

Подвержены ли биообрастанию синтетические медицинские маски в морской воде?

А. В. Бондаренко *, Л. И. Рябушко, А. А. Благинина

¹ ФГБУН ФИЦ Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН,
Севастополь, Россия

* e-mail: gonzurassa@mail.ru

Аннотация

Впервые представлены результаты экспериментального изучения видового состава и количественных характеристик (обилие видов, численность и биомасса) микроводорослей и цианобактерий в обрастании синтетических медицинских масок в качестве техногенного субстрата. В 2021–2022 гг. в б. Карантинной (Черное море) были проведены эксперименты по обрастанию в течение двух месяцев и одного года. Поверхность масок и суспензии микрообрастаний изучали с использованием световой и электронной микроскопии. Всего обнаружено 48 таксонов из 5 отделов: Cyanoprocyota – 3 вида, Bacillariophyta – 36 видов, Dinophyta – 6 видов, Naptophyta – 2 вида, Ochrophyta – 1 вид. При двухмесячной экспозиции масок найдено 30 видов, при годичной – 40, при этом 22 вида были общими. Впервые для бухты нами указаны бентосные виды диатомовых водорослей *Cocconeis guttata* и *Karayevia amoena*. Из 14 пеннатных типичных колониальных видов-обрастателей диатомовых водорослей на всех масках со 100%-ной встречаемостью отмечен вид *Tabularia fasciculata*, среди одиночноживущих видов часто отмечались потенциально токсичный *Nalamphora coffeiformis* и бентопланктонный *Cylindrotheca closterium*. Особенностью обрастания является отсутствие образования колоний диатомовых водорослей, в отличие от обрастания на других антропогенных и природных субстратах, и низкие количественные показатели при разных сроках экспозиции – при двухмесячной соответствующие значения составляли: обилие видов – 10–15 видов, численность – 9200–13 100 кл./см² и биомасса – 0.001–0.02 мг/см²; при годичной – обилие видов – 8–14 видов, численность – 4900–8400 кл./см², биомасса – 0.01–0.03 мг/см².

Ключевые слова: диатомовые водоросли, цианобактерии, микроводоросли, обрастание, синтетические медицинские маски, крымское побережье, Черное море

Благодарности: работа выполнена по теме государственного задания ФИЦ ИнБИОМ РАН «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (номер гос. регистрации 121030300149-0). Выражаем благодарность гл. н. с., д. б. н. В. И. Рябушко за идею изучения и поддержку, С. В. Щурову – за отбор проб и гидрологические измерения, В. Н. Лишаеву – за обработку материала в СЭМ.

© Бондаренко А. В., Рябушко Л. И., Благинина А. А., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Бондаренко А. В., Рябушко Л. И., Благинина А. А. Подвержены ли биообрастанию синтетические медицинские маски в морской воде? // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 3. С. 114–128. EDN MYZVXK.

Are Polymer-Based Single-Use Face Masks Subject to Biofouling in Seawater?

A. V. Bondarenko *, L. I. Ryabushko, A. A. Blaginina

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

* *e-mail: gonzurassa@mail.ru*

Abstract

The paper presents for the first time the results of an experimental study of the species composition and quantitative characteristics: species richness (S), abundance (N) and biomass (B) of the microalgae and cyanobacteria in the fouling of synthetic single-use face masks as a technogenic substrate. Fouling experiments were conducted for two months and for one year in 2021–2022 in Karantinnaya Bay (the Black Sea). The surface of masks and microfouling suspensions were studied using light and electron microscopy. In total, 48 taxa from 5 phyla were noted: Cyanoprocarota – 3 species, Bacillariophyta – 36, Dinophyta – 6, Haptophyta – 2, Ochrophyta – 1. After a two-month exposure of masks, 30 species were found, and 40 species were found after a one-year exposure, 22 species were shared. For the first time for the bay, we have identified benthic species of diatoms *Cocconeis guttata* and *Karayevia amoena*. Out of 14 benthic typical colonial fouling species of diatoms, *Tabularia fasciculata* was on all masks with 100 % occurrence. Solitary-living species were also recorded among the frequently encountered ones: potentially toxic *Halamphora coffeiformis* and bentoplanktonic *Cylindrotheca closterium*. The features of the mask fouling at different exposure periods in the sea are the absence of the formation of diatoms colonies, unlike fouling on other anthropogenic and natural substrates, and low quantitative characteristics at different periods: after a two-month exposure, the corresponding values were: S – 10–15 species, N – 9200–13100 cells/cm², and B – 0.001–0.02 mg/cm²; after a one-year exposure, the same were: S – 8–14 species, N – 4900–8400 cells/cm², B – 0.01–0.03 mg/cm².

Keywords: diatoms, cyanobacteria, microalgae, fouling, single-use face masks, Crimea, coastal waters, Black Sea

Acknowledgements: The work was performed under state assignment of IBSS of RAS “Research of control mechanisms for production processes in biotechnological complexes with the aim of developing scientific foundations for obtaining biologically active substances and technical products of marine genesis”, state registration no. 121030300149-0. We would like to express our gratitude to Chief Research Associate, Dr.Sci. (Biol.), V. I. Ryabushko for the idea of studying and support, to S. V. Shchurov for sampling and hydrological indicators, and to V. N. Lishaev for processing the material in the SEM.

For citation: Bondarenko, A.V., Ryabushko, L.I. and Blaginina, A.A., 2023. Are Polymer-Based Single-Use Face Masks Subject to Biofouling in Seawater? *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 114–128.

Введение

Пластисфера Мирового океана составляет 8–12 млн т отходов, а в последние годы в связи с охватившей весь мир пандемией *COVID-19* к разнообразным техногенным отходам, поступающим в морские экосистемы и накапливающимся в них, прибавились одноразовые трехслойные медицинские маски. Используя ежегодную оценку мирового производства в 52 млрд масок, исследователи подсчитали, что в 2020 г. в Мировой океан поступило 1.56 млрд масок (рис. 1), что составляет от 4680 до 6240 т пластикового загрязнения [1].

Как и любой другой вид твердых техногенных отходов, попадающих в морские экосистемы, медицинские маски являются дополнительным антропогенным субстратом для заселения различными организмами, преимущественно микро- и мейобентосными формами. К наиболее изученным нетипичным для естественной среды обитания гидробионтов в море относятся субстраты антропогенного происхождения (стеклянные, деревянные, пластиковые, синтетические полимерные материалы и др.), которые заселяются в основном бактериями, диатомовыми¹⁾ и цианобактериями и по-разному участвуют в преобразовании субстрата и частичной его утилизации в море [2–12].

Было также отмечено, что бактерии, грибы, цианобактерии и главным образом диатомовые водоросли создают устойчивые биопленки на пластиковых и стеклянных материалах, впоследствии конкурируя за субстрат¹⁾ с беспозвоночными и макрофитами [5, 13].

Как субстрат трехслойная медицинская маска представляет собой совокупность синтетических волокон, формирующих текстильное полотно. Для изготовления таких масок используются различные нетканые материалы, чаще всего спанбонд, преимущественно на основе полипропиленовых волокон. Спанбонд – это микропористый материал, стойкий к действию агрессивных сред и воды, а также высоких и низких температур, обладающий высокой прочностью, не гниющий и не плесневеющий. Указано, что в окружающей среде этот материал не способен образовывать токсичные соединения, и это определяет его экологическую безопасность [14].

Однако полимерное происхождение материала одноразовых медицинских масок обуславливает процесс их длительной деградации в естественных условиях в море.



Рис. 1. Использованные медицинские маски, выброшенные из воды на побережье (URL: <https://oceansasia.org>)

Fig. 1. Used polymer-based single-use face masks washed up on the coast (URL: <https://oceansasia.org>)

¹⁾ Балычева Д. С. Видовой состав и структурно-функциональные характеристики микроводорослей перифитона антропогенных субстратов в крымском побережье Чёрного моря : автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Севастополь, 2014. 24 с.

При этом разрушение синтетического полотна происходит почти сразу после попадания в водную среду и сопровождается постепенным высвобождением микроскопических полипропиленовых волокон, которые способны поглощать органические и неорганические загрязнители, что приводит к токсичности микропластика [12]. Следовательно, маски становятся потенциальным источником микропластикового загрязнения морских экосистем с известным негативным влиянием на разнообразные сообщества гидробионтов – от микроформ животных и растений до самых крупных представителей живого мира [12, 15–18].

Следует также учитывать, что плотность полипропилена (0.91 г/см^3) меньше плотности воды (0.99 г/см^3), а внешний слой медицинских масок обладает водонепроницаемыми свойствами, поэтому такие средства индивидуальной защиты могут длительное время перемещаться течениями в толще морей и океанов. Виды, заселившие поверхность этого субстрата в одном районе, могут быть перенесены на значительные расстояния и стать инвазивными в новых акваториях. Кроме того, био пленки, сформировавшиеся в толще воды на искусственных полимерных субстратах, могут привести к потере плавучести этих материалов и их последующему захоронению в донных осадках, т. е. переходу из одного биотопа в другой. Все это указывает на глобальный масштаб проблемы загрязнения морской среды пластиком и актуальность изучения физико-химических и биологических процессов в пластисфере. Черное море является внутренним водоемом, что весьма затрудняет защиту его биоты от загрязнения, особенно пластиковыми отходами.

В связи с вышесказанным, а также из-за отсутствия в литературе данных о биодеградации медицинских масок, попавших в море, возникает вопрос, заселяются ли вообще эти синтетические материалы и происходят ли процессы их биодеградации под воздействием микроводорослей и цианобактерий при разных сроках экспозиции в море.

Целью настоящей статьи является экспериментальное исследование видового состава и количественных характеристик микроводорослей и цианобактерий в обрастании синтетических медицинских масок при разных сроках экспозиции в б. Карантинной (Черное море).

Материалы и методы

Для изучения видового состава, численности и биомассы микроводорослей и цианобактерий обрастания медицинских масок в море, а также для визуальной оценки целостности синтетического материала после разных сроков пребывания в морской воде был поставлен следующий эксперимент. Вертикальный коллектор, представляющий собой зафиксированные на канате с бумом и якорем перфорированные пластиковые емкости с закрепленными в них масками, был установлен в районе марихозайства по выращиванию мидий и устриц в районе б. Карантинной ($44^{\circ}61'83'' \text{ с. ш.}, 33^{\circ}50'34'' \text{ в. д.}$) (крымское побережье Черного моря). Отверстия в стенках емкостей обусловили постоянное поступление внутрь морской воды с обитающими в ней микро- и мейоорганизмами. Глубина расположения емкостей составляла 3 м. На этой же глубине был закреплен герметично закрытый цилиндр с масками в стерильной морской воде, которые, соответственно, не подвергались воздействию

биотического фактора при сохранении воздействия ряда абиотических: температуры, солености, освещенности, гидродинамики и др.

Часть экспериментальных масок была извлечена через два месяца (с 05.10.2021 по 10.12.2021) и через год (с 05.10.2021 по 09.11.2022) после погружения в море. Оставшиеся на коллекторе маски являются предметом последующего изучения процессов обрастания и наблюдения деградации синтетического материала при еще более длительной экспозиции.

При двухмесячной экспозиции материала температура воды варьировала в пределах 12.8–19.6 °С, соленость составляла 17.84–18.07 ЕПС. Во время годичной экспозиции температура воды имела положительные значения с минимумом в феврале 2022 г. (8 °С) и максимумом в августе (26.1 °С), соленость воды изменялась в пределах 17.84–18.52 ЕПС.

В лаборатории маски очищали от обрастания. Изучение качественных и количественных характеристик микроводорослей и цианобактерий на поверхностях масок и в полученных суспензиях проводили в световых микроскопах (СМ) типа *OlympusCX31* и *Axioskop 40 (C. Zeiss)* при увеличении 10 × 20, 10 × 40 и 10 × 100. Для детального исследования морфологии клеток и идентификации видовой принадлежности диатомовых водорослей осуществляли пробоподготовку для исследования в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) типа *HitachiSU3500*. Образцы готовили двумя способами. В первом случае волокна и поры на поверхности медицинских масок изучали без обработки материала кислотами. В пяти точках полотна масок произвольно выбирали и вырезали квадраты размером 0.5 × 0.5 см, оставляли их до полного высыхания на воздухе, а затем напыляли тонкий слой золота – палладия. Второй способ заключался в обработке полученных суспензий кислотами по методикам [19, 20] для очистки панцирей диатомовых водорослей и получении их фотоснимков, что необходимо при идентификации видов.

Определение видового состава микроводорослей и цианобактерий выполнено с использованием монографии [21] и ряда работ ^{2)–6)}. Названия приведены в соответствии с базой данных водорослей ⁷⁾. Учет обилия видов (*S*), численности (*N*) и биомассы (*B*) живых клеток микроводорослей проводили в камере Горяева объемом 0.9 мм³ по формулам В. И. Рябушко [22], при этом обилие видов определяли как число видов, обнаруженных в счетной камере при просмотре проб с каждого конкретного образца экспериментального материала.

²⁾ Гуляков Н. Е., Загордонец О. А., Герасимюк В. П. Атлас диатомовых водорослей бентоса северо-западной части Черного моря и прилегающих водоемов. Киев : Наукова думка, 1992. 112 с.

³⁾ Коновалова Г. В. Динофлагелляты дальневосточных морей России и сопредельных акваторий Тихого океана. Владивосток : Дальнаука, 1998. 298 с.

⁴⁾ Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. 1 Teil : Chroococcales. Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 1999. 523 p. (Süßwasserflora von Mitteleuropa ; 19/1).

⁵⁾ Witkowski A., Lange-Bertalot H., Metzeltin D. Diatom flora of marine coast. Part I. IconographiaDiatomologica. A.R.G. Gantner, 2000. Vol. 7. 925 p.

⁶⁾ Рябушко Л. И., Бегун А. А. Диатомовые водоросли микрофитобентоса Японского моря (Синописис и Атлас). В 2 т. Т. 2. Севастополь : ПК «КИА», 2016. Т. 2. 324 с.

⁷⁾ URL: <https://www.algaebase.org> (дата обращения: 31.08.2023).

Результаты и обсуждение

Визуальный анализ образцов поверхности медицинских масок за период двухмесячной и годичной экспозиции в б. Карантинной вблизи марихозьяства по выращиванию мидий и устриц с использованием СМ и СЭМ показал, что все слои трехслойных масок были насыщены детритом, илисто-песчаными фракциями, молодью баянусов, обломками раковин моллюсков и др. (рис. 2). Особенно выраженный осадок наблюдали на масках годичной экспозиции, на которых отмечено большее количество детрита (рис. 2, *b*).

Изучение внешнего и внутреннего слоев медицинских масок двухмесячной экспозиции показало, что на волокнах и в порах синтетического материала отсутствуют прикрепленные клетки микроводорослей или их колонии (рис. 3, *a, b*). Обнаруженные в нашем эксперименте виды встречались по отдельности, они свободно лежали на полотне (рис. 3, *c*) или между волокнами.

Между тем многие авторы отмечают, что при образовании биопленок на поверхности разнообразных искусственных субстратов некоторые виды диатомовых водорослей родов *Cocconeis*, *Amphora*, *Achnanthes*, *Mastogloia*, *Karayevia* и др. способны прикрепляться непосредственно к синтетическому материалу [6, 11, 23]. Указана также способность отдельных диатомовых модифицировать структуру субстрата вследствие плотного прикрепления к его поверхности или даже внедрения в него [23, 24].

Всего в составе обрастания масок в разные сроки экспозиции отмечено 48 видов и внутривидовых таксонов (ввт) микроорганизмов, относящихся к 5 отделам: Суаногаргота – 3, Dinophyta – 6, Нартопфита – 2, Ochrophyta – 1, Bacillariophyta (представлен наибольшим разнообразием) – 36 видов и ввт, принадлежащих к 28 родам (таблица).

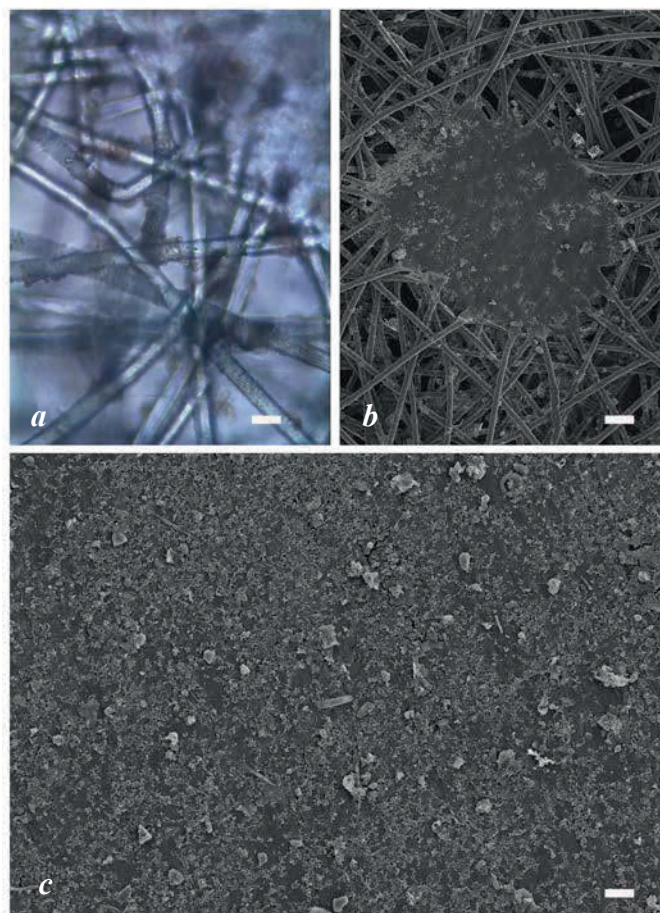
Анализ видовой структуры диатомовых водорослей показал, что основой их разнообразия является класс Bacillariohyseae (9 порядков, 16 семейств и 21 род), что характерно для микрофитобентоса Черного моря.

Обрастания масок после двухмесячной экспозиции представлены 30 видами, включающими 3 вида цианобактерий и 27 видов и ввт микроводорослей, из которых 20 принадлежат к отделу Bacillariophyta, 4 – к Dinophyta, 2 – к Нартопфита, 1 – к Ochrophyta (таблица).



Р и с . 2 . Световой микроскоп (СМ): мейобентосные обрастания поверхности медицинских масок при двухмесячной (*a*) и годичной (*b*) экспозиции в море

F i g . 2 . Light microscope (LM): meiofaunal fouling of the surface of face masks after a two-month (*a*) and one-year (*b*) exposure to the sea



Р и с . 3 . Внутренний слой медицинской маски двухмесячной экспозиции: СМ – полипропиленовые волокна (а); СЭМ – поры волокон (b); поверхность внутреннего слоя (с). Шкала: 1000 мкм (а), 100 мкм (b), 10 мкм (с)

Fig. 3. The inner layer of a face mask of a two-month exposure: LM – polypropylene fibers (a), scanning electron microscope (SEM) – fiber pores (b), 100 μm ; surface of the inner layer (c). Scalebar: 1000 μm (a), 100 μm (b), 10 μm (c)

Обрастания масок после годичной экспозиции под водой составляли 40 видов и ввт, из них к отделам Cyanoprocarota и Ochrophyta относятся по 1 виду, к Bacillariophyta – 32 вида, к Dinophyta – 4 вида, к Harpophyta – 2 вида (таблица). При разных сроках экспозиции 22 вида на поверхности масок были общими. Бентосные виды диатомовых *Cocconeis guttata* и *Karayevia amoena* впервые отмечены нами в б. Карантинной.

Большинство указанных микроводорослей обрастаний является типичными обитателями бентоса морей, жизнедеятельность которых тесно связана с разными типами субстратов. На долю бентосных видов приходится 67 %, планктонные формы составляют 20 %, бентопланктонные – 13 % (таблица).

Встречаемость видов микроводорослей и цианобактерий в обрастании медицинских масок за 2021–2022 гг. при разных сроках экспозиции в б. Карантинной (Крым, Черное море)

The occurrence of microalgae and cyanobacteria species in the fouling of single-use face masks for 2021–2022 at different exposure periods in Karantinnaya Bay (Crimea, the Black Sea)

Таксон / Taxon	Период экспозиции / Exposure period	
	Два месяца / Two months	Один год / One year
Отдел Bacillariophyta / Bacillariophyta phylum		
<i>Achnanthes brevipes</i> C. Agardh 1824 *	+	+
<i>Amphora ovalis</i> (Kützing) Kützing 1844 *	+	+
<i>A. pediculus</i> (Kützing) Grunow 1875 *	+	+
<i>Ardissonea crystallina</i> (C. Agardh) Grunow 1880 *	+	+
<i>Caloneis liber</i> (W. Smith) Cleve 1894 *	–	+
<i>Cerataulina pelagica</i> (Cleve) Hendey 1937 **	+	–
<i>Cocconeis guttata</i> Hustedt et Aleem 1951 *	–	+
<i>C. placentula</i> Ehrenberg 1838 *	–	+
<i>C. scutellum</i> Ehrenberg 1838 *	–	+
<i>Coscinodiscus</i> sp. **	+	+
<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenberg) Reimann et Lewin 1964 ***	+	+
<i>Grammatophora marina</i> (Lyngbye) Kützing 1844 *	+	+
<i>Diploneis bombus</i> (Ehrenberg) Ehrenberg 1853 *	–	+
<i>D. smithii</i> (Brébisson) Cleve 1894 *	+	+
<i>Halamphora coffeiformis</i> (C. Agardh) Levkov 2009 *	+	+
<i>Haslea subagnita</i> (Proschkina-Lavrenko) Makarova et Karayeva 1985 *	+	–
<i>Karayevia amoena</i> (Hustedt) Bukhtiyarova 1999 *	–	+
<i>Licmophora abbreviata</i> C. Agardh 1831 *	–	+
<i>Lyrella abrupta</i> (W. Gregory) D.G. Mann 1990 *	–	+
<i>Navicula ammophila</i> var. <i>intermedia</i> Grunow 1882 *	+	+
<i>Neosynedra provincialis</i> (Grunow) D.M. Williams et Round 1986 *	–	+
<i>Nitzschia lanceolata</i> var. <i>minor</i> (Grunow) H. Peragallo et M. Peragallo 1900 *	–	+
<i>N. sigma</i> (Kützing) W. Smith 1853 *	–	+
<i>Odontella aurita</i> (Lyngbye) C. Agardh 1832 ***	–	+
<i>Paralia sulcata</i> (Ehrenberg) Cleve 1873 ***	+	–
<i>Parlibellus delognei</i> (Van Heurck) E.J. Cox 1988 *	+	+
<i>Rhabdonema arcuatum</i> (Lyngbye) Kützing 1844 *	–	+
<i>Tabularia fasciculata</i> (C. Agardh) Williams et Round 1986 *	+	+

Продолжение таблицы / Continued

Таксон / Taxon	Период экспозиции / Exposure period	
	Два месяца / Two months	Один год / One year
<i>T. parva</i> (Kützing) D.M. Williams et Round 1986 *	+	+
<i>Toxarium undulatum</i> Bailey 1854 *	–	+
<i>Trachyneis aspera</i> (Ehrenberg) Cleve 1894 *	–	+
<i>Tryblionella coarctata</i> (Grunow) D.G. Mann 1990 *	–	+
<i>T. hungarica</i> (Grunow) Frenguelli 1942 *	+	–
<i>T. punctata</i> W. Smith 1853 *	+	+
<i>Thalassionema nitzschioides</i> (Grunow) Mereschkowsky 1902 ***	+	+
<i>Thalassiosira</i> sp. **	+	+
Отдел Dinophyta / Dinophyta phylum		
<i>Amphidinium</i> sp. **	+	+
<i>Prorocentrum compressum</i> (Bailey) Abé ex Dodge 1975 ***	+	–
<i>P. cordatum</i> (Ostenfeld) J.D. Dodge 1976 ***	–	+
<i>P. lima</i> (Ehrenberg) F. Stein 1878 *	–	+
<i>P. scutellum</i> Schröder 1900 **	+	+
<i>Protoperidinium brevipes</i> (Paulsen) Balech 1974 **	+	–
Отдел Haptophyta / Haptophyta phylum		
<i>Anacanthoica acanthos</i> (Schiller) Deflandre 1952 **	+	+
<i>Emiliana huxleyi</i> (Lohmann) W.W. Hay et H. Mohler 1967 **	+	+
Отдел Ochrophyta / Ochrophyta phylum		
<i>Octactis speculum</i> (Ehrenberg) F.H. Chang, J.M. Grieve et J.E. Sutherland 2017 **	+	+
Отдел Cyanoprocarvota/Cyanobacteria / Cyanoprocarvota/Cyanobacteria phylum		
<i>Microcystis wesenbergii</i> (Komárek) Komárek ex Komárek 2006 *	+	+
<i>Pseudanabaena minima</i> (G.S. An) Anagnostidis 2001 **	+	–
<i>Spirulina tenuissima</i> Kützing 1836 **	+	–
Всего таксонов: / Total taxa:	30	40

* – бентосные, ** – планктонные, *** – бентопланктонные виды.

* – benthic species; ** – planktonic species; *** – benthic-planktonic species.

Подобное соотношение близко к соотношению на других искусственных и природных субстратах, что описывается в работе¹⁾ и работах [4, 8, 9]. Наибольшим разнообразием характеризуются диатомовые родов *Cocconeis* и *Tryblionella*, включающие по три вида. Остальные представлены одним – двумя видами (таблица). Динофлагелляты рода *Prorocentrum* (4 вида) при двухмесячной и годичной экспозиции встречались по два и три вида соответственно. Эти водоросли, как и диатомовая *Halamphora coffeiformis*, относятся к потенциально токсичным видам для биоты и человека [25].

На поверхности масок обнаружены типичные колониальные бентосные виды-обрастатели – *Tabularia fasciculata*, *T. parva*, *Grammatophora marina*, *Achnanthes brevipes*, *Ardissonea crystallina*, *Parlibellus delognei*, из бентопланктонных видов – *Thalassionema nitzschioides*. Колониальные виды *Toxarium undulatum*, *Odontella aurita*, *Licmophora abbreviata*, *Rhabdonema arcuatum* найдены только при годичной экспозиции. А бентопланктонные *Cerataulina pelagica* и *Paralia sulcata* обнаружены только при двухмесячной экспозиции. Некоторые виды диатомовых водорослей представлены на снимках, сделанных с помощью СЭМ: *Cocconeis placentula* (a), *C. guttata* (b), *Th. nitzschioides* (c), *C. closterium* (d), *A. brevipes* (e), *A. pediculus* (f), *Karayevia amoena* (g), *Halamphora coffeiformis* (h) (рис. 4).

Максимальная (100 %) встречаемость принадлежит космополитному виду *T. fasciculata*. Другие виды *A. pediculus*, *C. closterium*, *Gr. marina*, *H. coffeiformis*, *Tabularia parva*, *Thalassiosira* sp., динофитовая *Prorocentrum scutellum* и гаптофитовая *Emiliania huxleyi* составляли 67 %, остальные виды – от 17 до 50 %.

Следует отметить, что по сравнению с другими искусственными субстратами, изученными нами ранее, медицинские маски двухмесячной и годичной экспозиции оказались наименее подверженными обрастанию. Так, в эксперименте по заселению организмами различных синтетических полимерных материалов в б. Карантинной в летне-осенний период 2018 г. было показано, что поверхности пластин густо заселяются разнообразными видами-обрастателями мейобентоса: мшанки, гидроиды, оболочники и др., а в составе микрофитообрастания зарегистрировано 94 вида, в том числе диатомовых (67) и цианобактерий (27) [8]. При этом 20 видов диатомовых, составляющих основу флористического разнообразия обрастания, являются общими для масок и разных синтетических полимерных субстратов.

На всех экспериментальных образцах изучаемых полимерных материалов постоянно встречались массовые колониальные виды *Gr. marina* и *Licmophora abbreviata*, несколько реже – *Tabularia tabulata* и *T. fasciculata*, которым свойственна адгезия к разным естественным и искусственным субстратам и формирование колоний, способных прикрепляться также к синтетическому материалу.

Для медицинских масок мы отметили сходную картину, однако из обнаруженных 14 колониальных видов-обрастателей микроводоросли были представлены в основном единично без образования колоний.

Кроме флористического изучения обрастаний на масках, несмотря на низкие количественные показатели, мы представили значения обилия (*S*), численности (*N*) и биомассы (*B*) обнаруженных видов с использованием счетной камеры. При двухмесячной экспозиции *S* варьировала в пределах

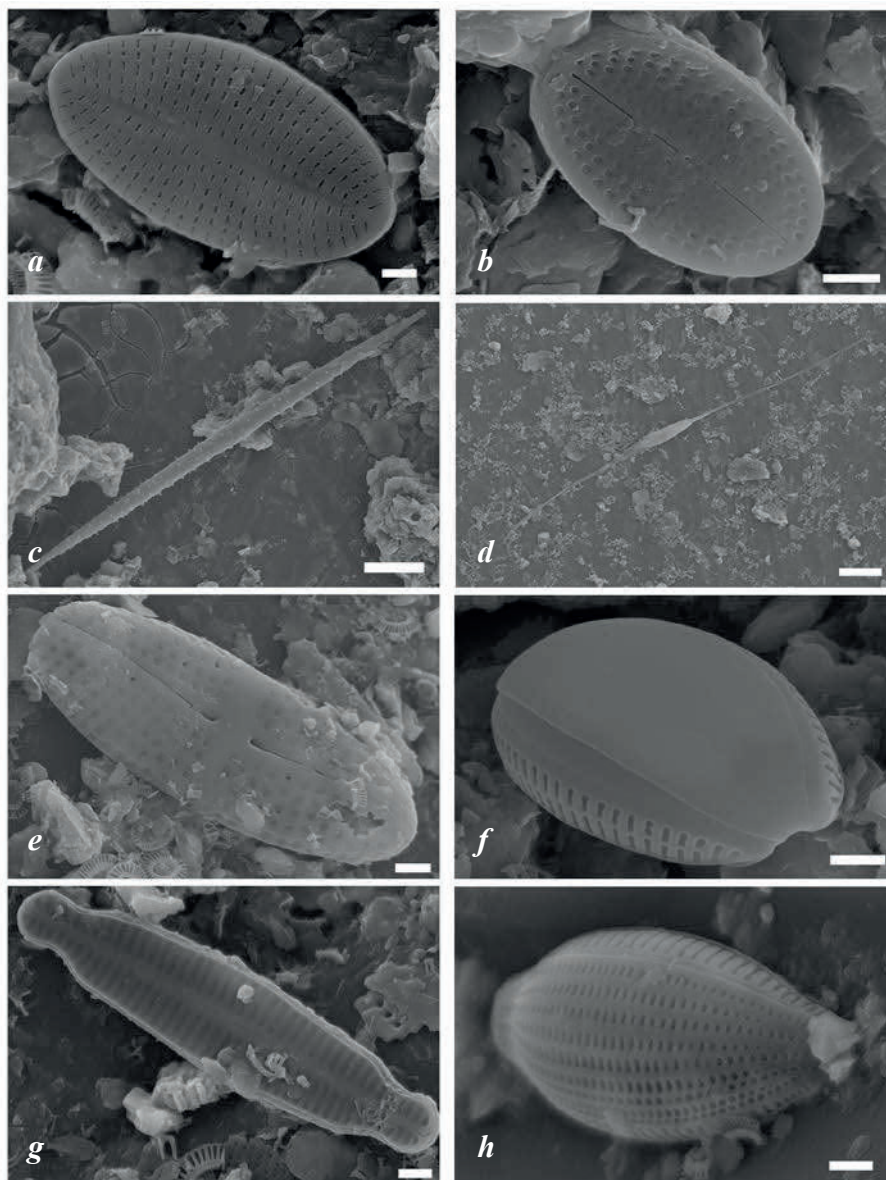


Рис. 4. Некоторые виды диатомовых водорослей в обрастании поверхности медицинских масок, СЭМ: *Cocconeis placentula* (a), *C. guttata* (b), *Thalassionema nitzschioides* (c), *Cylindrotheca closterium* (d), *Achnanthes brevipes* (e), *Amphora pediculus* (f), *Karayevia amoena* (g), *Halamphora coffeiformis* (h). Шкала: 1 мкм (a, f, g), 2 мкм (e, h), 10 мкм (b, c, d)

Fig. 4. Some diatoms in the fouling of single-use face masks surface, SEM: *Cocconeis placentula* (a), *C. guttata* (b), *Thalassionema nitzschioides* (c), *Cylindrotheca closterium* (d), *Achnanthes brevipes* (e), *Amphora pediculus* (f), *Karayevia amoena* (g), *Halamphora coffeiformis* (h). Scale bar: 1 μm (a, f, g), 2 μm (e, h), 10 μm (b, c, d)

10–15 видов, N – 9200–13 100 кл./см², B – 0.001–0.02 мг/см². При годичной экспозиции соответствующие данные составляли: S – 8–14 видов, N – 4900–8400 кл./см² и B – 0.01–0.03 мг/см².

Интересно сравнить наши сведения с данными, полученными при изучении микроводорослей перифитона экспериментальных стеклянных пластин, экспонированных в другой части этой же бухты с января 2007 по февраль 2008 г. в течение разных сроков (кратковременные от 4 до 20 сут; долговременные от 1 до 13 мес.) [4]. Уже на 20-е сутки на пластинах было замечено слабое обрастание диатомовыми, а затем и проростками макроводорослей с максимумом весной в конце годового пребывания в воде. Всего указано 99 видов и ввт микроводорослей: из отдела Bacillariophyta – 85, Dinophyta – 5, Chlorophyta – 4, Naptophyta – 2 и цианобактерии – 3. Общими для стеклянных пластин и масок оказались 17 видов диатомовых, 2 вида динофитовых и по одному виду гаптофитовых водорослей и цианобактерий. При накопительной экспозиции численность микроводорослей обрастания стеклянных пластин в течение года варьировала от 26 900 до 2 180 800 кл./см², биомасса изменялась в пределах 0.002–0.543 мг/см².

В работе [12] было показано, что микропластик, образующийся в результате деградации масок, выделяется в среду почти с первых часов пребывания в ней и способствует росту численности и видового разнообразия морского бактериального сообщества. Вероятно, маски становятся привлекательным субстратом для разнообразных авто- и гетеротрофных бактерий, которых мы не изучали.

Анализ собственных и литературных источников показал, что любые субстраты в море представляют собой объекты для заселения их микроорганизмами растительного и животного происхождения. Что касается микроводорослей, то из них наибольшим видовым разнообразием отличаются бентосные диатомовые. Их обилие и количественные характеристики часто зависят от типа субстрата, сезона года и экологических факторов среды обитания.

На масках б. Карантинной заселение микроводорослями и цианобактериями было слабее, чем на других антропогенных субстратах. Особенно это касается масок годичной экспозиции, которые подвергались наиболее длительным турбулентным возмущениям.

Заключение

За период исследования обнаружено 48 видов из 5 отделов: Cyanoprocarota – 3 вида, Bacillariophyta – 36, Dinophyta – 6, Naptophyta – 2, Ochrophyta – 1. При двухмесячной экспозиции обнаружено 30 видов, при годичной – 40, при этом 22 вида были общими. Впервые для бухты нами найдены бентосные виды диатомовых водорослей *Cocconeis guttata* и *Karayevia amoena*. Из 14 бентосных типичных колониальных видов-обрастателей диатомовых водорослей на поверхности масок максимальная частота встречаемости (100 %) отмечена у вида-космополита *Tabularia fasciculata*. Среди часто встречаемых зарегистрированы одиночноживущие виды *Halamphora coffeiformis* (потенциально токсичный вид) и бентопланктонный *Cylindrotheca closterium*.

Особенностью обрастания медицинских синтетических масок при разных сроках экспозиции в море является отсутствие образования колоний у типич-

ных видов-обработателей и наименьшие количественные показатели микроводорослей по сравнению с другими антропогенными и природными субстратами. При двухмесячной экспозиции выявлено обилие видов (S) – 10–15 видов, численность (N) – 9200–13100 кл./см² и биомасса (B) – 0.001–0.02 мг/см²; при годичной S – 8–14 видов, N – 4900–8400 кл./см², B – 0.01–0.03 мг/см².

Биодеградация медицинских масок, находящихся в морской воде в течение года под влиянием микроводорослей и цианобактерий, проявляется в слабой степени. Поэтому изучать этот процесс необходимо при более длительной экспозиции с учетом физико-химических факторов воздействия на синтетический субстрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Personal protective equipment (PPE) pollution associated with the COVID-19 pandemic along the coastline of Agadir, Morocco / M. B. Haddad [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 798. 149282. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149282
2. Рябушко Л. И., Завалко С. Е. Микрофитообрастания искусственных и природных субстратов в Черном море // *Ботанический журнал*. 1992. Т. 77, № 5. С. 33–39.
3. Бегун А. А., Рябушко Л. И., Звягинцев А. Ю. Влияние поверхности субстрата и времени его экспозиции в море на количественное развитие диатомовых водорослей перифитона // *Известия ТИНРО*. 2010. Т. 163. С. 240–263. EDN NTEXSR.
4. Рябушко Л. И. Микрофитобентос Черного моря / Под ред. А. В. Гаевской. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика. 2013. 416 с.
5. Рябушко Л. И., Бегун А. А. Диатомовые водоросли микрофитобентоса Японского моря. В 2-х т. Симферополь : Н. Орианда. 2015. 288 с.
6. Диатомовые обрастания синтетических полимерных материалов в Карантинной бухте (Крым, Черное море) / Л. И. Рябушко [и др.] // *Вопросы современной альгологии*. 2019. № 2. С. 87–91. EDN DBZQAN. doi:10.33624/2311-0147-2019-2(20)-87-91
7. Microbial ecotoxicology of marine plastic debris: a review on colonization and biodegradation by the “plastisphere” / J. Jacquin [et al.] // *Frontiers in Microbiology*. 2019. Vol. 10. P. 1–16. doi:10.3389/fmicb.2019.00865
8. Diatoms and Cyanobacteria of Periphyton of Experimental Synthetic Polymer Materials in Karantinnaya Bay in the Black Sea / L. I. Ryabushko [et al.] // *Inland Water Biology*. 2020. Vol. 13. P. 399–407. doi:10.1134/S1995082920020285
9. Diatom and cyanobacteria communities on artificial polymer substrates in the Crimean coastal waters of the Black Sea / L. Ryabushko [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 169. 112521. doi:10.1016/j.marpolbul.2021.112521
10. Başak E., Şentürk Y., Aytan Ü. Microbial biofilm on plastics in the southeastern Black Sea // *Marine litter in the Black Sea* / Edited by Ü. Aytan, M. Pogojeva, A. Simeonova. Istanbul : Turkish Marine Research Foundation, 2020. Iss. 56. P. 268–286. URL: https://tudav.org/wp-content/uploads/2020/10/MarineLitterintheBlackSea_tudav.pdf (date of access: 27.07.2023).
11. Sapozhnikov Ph., Snigirova A., Kalinina O. Microphytes assemblages on the neustoplantics from the northern Black Sea / Edited by Ü. Aytan, M. Pogojeva, A. Simeonova. Istanbul : Turkish Marine Research Foundation, 2020. Iss. 56. P. 287–302. URL: https://tudav.org/wp-content/uploads/2020/10/MarineLitterintheBlackSea_tudav.pdf (date of access: 27.07.2023).
12. Liao J., Ji S., Chi Y. Effects of discarded masks on the offshore microorganisms during the COVID-19 pandemic // *Toxics*. 2022. Vol. 10, iss. 8. 426. doi:10.3390/toxics10080426

13. Marine biofilms on artificial surfaces: structure and dynamics / Salta M. [et al.] // Environmental Microbiology. 2013. Vol. 15, iss. 11. P. 2879–2893. doi:10.1111/1462-2920.12186
14. Тимошин Н. М., Тимошина Ю. А. Нетканые материалы медицинского назначения // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 13. С. 123–125. EDN SNWYCP.
15. Aragaw T. A. Surgical face masks as a potential source for microplastic pollution in the COVID-19 scenario // Marine Pollution Bulletin. 2020. Vol. 159. 111517. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111517
16. Prevalence of microplastic contamination in the digestive tract of fishes from mangrove ecosystem in Cispatá, Colombian Caribbean / O. Garcés-Ordóñez [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2020. Vol. 154. 111085. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111085
17. Зайков К. С., Соболев Н. А. Загрязнение морским мусором западного сектора российской Арктики // Арктика и Север. 2021. № 43. С. 246–252. EDN BOPDHL. doi:10.37482/issn2221-2698.2021.43.246
18. De-la-Torre G. E., Aragaw T. A. What we need to know about PPE associated with the COVID-19 pandemic in the marine environment // Marine Pollution Bulletin. 2021. Vol. 163. 111879. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111879
19. Simonsen R. Untersuchungen zur Systematik und Oekologie der Bodendiatomeen der Westlichen Ostsee // Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie Beihefte. 1962. Vol. 1. P. 9–144.
20. Blaginina A., Ryabushko L. Finding of a rare species of diatom *Nanofrustulum siloi* (Lee, Reimer et Mcenery) Round, Hallsteinsen & Paasche, 1999 in the periphyton of the coastal waters of the Black Sea // International Journal on Algae. 2021. Vol. 23, iss. 3. P. 247–256. doi:10.1615/InterJAlgae.v23.i3.40
21. Прошкина-Лавренко А. И. Диатомовые водоросли бентоса Черного моря. М. ; Л. : Наука, 1963. 243 с.
22. Применение некоторых биоиндикаторов для оценки состояния импактных морских экосистем / В. И. Рябушко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. Вып. 2. С. 144–154. EDN XMRDLV.
23. Особенности формирования колониальных поселений морских бентосных диатомей на поверхности синтетического полимера / Ф. В. Сапожников [и др.] // Морской биологический журнал. 2020. Т. 5, № 2. С. 88–104. EDN EPDQXS. doi:10.21072/mbj.2020.05.2.08
24. Nature's neat nanostructuration: The fascinating frustules of diatom algae / A. M. Korsunsky [et al.] // Materials Today. 2019. Vol. 22. P. 159–160. doi:10.1016/j.mattod.2019.01.002
25. Рябушко Л. И. Потенциально опасные микроводоросли Азово-Черноморского бассейна / Под ред. В. И. Рябушко. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 288 с.

Поступила 04.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 25.05.2023 г.; принята к публикации 28.06.2023 г.; опубликована 25.09.2023 г.

Об авторах:

Бондаренко Анна Владимировна, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0003-2202-4014**, gonzurassa@mail.ru

Рябушко Лариса Ивановна, главный научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), доктор биологических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0443-9929**, larisa.rybushko@yandex.ru

Благинина Анастасия Андреевна, научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, Севастополь, пр. Нахимова, 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7115-4427**, aablagini@ibss-ras.ru

Заявленный вклад авторов:

Бондаренко Анна Владимировна – обработка материала и написание текста рукописи

Рябушко Лариса Ивановна – постановка цели и задач комплексного исследования, редактирование рукописи

Благинина Анастасия Андреевна – пробоподготовка образцов для получения иллюстраций в СЭМ

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.