochemical structure of sea water, especially in the mollusk farming areas, affected species composition and quantitative characteristics of planktonic and benthic microalgae communities.

**Keywords:** phytoplankton, epizoon microalgae, hydrochemical characteristics, mussel-and-oyster farm, Black Sea

**Рябушко Л. И., Бегун А. А. Диатомовые водоросли микрофитобентоса Японского моря. В 2-х т. Т. 2. – Севастополь : ПК «КИА», 2016. – 324 с.**

Второй том монографии включает Синописис с аннотированным списком видов, указанием их экологии и фитогеографии, общего распространения в различных регионах Мирового океана, встречаемость видов в Японском море. Дана мировая сводка библиографических источников. Атлас диатомовых водорослей иллюстрирован рисунками и фотоснимками, выполненными в световом и электронных микроскопах (СЭМ, ТЭМ).

Книга рассчитана на альгологов, гидробиологов, экологов, аспирантов, преподавателей и студентов учебных заведений.

