

УДК 582.26/.27:628.193:581.526.323(262.54)

ИНДИКАТОРНЫЕ МИКРОВОДОРОСЛИ БЕНТОСА В ОЦЕНКЕ СТЕПЕНИ ОРГАНИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОД НА ПРИМЕРЕ КРЫМСКОГО ПРИБРЕЖЬЯ АЗОВСКОГО МОРЯ

© 2019 г. Л. И. Рябушко¹, А. В. Бондаренко¹, С. С. Барина²

¹Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей
имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

²Институт эволюции Университета Хайфы, Хайфа, Израиль
E-mail: larisa.ryabushko@yandex.ua

Поступила в редакцию 09.07.2018; после доработки 10.04.2019;
принята к публикации 25.09.2019; опубликована онлайн 30.09.2019.

Приведены данные по исследованию микрофитобентоса крымского побережья Азовского моря на 17 станциях в заливе Сиваш (восточный и западный), б. Камыш-Бурунская (г. Керчь) и бухтах м. Казантип в течение 2005–2006, 2008–2011 и 2014 гг. Обнаружено 200 видов и внутривидовых таксонов микроводорослей, относящихся к 77 родам. Среди них выделено 78 видов — индикаторов сапробности с известными биоиндикационными свойствами органического загрязнения вод (относящихся к цианобактериям — 17 %, к диатомовым водорослям — 83 %), с использованием которых проведён анализ по экотопам и районам исследования. В составе микроводорослей ведущее место (31 вид) принадлежит индикаторной группе бетамезосапробионтов — показателей III класса качества вод с умеренным органическим загрязнением с индексом сапробности $S = 2,0$. Второе место (10 видов) занимает группа олигосапробионтов — показателей II класса качества вод, которая является типичной для природных чистых вод с индексом $S = 1,0$. Установлено, что в изученном регионе отсутствуют негативные для биоты изменения качества вод, что свидетельствует о том, что антропогенное воздействие не превышает самовосстановительного потенциала морской экосистемы. Между тем наличие в бентосных сообществах видов — индикаторов IV класса качества вод (17–21 %) указывает на постоянный приток органических веществ, которые постепенно утилизируются живой составляющей прибрежных экосистем. Обсуждаются сравнительные данные по соотношению состава индикаторных видов микроводорослей Азовского моря с таковыми в других морях умеренных широт.

Ключевые слова: микроводоросли, микрофитобентос, сапробность, класс качества вод, Крым, Азовское море

Азовское море — уникальный водоём, который считают самым континентальным и мелководным морем в мире. Оно характеризуется резким изменением солёности в различных своих регионах и значительными колебаниями температуры воды. Надёжными биоиндикаторами экологического состояния водоёмов служат микроводоросли [1, 2, 12, 18, 19, 24]: по их флористическим, количественным и продукционным характеристикам, а также по данным их отношения к солёности и сапробности воды можно оценивать состояние водных экосистем.

В настоящее время к наиболее изученным группам бентали Азовского моря относятся диатомовые водоросли и цианобактерии [15]. Его микрофитобентос исследован неравномерно и недостаточно [3, 4, 5, 7, 8, 15, 16, 23]. Последние данные свидетельствуют о том, что в крымском мелководье Азовского моря существует единый эколого-флористический комплекс видов микроводорослей фитопланктона и микрофитобентоса [3], аналогичный таковому для побережья Чёрного моря [12].

К важной экологической характеристике качества вод водоёмов относится показатель солёности как одного из абиотических факторов. Система оценки сапробности водоёмов по индикаторным видам микроводорослей, детально разработанная для пресных вод, за последнее время была усовершенствована [1, 18] и сейчас широко используется при анализе разнообразного материала, однако для морских микроводорослей подобные сведения остаются отрывочными и достаточно скудными. Этот методический подход слабо и ограниченно информационно представлен в работах по изучению микроводорослей бентоса Азовского, Чёрного и Японского морей, а также египетского побережья Средиземного моря [2, 3, 4, 5, 12, 13, 25]. В некоторых из этих публикаций приведены данные по массовым видам бентосных диатомовых водорослей, характеризующих ацидификацию вод и указывающих на преобладание в изученных биотопах алкалифильных видов с отдельными индифферентными формами. При этом следует учитывать тот факт, что в морях, в отличие от пресных водоёмов, pH изменяется слабо, а значит, при характеристике качества вод с использованием микроводорослей данными pH можно пренебречь.

Противоречивость и ограниченность сведений о валидном систематическом статусе некоторых видов донных микроводорослей и их экологической характеристике, недостаточность количественных данных по сезонной динамике распределения популяций и сообществ микрофитобентоса в разных экотопах моря, а также отсутствие разработанной шкалы сапробности для целей биоиндикации и оценки экологической обстановки в локальных акваториях, включая особо охраняемые природные территории, свидетельствуют о необходимости и целесообразности сочетания разных методов и подходов. Особенно важным, актуальным и перспективным является анализ микрофитобентоса морской среды с различным уровнем органического загрязнения. В связи с вышеизложенным назрела необходимость использовать полученные данные по изучению донных микроводорослей, топически тесно связанных с субстратом, для оценки качества морских вод.

Цель работы — проанализировать альгологические, экологические и биоиндикационные характеристики микроводорослей бентоса в различных экотопах и районах исследования крымского побережья Азовского моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для анализа альгологических, экологических и биоиндикационных характеристик микрофитобентоса крымского побережья Азовского моря послужили пробы, собранные на 17 станциях (рис. 1) в течение 2005–2006, 2008–2011 и 2014 гг. на глубине 0,3–1,5 м в трёх мелководных акваториях: I — залив Сиваш (45°93' с. ш., 34°46' в. д.), II — Керченский пролив (45°29' с. ш., 36°42' в. д.), III — м. Казантип, включая бухты Казантипского заповедника (45°28' с. ш., 35°52' в. д.). Всего за период исследования в разные сезоны собрано и обработано 229 проб микрофитобентоса (в I районе — 55, во II — 50, в III — 124), охватывающих следующие экотопы: эпилитон, эпифитон и рыхлые грунты [3]. Рыхлые грунты в исследованных районах представлены смесью песка, ила и ракуши; микроводоросли входят в смешанные сообщества эпипелона, эпипсаммона и ракуши.

Солёность воды в районе I составляла 34–46 ‰, во II — 13–15 ‰, в III — 11,5 ‰.

Температура воды за период проведения работ варьировала от –0,5 °C (февраль) до +29 °C (август). Исследование объектов проводили в световых микроскопах «БИОЛАМ-212» и Axioskop 40 (Carl Zeiss) при увеличении в диапазоне от ×400 до ×1000 с окуляром 10 и объективами 40, 90 и 100 соответственно [12]. Для определения размеров морфологических структур клеток микроводорослей применяли программу AxioVisionRel. 4.6. При анализе биоиндикационных характеристик микроводорослей и при их таксономической идентификации использовали литературные источники [1, 6, 11, 13, 14, 15, 18, 21, 22, 23, 24].

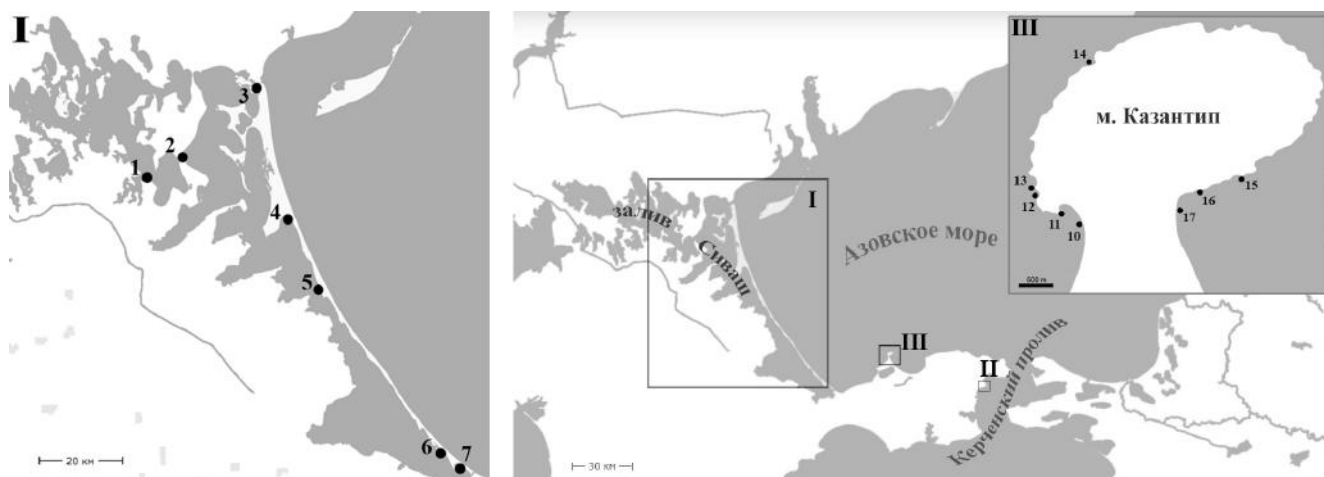


Рис. 1. Карты районов исследования (I–III) и станции (1–17) отбора проб микрофитобентоса крымского побережья Азовского моря: I — залив Сиваш (западный и восточный) (50 проб); II — Керченский пролив (станции 8, 9), б. Камыш-Бурунская (55 проб); III — бухты мыса Казантип (124 пробы)

Fig. 1. Maps of the studied regions (I–III) and microphytobenthos sampling stations (1–17) in Crimean coastal waters of the Sea of Azov: I – Sivash Gulf (Western and Eastern) (50 samples); II – Kerch Strait (stations 8, 9), Kamysh-Burunskaya Bay (55 samples); III – bays of Kazantip Cape (124 samples)

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате исследований составлен общий список водорослей микрофитобентоса, обитающих в разных экотопах трёх районов крымского побережья Азовского моря (рис. 1). Обнаружено 200 видов и внутривидовых таксонов микроводорослей, относящихся к 77 родам из 5 отделов: Cyanoprokaryota (32), Bacillariophyta (157), Dinophyta (7), Haptophyta (3) и Chlorophyta (1) — с преобладанием диатомовых (78 %) [3]. Отмечено 64 % бентосных, 19 % бенто-планктонных и 17 % планктонных видов. Относительно высокая доля планктонных водорослей обусловлена, по-видимому, мелководностью районов исследования.

Классификация видового состава микроводорослей по их отношению к солёности воды показала, что при разных её значениях в крымском побережье Азовского моря преобладают морские виды микроводорослей: в I районе — 48 %, во II — 41 %, в III — 35 %. В то же время заметный вклад вносят пресноводные и пресноводно-солонатоводные виды (рис. 2).

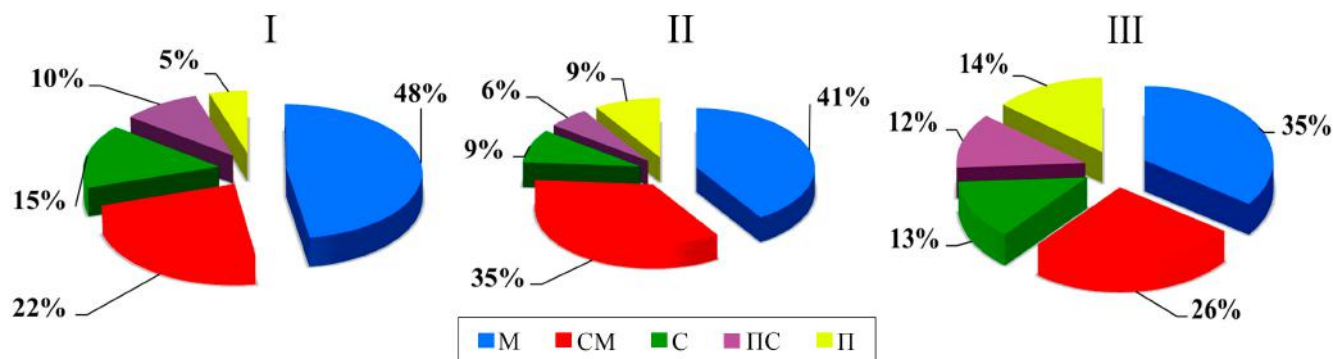


Рис. 2. Процентное соотношение экологических групп водорослей микрофитобентоса в зависимости от солёности воды. М — морские, CM — солонатоводно-морские, С — солонатоводные, ПС — пресноводно-солонатоводные, П — пресноводные формы в разных регионах крымского побережья Азовского моря: I — залив Сиваш (западный и восточный); II — б. Камыш-Бурунская; III — бухты мыса Казантип

Fig. 2. The percentage of ecological groups of the microphytobenthos algae, depending on the water salinity. М – marine, CM – brackish marine, С – brackish, ПС – freshwater-brackish, П – freshwater forms in different regions of Crimean coastal waters of the Sea of Azov: I – Sivash Gulf (Western and Eastern); II – Kamysh-Burunskaya Bay; III – bays of Kazantip Cape

В результате анализа биоиндикационных характеристик микроводорослей исследованных районов крымского побережья Азовского моря из общего количества обнаруженных видов нами выбрано 78 видов — индикаторов сапробности, для которых известны индексы их отношения к органическому загрязнению (табл. 1). Отметим, что в основном индексы сапробности указаны для микроводорослей из пресных водоёмов. Упомянутые выше водоросли принадлежат к 2 отделам и 39 родам; из них 13 видов относятся к цианобактериям (17 % общего количества) и 65 видов — к диатомовым (83 %). По экотопам обитания отмечено: в эпифитоне — 62 вида, эпицитоне — 36, рыхлых грунтах (ил, песок, ракуша) — 46. По регионам исследования: в заливе Сиваш — 43 вида, Керченском проливе — 37, у мыса Казантип — 51 (табл. 1).

Таблица 1. Видовой состав микроводорослей — индикаторов сапробности в исследованных экотопах и районах крымского побережья Азовского моря

Table 1. Species composition of microalgae – the saprobity indicators in the studied ecotopes and regions of Crimean coastal waters of the Sea of Azov

Taxa	ЭФ	ЭЛ	Р	СИБ	КБ	КАЗ	Sapro	S
CYANOPROKARYOTA								
<i>Aphanocapsa incerta</i> (Lemmermann) G. Cronberg & Komárek, 1994	+	–	–	–	–	+	β	2,2
<i>Aphanothece stagnina</i> (Sprengel) A. Braun, 1863	+	+	+	+	–	+	β - α	2,4
<i>Leptolyngbya foveolaria</i> (Gomont) Anagnostidis & Komárek, 1988	+	–	–	–	–	+	β - α	2,4
<i>Leptolyngbya fragilis</i> (Gomont) Anagnostidis & Komárek, 1988	+	–	+	+	–	–	β - o	1,7
<i>Lyngbya aestuarii</i> Lieberman ex Gomont, 1892	+	–	–	+	–	–	o	1,3
<i>Merismopedia glauca</i> (Ehrenberg) Kützing, 1845	–	–	+	+	–	–	β - o	1,75
<i>Microcystis aeruginosa</i> (Kützing) Kützing, 1846	+	+	+	–	–	+	β	2,1
<i>Microcystis pulvereae</i> (H. C. Wood) Forti, 1907	+	–	+	–	–	+	o - β	1,5
<i>Microcystis wesenbergii</i> (Komárek) Komárek ex Komárek, 2006	+	–	+	–	+	+	o - α	1,9
<i>Nodularia harveyana</i> Thuret ex Bornet & Flahault, 1886	+	–	–	–	–	+	o	1,2
<i>Phormidium breve</i> (Kützing ex Gomont) Anagnostidis & Komárek, 1988	+	–	–	+	–	–	α	3,1
<i>Pleurocapsa minor</i> Hansgirg, 1891	–	+	–	–	+	–	x - o	0,5
<i>Spirulina tenuissima</i> Kützing, 1836	+	–	+	+	–	+	o - β	1,4
BACILLARIOPHYTA								
<i>Achnanthes brevipes</i> C. Agardh, 1824	+	+	+	+	+	+	β	2,0
<i>Amphora ovalis</i> (Kützing) Kützing, 1844	–	–	+	+	–	+	o - β	1,5
<i>Bacillaria paxillifera</i> (O. F. Müller) Hendey, 1951	+	+	+	–	+	+	β	2,3
<i>Cocconeis costata</i> Gregory, 1855	+	+	+	–	+	+	β	2,0
<i>Cocconeis disculus</i> (Schumann) Cleve, 1882	+	+	+	+	+	+	o - x	0,7
<i>Cocconeis pediculus</i> Ehrenberg, 1838	+	–	–	+	–	–	o - α	1,8
<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>intermedia</i> (Héribaud-Joseph & M. Peragallo) Cleve, 1895	+	+	+	+	+	+	o - β	1,4
<i>Cocconeis scutellum</i> Ehrenberg, 1838	+	+	+	+	+	+	β	2,0
<i>Ctenophora pulchella</i> (Ralfs ex Kützing) D. M. Williams & Round, 1986	–	–	+	–	+	–	β	2,3
<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenberg) Reimann & J. C. Lewin, 1964	+	+	–	–	+	+	β	2,0
<i>Diatoma tenuis</i> C. Agardh, 1812	+	+	–	–	–	+	o	1,3
<i>Diatoma vulgaris</i> Bory de Saint-Vincent, 1824	+	–	–	–	–	+	β	2,2
<i>Diploneis didyma</i> (Ehrenberg) Ehrenberg, 1839	–	–	+	–	–	+	β	2,0

Продолжение на следующей странице...

Taxa	ЭФ	ЭЛ	Р	СИБ	КБ	КАЗ	Sapro	S
<i>Entomoneis alata</i> (Ehrenberg) Ehrenberg, 1845	–	–	+	+	–	–	β	2,0
<i>Entomoneis paludosa</i> (W. Smith) Reimer, 1975	+	+	+	–	+	+	$\beta-\alpha$	2,5
<i>Fallacia pygmaea</i> (Kützing) A. J. Stickle & D. G. Mann, 1990	–	+	–	–	+	–	$\alpha-o$	2,7
<i>Fragilaria capucina</i> Desmazières, 1825	+	+	+	–	+	+	$\beta-o$	1,6
<i>Fragilaria crotonensis</i> Kitton, 1869	+	–	–	–	+	+	$o-\beta$	1,5
<i>Fragilariforma virescens</i> (Ralfs) D. M. Williams & Round, 1988	+	+	+	–	+	+	$x-o$	0,4
<i>Gyrosigma fasciola</i> (Ehrenberg) J. W. Griffith & Henfrey, 1856	–	–	+	+	–	–	o	1,0
<i>Gyrosigma scalproides</i> (Rabenhorst) Cleve, 1894	+	–	+	+	–	+	β	2,2
<i>Gyrosigma wansbeckii</i> (Donkin) Cleve, 1894	–	–	+	+	–	–	β	2,0
<i>Halamphora acutiuscula</i> (Kützing) Levkov, 2009	+	+	+	–	+	+	β	2,0
<i>Halamphora coffeaeformis</i> (C. Agardh) Levkov, 2009	+	+	+	+	+	+	α	3,0
<i>Hippodonta capitata</i> (Ehrenberg) Lange-Bertalot, Metzeltin & Witkowski, 1996	–	+	+	–	–	+	β	2,1
<i>Hyalodiscus scoticus</i> (Kützing) Grunow, 1879	+	–	–	–	+	–	β	2,0
<i>Mastogloia smithii</i> Thwaites ex W. Smith, 1856	+	–	+	+	–	+	o	1,3
<i>Melosira lineata</i> (Dillwyn) C. Agardh, 1824	+	–	–	–	+	–	$o-\alpha$	1,8
<i>Melosira moniliformis</i> var. <i>moniliformis</i> (O. F. Müller) C. Agardh, 1824	+	+	+	+	+	+	β	2,0
<i>Melosira moniliformis</i> var. <i>subglobosa</i> (Grunow) Hustedt, 1927	+	–	–	–	+	–	β	2,0
<i>Navicula cryptocephala</i> Kützing, 1844	+	–	–	+	–	–	β	2,1
<i>Navicula digitoradiata</i> (Gregory) Ralfs, 1861	+	+	–	+	+	+	β	2,0
<i>Navicula peregrina</i> (Ehrenberg) Kützing, 1844	+	–	+	+	+	+	$o-\beta$	1,5
<i>Navicula radiosa</i> Kützing, 1844	+	–	–	+	–	–	o	1,3
<i>Navicula salinarum</i> Grunow, 1880	+	+	–	+	–	+	β	2,1
<i>Navicula veneta</i> Kützing, 1844	+	+	–	–	–	+	$\alpha-o$	2,7
<i>Nitzschia amphibia</i> Grunow, 1862	+	–	–	–	+	–	β	2,1
<i>Nitzschia dissipata</i> (Kützing) Rabenhorst, 1860	+	–	+	+	+	+	$\beta-o$	1,7
<i>Nitzschia gracilis</i> Hantzsch, 1860	+	–	+	+	–	–	$o-\alpha$	1,8
<i>Nitzschia holsatica</i> Hustedt, 1930	+	–	+	+	–	–	β	2,3
<i>Nitzschia lanceolata</i> W. Smith, 1853	+	+	+	–	+	+	β	2,0
<i>Nitzschia linearis</i> W. Smith, 1853	+	–	–	–	+	–	$\beta-o$	1,7
<i>Nitzschia obtusa</i> W. Smith, 1853	+	+	–	+	+	+	$\beta-a$	2,4
<i>Nitzschia recta</i> Hantzsch ex Rabenhorst, 1862	+	–	–	+	–	–	$o-\beta$	1,5
<i>Nitzschia scalpelliformis</i> Grunow, 1880	+	–	–	–	–	+	β	2,0
<i>Nitzschia sigma</i> (Kützing) W. Smith, 1853	+	+	+	+	+	+	α	3,0
<i>Nitzschia sigmoidea</i> (Nitzsch) W. Smith, 1853	+	+	+	+	+	+	$\beta-\alpha$	2,5
<i>Nitzschia vermicularis</i> (Kützing) Hantzsch, 1860	+	+	–	+	–	+	β	2,2
<i>Odontella aurita</i> (Lyngbye) C. Agardh, 1832	–	+	+	+	+	–	β	2,0
<i>Planothidium delicatulum</i> (Kützing) Round & Bukhtiyarova, 1996	+	–	–	+	–	–	β	2,0
<i>Planothidium hauckianum</i> (Grunow) Round & Bukhtiyarova, 1996	+	–	–	–	–	+	o	1,0
<i>Pleurosigma angulatum</i> (J. T. Queckett) W. Smith, 1852	+	–	+	+	+	+	β	2,0
<i>Pleurosigma elongatum</i> W. Smith, 1852	+	+	+	+	+	+	β	2,0
<i>Pseudostaurosira brevistriata</i> (Grunow) D. M. Williams & Round, 1987	+	+	–	–	–	+	o	1,2

Продолжение на следующей странице...

Taxa	ЭФ	ЭЛ	Р	СИБ	КБ	КАЗ	Sapro	S
<i>Rhoicosphenia abbreviata</i> (C. Agardh) Lange-Bertalot, 1980	+	+	+	–	–	+	<i>o-a</i>	1,9
<i>Rhopalodia gibberula</i> (Ehrenberg) O. F. Müller, 1899	–	–	+	+	–	–	β	2,0
<i>Rhopalodia musculus</i> (Kützing) O. F. Müller, 1899	–	–	+	+	–	–	<i>o</i>	1,0
<i>Skeletonema subsalsum</i> (Cleve-Euler) Bethge, 1928	+	–	–	–	–	+	<i>o</i>	1,0
<i>Surirella ovalis</i> Brébisson, 1838	+	–	+	+	–	+	α	3,0
<i>Tabularia fasciculata</i> (C. Agardh) D. M. Williams & Round, 1986	+	–	–	–	–	+	$\beta-\alpha$	2,5
<i>Tabularia parva</i> (Kützing) Williams & Round, 1986	+	+	+	+	+	+	α	3,0
<i>Tryblionella acuminata</i> W. Smith, 1853	+	+	–	+	+	–	$\alpha-o$	2,9
<i>Tryblionella apiculata</i> Gregory, 1857	–	–	+	+	–	–	$\alpha-o$	2,7
<i>Tryblionella hungarica</i> (Grunow) Frenguelli, 1942	+	+	+	+	+	+	$\alpha-o$	2,9
<i>Tryblionella levidensis</i> W. Smith, 1856	–	+	+	–	+	+	$\alpha-o$	2,6
Итого:	62	36	46	43	37	51	–	–

Примечание: экотопы: ЭФ — эпифитон; ЭЛ — эпилитон; Р — рыхлые грунты. Районы исследования: СИБ — залив Сиваш; КБ — бухта Камыш-Бурунская (г. Керчь); КАЗ — бухты мыса Казантип. Сапробность: Sapro — зона самоочищения; S — видовой индекс сапробности по Sládeček [1, 24]. Названия индикаторных групп указаны в табл. 2

Note: ecotopes: ЭФ – epiphyton; ЭЛ – epilithon; Р – loose soil. Studied regions: СИБ – Sivash Gulf; КБ – Kamysh-Burunskaya Bay (Kerch); КАЗ – bays of Kazantip Cape. Saprobity: Sapro – self-cleaning zone; S – species saprobity index according to Sládeček [1, 24]. Indicator group names are listed in table 2

Во флоре микроводорослей зарегистрировано наибольшее число индикаторных видов (31), принадлежащих к группе бетамезосапробионтов — показателей умеренного органического загрязнения вод с индексом $S = 2,0$. Второе место занимает группа олигосапробионтов (10 видов), которая является типичной для природных чистых водоёмов с $S = 1,0$ (табл. 2).

На основе характеристик сапробности микроводорослей (согласно шкале Европейского союза [19]) для каждого из трёх исследованных типов субстратов крымского побережья Азовского моря установлено процентное соотношение видов-индикаторов, характеризующих 4 класса качества вод по их сапробности (табл. 2). Результаты анализа распределения по исследованным экотопам видов

Таблица 2. Распределение индикаторных групп микроводорослей и их сапробность по классу качества вод в крымских прибрежных водах Азовского моря, согласно цветовому коду стандартной шкалы Европейского союза (ЕС)

Table 2. Distribution of microalgae indicator groups and their saprobity by Water Quality Class in Crimean coastal waters of the Sea of Azov, according to European Union (EC) color code

Класс качества воды	Цветовой код (ЕС)	Групповой специфический индекс, s	Сапробность индикаторных групп	Количество индикаторных таксонов
1	Голубой	$x-o$ — 0,4	Ксено-олигосапробионт	1
2	Зелёный	$o-x$ — 0,6	Олиго-ксеносапробионт	1
2	Зелёный	$x-o$ — 0,5	Ксено-бетамезосапробионт	1
2	Зелёный	o — 1,0	Олигосапробионт	10
2	Зелёный	$o-\beta$ — 1,4	Олиго-бетамезосапробионт	7
3	Жёлтый	$\beta-o$ — 1,6	Бета-олигосапробионт	5
3	Жёлтый	$o-\alpha$ — 1,8	Олиго-альфамезосапробионт	5
3	Жёлтый	β — 2,0	Бетамезосапробионт	31
3	Жёлтый	$\beta-\alpha$ — 2,4	Бета-альфамезосапробионт	6
4	Оранжевый	$\alpha-o$ — 2,6	Альфа-олигосапробионт	6
4	Оранжевый	α — 3,0	Альфамезосапробионт	5

микроводорослей — индикаторов органического загрязнения практически не выявили резких различий, поскольку в сообществах в основном присутствуют виды — индикаторы III класса качества вод, характеризующие умеренное загрязнение (рис. 3). Между тем на илистых грунтах, в отличие от других субстратов, отмечено увеличение количества видов — индикаторов IV класса (высокая степень загрязнения вод).

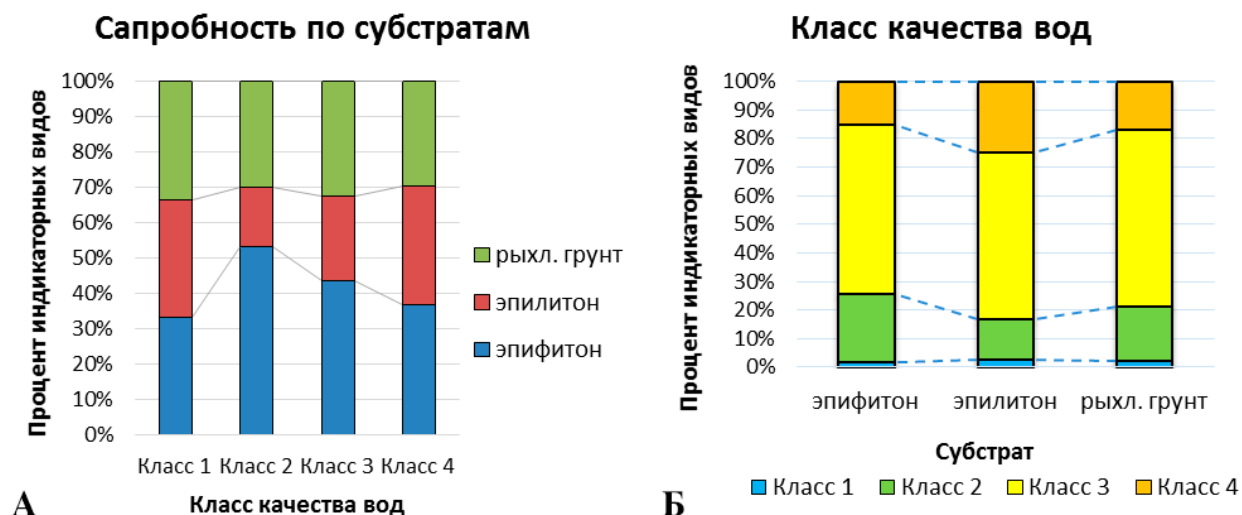


Рис. 3. Процентное соотношение микроводорослей — индикаторов сапробности (А) в зависимости от класса качества вод (Б) в разных экотопах крымского побережья Азовского моря

Fig. 3. The percentage of microalgae species – the saprobity indicators (А) depending on the Water Quality Class (Б) in different ecotopes of Crimean coastal waters of the Sea of Azov

В целом в прибрежных сообществах не прослеживается чёткой специфичной приуроченности каких-либо групп видов — индикаторов сапробности к тому или иному субстрату, что, возможно, объясняется тем, что в прибрежной зоне, особенно на мелководье, воды постоянно перемешиваются во время штормов, ветров, течений, сгонно-нагонных явлений в море, поэтому между разными экотопами происходит регулярное перераспределение органических веществ.

Результат сравнительного анализа распределения индикаторных видов по классам качества вод в исследованных районах показал, что доминирующей группой являются бетамезосапробионты, или индикаторы III класса качества вод (рис. 4).

Отметим, что в акваториях у м. Казантип и залива Сиваш отмечена высокая доля видов, характеризующих II класс качества вод (показатели относительно чистых вод), — 26 и 25 % соответственно. В б. Камыш-Бурунская (г. Керчь) обнаружено максимальное число видов — индикаторов III класса качества вод (63 %) при минимальной доле видов II класса (13 %). Вклад видов — показателей IV класса в состав микрофитобентоса бухт м. Казантип составлял 17 %, залива Сиваш и б. Камыш-Бурунская — 20 и 21 % соответственно. Таким образом, акватории заповедника м. Казантип могут быть оценены как более чистые, чем акватории других исследованных районов. Присутствие здесь видов микроводорослей, характерных для загрязнённых вод, указывает на постоянное поступление органических веществ, что связано, вероятно, с функционированием многочисленных объектов рекреации, расположенных с двух сторон заповедного комплекса. Подтверждением данного предположения служит факт массового развития бета- и альфамезосапробионтов в эпифитоне и эпипитоне побережья м. Казантип в конце лета [3]. В заливе Сиваш высокий процент видов, характерных для загрязнённых органикой вод, объясняется, скорее, естественными факторами, чем антропогенной нагрузкой, поскольку здесь залегают илы, представляющие собой смесь минеральных и органических веществ и местами достигающие толщины 5 м.

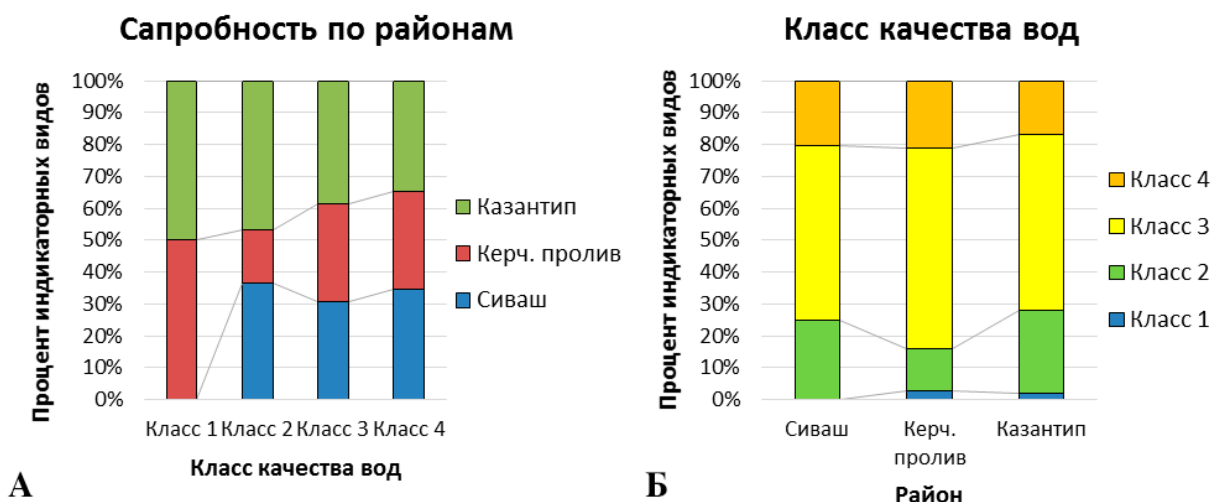


Рис. 4. Процентное соотношение микроводорослей — индикаторов сапробности (А) в зависимости от класса качества вод (Б) в исследованных районах крымского побережья Азовского моря

Fig. 4. The percentage of microalgae species — the saprobity indicators (A) depending on the Water Quality Class (B) in the studied regions of Crimean coastal waters of the Sea of Azov

В целом в крымском побережье Азовского моря во всех экотопах и районах исследования отмечены микроводоросли — индикаторы органического загрязнения вод с широким диапазоном варьирования индекса сапробности S (от 0,4 до 3,0) с преобладанием видов — показателей III класса качества вод, соответствующих средней степени загрязнения водоёмов. Акватории крымского побережья Азовского моря можно оценить как умеренно загрязнённые и отнести к мезотрофным водам, что обусловлено, вероятно, отсутствием здесь влияния крупных портов и промышленных объектов. Наличие в бентосных сообществах видов — индикаторов IV класса качества вод указывает на постоянный приток органического вещества, которое постепенно утилизируется живой составляющей прибрежных экосистем.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для сравнительного анализа индикаторных видов микроводорослей при использовании их в целях биоиндикации качества вод привлечены, наряду с собственными данными по микрофитобентосу различных экотопов в разных морях, литературные сведения по фитопланктону, поскольку многие авторы в планктоне указывают и бентосные виды. Ниже приведём ряд примеров в трактовке подобного материала по методу Пантле — Бука в модификации Sládeček [24] и с учётом класса качества вод (см. табл. 1, 2).

Азовское море. Результат предварительного анализа степени загрязнения побережья восточной части моря показал, что некоторые акватории региона соответствуют преимущественно III классу качества вод в диапазоне S от 1,48 до 2,26 (по данным Г. В. Ковалёвой [7]), либо IV классу по европейскому стандарту (по данным С. С. Бариновой с соавторами [19]). В планктоне и бентосе отмечен 41 таксон диатомовых водорослей и цианобактерий [7], которые являются общими с указанными в табл. 1. Преобладала группа бетамезосапробионтов (46 %).

Из 64 таксонов микроводорослей, обнаруженных в эпибиозе гидроидного полипа *Garveia franciscana* (Torrey, 1902), одного из преобладающих видов в обрастании гидротехнических сооружений и системы водоснабжения металлургического комбината «Азовсталь» в Таганрогском заливе [9], 15 видов диатомовых являлись общими с перечисленными в табл. 1. Доминировали бетамезосапробионты (5 видов) и альфамезосапробионты (3 вида) — показатели II–IV класса качества вод. В перифитоне Таганрогского залива из указанных ранее [5] видов микроводорослей нами выделено 20 общих индикаторных видов диатомовых и цианобактерий с преобладанием бетамезосапробионтов (9 видов).

Для сравнения со списком табл. 1 проведён анализ работ по фитопланктону Азовского моря. Так, по данным [17], 14 сапробионтных видов микроводорослей, найденных в лиманах Восточного Приазовья и Кызылташской системы, являются общими; из них 8 видов — бетамезосапробионты, они относятся в основном к индикаторам III класса качества вод. При анализе другой публикации по фитопланктону в разных частях Азовского моря [10] нами выделено 32 общих таксона диатомовых водорослей и цианобактерий с преобладанием группы бетамезосапробионтов (43 %) с элементами бета-альфамезосапробионтов.

Чёрное море. Здесь в микрофитобентосе (в том числе в крымском побережье) указано общих с Азовским морем 60 (37) видов диатомовых и 8 (2) видов цианобактерий [12]. Доминируют бетамезосапробионты (29 видов, или 43 %), являющиеся индикаторами III класса качества вод. Близкое сходство классов качества вод крымского побережья Чёрного и Азовского морей указывает на средний уровень антропогенного загрязнения, не превышающий самовосстановительного потенциала морских экосистем.

Средиземное море. Сравнение видового состава сообществ микроводорослей вышеуказанных морей с таковым в более загрязнённых участках Восточного Средиземноморья, особенно в районе выноса загрязнений р. Кишон (Qishon River) и в акватории порта г. Хайфа, одного из крупнейших на побережье, показало, что сообщества здесь представлены преимущественно видами — индикаторами группы альфамезосапробионтов [19]. Некоторые данные имеются и для бентоса египетского побережья близ г. Порт-Саид. Обнаружено 167 таксонов диатомовых водорослей, относящихся к 52 родам. Из них отмечено более 82 % бентосных и 18 % планктонных видов с преобладанием полигалобов (67,5 %); мезогалобные формы составляли 15,5 %; олигогалобные — 17 % [25]. В этом же районе на разных глубинах в эпифитоне макрофитов обнаружено 46 и в эпипсаммоне — 14 видов диатомовых [12]. При сравнении видового состава диатомовых в акваториях г. Порт-Саид и крымского побережья Азовского моря (с учётом указанных в табл. 1) выявлено 22 общих индикаторных вида, из которых 12 являются бетамезосапробионтами, 4 — олигосапробионтами, по 2 — альфамезосапробионтами, альфа-олигосапробионтами и бета-альфамезосапробионтами.

Японское море. Примером оценки качества вод водоёмов с использованием индикаторных видов микроводорослей является анализ микрофитобентоса приустьевое участка р. Рудная, впадающей в Японское море, который подвержен влиянию выносов загрязнений, связанных с производством концентратов полиметаллов и боратов [19, 20]. Видовой состав здесь представлен индикаторами широкой амплитуды значений групп сапробионности с преобладанием бета- и бета-альфамезосапробионтов [20].

Использование донных диатомовых водорослей для биоиндикации органического загрязнения прибрежных вод известно и для российских вод Японского моря. В частности, в сравнительных целях проведены исследования в экстремально загрязнённой б. Золотой Рог и в относительно чистой б. Рында [2, 13]. Обнаружено 94 вида и внутривидовых таксона диатомовых; из них в б. Золотой Рог отмечено 45 видов, в б. Рында — 60. Для акваторий указанных бухт выявлена группа из 31 вида — индикатора органического загрязнения вод; из неё 15 видов являются общими с видами из списка микроводорослей крымского побережья Азовского моря. В б. Золотой Рог доминировали альфа- и бетамезосапробионты, а в б. Рында — бетамезосапробионты. Также в б. Рында отмечены олиго- и ксено-олигосапробионты, которые не были зарегистрированы в б. Золотой Рог.

Таким образом, результаты анализа данных по индикаторным видам микроводорослей из различных экотопов показали, что в более загрязнённых регионах Азовского, Средиземного и Японского морей доминировали альфа- и бетамезосапробионты. Полученные значительные величины индекса сапробионности, соответствующие III и IV классам качества вод, свидетельствуют о влиянии на морские экосистемы загрязнителей различных типов, поступающих в акватории из крупных портов и промышленных объектов.

Заключение. Биоиндикация органического загрязнения вод в различных экотопах (эпифитон, эпицитон и рыхлые грунты) изученных районов крымского побережья Азовского моря, проведённая на основе анализа 78 видов микроводорослей-сапробионтов, которые относятся к цианобактериям (13 таксонов) и диатомеям (65 таксонов), выявила преобладание бетамезосапробной группы водорослей, являющихся индикаторами III класса качества вод и характеризующих умеренную степень загрязнения. Видовой состав водорослей-сапробионтов микрофитобентоса Азовского моря и их экологические характеристики по отношению к солёности, органическому загрязнению вод и характеру субстрата могут служить важными мониторинговыми и прогностическими показателями при оценке качества вод.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (№ гос. регистрации АААА-А18-118021350003-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баринава 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. *Biodiversity of algae – indicators of the environment*. Tel Aviv, 2006, 498 p. (in Russ.)]
2. Бегун А. А., Рябушко Л. И., Звягинцев А. Ю. Bacillariophyta перифитона экспериментальных пластин в бухте Золотой Рог (российское побережье Японского моря) в условиях антропогенного загрязнения // *Альгология*. 2010. Т. 20, № 4. С. 449–470. [Begun A. A., Ryabushko L. I., Zvyagintsev A. Yu. Bacillariophyta of the periphyton of experimental plates of the Gold Horn Bay of the Sea of Japan (Russia) in the conditions of the anthropogenic contamination. *Al'gologiya*, 2010, vol. 20, no. 4, pp. 449–470. (in Russ.)]
3. Бондаренко А. В. *Микроводоросли бентоса крымского побережья Азовского моря* : дис. ... канд. биол. наук : 03.02.10 – гидробиология. Севастополь, 2017. 176 с. [Bondarenko A. V. *Mikrovodorosli bentosa krymskogo pribrezh'ya Azovskogo morya*. [dissertation]. Sevastopol, 2017, 176 p. (in Russ.)]
4. Борисюк М. В. К изучению Bacillariophyta перифитона Азовского моря // *Учёные записки Таврического национального университета. Серия: Биология*. Симферополь, 2001. Т. 14, № 1. С. 37–40. [Borisjuk M. V. K izucheniyu Bacillariophyta perifitona Azovskogo morya. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta. Seriya: Biologiya*, 2001, vol. 14, no. 1, pp. 37–40. (in Russ.)]
5. Борисюк М. В. Видовой состав фитоперифитона Таганрогского залива Азовского моря // *Альгология*. 2002. Т. 12, № 4. С. 408–420. [Borisjuk M. V. Species composition of phytoperephyton of the Sea of Azov. *Al'gologiya*, 2002, vol. 12, no. 4, pp. 408–420. (in Russ.)]
6. Голлербах М. М., Косинская В. И., Полянский Е. К. *Определитель пресноводных водорослей СССР*. Вып. 2: *Синезелёные водоросли*. Москва: Советская наука, 1953. 651 с. [Gollerbach M. M., Kosinskaya V. I., Polyanskiy E. K. *Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei SSSR. Iss. 2: Sinezelenye vodorosli*. Moscow: Sovetskaya nauka, 1953, 651 p. (in Russ.)]
7. Ковалёва Г. В. *Микроводоросли бентоса, перифитона и планктона прибрежной части Азовского моря* : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.05 – ботаника. Санкт-Петербург, 2006. 19 с. [Kovaleva G. V. *Mikrovodorosli bentosa, perifitona i planktona pribrezhnoi chasti Azovskogo morya* : avtoref. dis. ... kand. biol. nauk : 03.00.05. Saint Petersburg, 2006, 19 p. (in Russ.)]
8. Ковалёва Г. В. Систематический список микроводорослей бентоса и планктона прибрежной части Азовского моря и прилегающих водоемов // *Современные проблемы альгологии* : материалы Междунар. науч. конф. и VII Школы по морской биологии, Ростов-на-Дону, 9–13 июня 2008 г. Ростов-на-Дону, 2008. С. 174–192. [Kovaleva G. V. Sistematicheskii spisok mikrovodoroslei bentosa i planktona pribrezhnoi chasti Azovskogo morya i prilgayushchikh vodoemov. In: *Sovremennye problemy al'gologii* : materialy Mezhdunar. nauch. konf. i VII Shkoly po morskoj biologii, Rostov-on-Don, 9–13 June, 2008. Rostov-on-Don, 2008, pp. 174–192. (in Russ.)]

9. Парталы Е. М. *Экология гидроида Garveia franciscana (Torrey) в Азовском море*. Мариуполь : Новый мир, 2006. 184 с. [Partaly E. M. *Ekologiya gidroida Garveia franciscana (Torrey) v Azovskom more*. Mariupol': Novyi Mir, 2006, 184 p. (in Russ.)]
10. Пицык Г. К. О качественном составе фитопланктона Азовского моря // *Труды Севастопольской биологической станции*. 1963. Т. 16. С. 71–89. [Pitsyk G. K. O kachestvennom sostave fitoplanktona Azovskogo morya. *Trudy Sevastopol'skoi biologicheskoi stantsii*, 1963, vol. 16, pp. 71–89. (in Russ.)]
11. Прошкина-Лавренко А. И. *Диатомовые водоросли планктона Азовского моря*. Москва ; Ленинград : АН СССР, 1963. 190 с. [Proshkina-Lavrenko A. I. *Diatomovye vodorosli planktona Azovskogo morya*. Moscow ; Leningrad: AN SSSR, 1963, 190 p. (in Russ.)]
12. Рябушко Л. И. *Микрофитобентос Чёрного моря*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. 416 с. [Ryabushko L. I. *Microphytobenthos of the Black Sea*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2013, 416 p. (in Russ.)]
13. Рябушко Л. И., Бегун А. А. *Диатомовые водоросли микрофитобентоса Японского моря : в 2-х т.* Севастополь ; Симферополь : Н. Орианда, 2015. Т. 1. 288 с. [Ryabushko L. I., Begun A. A. *Diatoms of microphytobenthos of the Sea of Japan : in 2 vols*. Sevastopol ; Simferopol: N. Orianda, 2015, vol. 1, 288 p. (in Russ.)]
14. Рябушко Л. И., Бегун А. А. *Диатомовые водоросли микрофитобентоса Японского моря (сводный список и атлас) : в 2-х т.* Севастополь : ПК «КИА», 2016. Т. 2. 324 с. [Ryabushko L. I., Begun A. A. *Diatoms of microphytobenthos of the Sea of Japan (synopsis and atlas) : in 2 vols*. Sevastopol: PK «KIA», 2016, vol. 2, 324 p. (in Russ.)]
15. Рябушко Л. И., Бондаренко А. В. *Микроводоросли планктона и бентоса Азовского моря (чек-лист, синонимика, комментарий) / под ред. А. В. Гаевской*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 211 с. [Ryabushko L. I., Bondarenko A. V. *Microalgae of the plankton and benthos of the Sea of Azov (check-list, synonyms, comment) / A. V. Gaevskaya (Ed.)*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2011, 211 p. (in Russ.)]
16. Садогурская С. А., Садогурский С. Е., Белич Т. В. Аннотированный список фитобентоса Казантипского природного заповедника // *Труды Никитского ботанического сада – Национального научного центра*. 2006. Т. 126. С. 190–208. [Sadogurskaya S. A., Sadogursky S. E., Belich T. V. Annotated list of phytobenthos of the Kazantip Nature Reserve. *Trudy Nikitskogo botanicheskogo sada – Natsional'nogo nauchnogo tsentra*, 2006, vol. 126, pp. 190–208. (in Russ.)]
17. Фуштей Т. В. К видовому составу фитопланктона лиманов Восточного Приазовья и Тамани // *Экосистемные исследования Азовского моря и побережья*. 2002. Т. 4. С. 219–235. [Fushtey T. V. K vidovomu sostavu fitoplanktona limanov Vostochnogo Priazov'ya i Tamani. *Ekosistemnye issledovaniya Azovskogo morya i poberezh'ya*, 2002, vol. 4, pp. 219–235. (in Russ.)]
18. Barinova S. *Algal Diversity Dynamics, Ecological Assessment, and Monitoring in the River Ecosystems of the Eastern Mediterranean*. New York: Nova Science Publishers, 2011, 363 p.
19. Barinova S. S., Anissimova O. V., Nevo E., Jarygin M. M., Wasser S. P. Diversity and ecology of algae from Nahal Qishon River, Northern Israel. *Plant Biosystems – An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 2004, vol. 138, iss. 3, pp. 245–259. <http://doi.org/10.1080/11263500400006985>
20. Barinova S. S., Medvedeva L. A., Nevo E. Regional influences on algal biodiversity in two polluted rivers of Eurasia (Rudnaya River, Russia, and Qishon River, Israel) by bio-indication and Canonical Correspondence Analysis (CCA). *Applied Ecology and Environmental Research*, 2008, vol. 6, iss. 4, pp. 29–59. https://doi.org/10.15666/aeer/0604_029059
21. Cleve-Euler A. *Die Diatomeen von Schweden und Finnland*. Stockholm: Almqvist & Wiksells Boktryckeri AB, 1953, teil 2, bd 4, no. 1, 158 p.
22. Cleve-Euler A. *Die Diatomeen von Schweden und Finnland*. Stockholm: Almqvist & Wiksells Boktryckeri AB, 1953, teil 3, 254 p.
23. Ryabushko L. I., Bondarenko A. V. The qualitative and quantitative characteristics of the benthic diatoms near Kazantip Cape of the Sea of Azov. *Journal of the Black Sea / Mediterranean Environment*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 237–249.
24. Sládeček V. Diatoms as indicators of organic pollution. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 1986, vol. 14, iss. 5, pp. 555–566. <https://doi.org/10.1002/ahch.19860140519>
25. Zalat A. A. Distribution and origin of diatoms in the bottom sediments of the Suez Canal lakes and adjacent areas, Egypt. *Diatom Research*, 2002, vol. 17, iss. 1, pp. 243–266. <https://doi.org/10.1080/0269249X.2002.9705542>

**INDICATOR BENTHIC MICROALGAE
IN ASSESSMENT OF THE DEGREE OF ORGANIC WATER POLLUTION
ON THE EXAMPLE OF CRIMEAN COASTAL WATERS OF THE SEA OF AZOV**

L. I. Ryabushko¹, A. V. Bondarenko¹, and S. S. Barinova²

¹A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation

²Institute of Evolution, University of Haifa, Haifa, Israel

E-mail: larisa.ryabushko@yandex.ua

Data of the study of microphytobenthos of Crimean coastal waters of the Sea of Azov during 2005–2006, 2008–2011 and 2014 at 17 stations in the Sivash Gulf (East and West), Kamysh-Burunskaya Bay (Kerch) and bays of Kazantip Cape are given. Totally 200 taxa of microalgae belonging to 77 genera were found. Of these, 78 species – saprobity indicators, related to cyanobacteria (17 %) and diatoms (83 %), from 39 genera, for which bioindicative characteristics of organic water pollution are known, are used for the analysis of different ecotopes and regions. A leading place in microalgae flora belongs to a group of betame-sosaprobionts (31 species) – indicators of moderate organic pollution, or of the III class of water quality with index of saprobity $S = 2.0$. The second place belongs to a group of oligosaprobionts (10 species), or of the II class of water quality, which is typical for natural clean waters with $S = 1.0$. According to the indicator of microalgae, there are no negative changes in the water quality in the regions. This indicates that anthropogenic impacts do not exceed the self-restoring potential of marine ecosystems. However, the presence of the IV class of water quality indicators (17–21 %) in benthic communities indicates a constant flow of organic substances, which are gradually utilized by the living component of coastal ecosystems. The comparative data of the ratio of the Sea of Azov indicator microalgae species with those of other seas of moderate latitudes are discussed.

Keywords: microalgae, microphytobenthos, saprobity, class of water quality, Crimea, Sea of Azov