



ISSN 2499-9768 print
ISSN 2499-9776 online

**МОРСКОЙ
БИОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**
MARINE BIOLOGICAL JOURNAL

Том 2 № 3

2017

МОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

реферировается Международной информационной системой по водным наукам и рыболовству

Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts (ASFA, ProQuest),

Всероссийским институтом научно-технической информации (ВИНИТИ),

а также Российским индексом научного цитирования (РИНЦ) на базе Научной электронной библиотеки *elibrary.ru* (НЭБ).

Материалы, подаваемые в «Морской биологический журнал», проходят независимое двойное рецензирование.

Редакционная коллегия

Главный редактор

Гулин С. Б., д. б. н., проф., ИМБИ РАН

Заместители главного редактора

Токарев Ю. Н., д. б. н., проф., ИМБИ РАН

Солдатов А. А., д. б. н., проф., ИМБИ РАН

Ответственный секретарь

Корнийчук Ю. М., к. б. н., ИМБИ РАН

Адрианов А. В., акад. РАН, д. б. н., проф.,
ИБМ ДВО РАН

Азовский А. И., д. б. н., проф., МГУ

Генкал С. И., д. б. н., проф., ИБВВ РАН

Егоров В. Н., акад. РАН, д. б. н., проф., ИМБИ РАН

Зуев Г. В., д. б. н., проф., ИМБИ РАН

Коновалов С. К., чл.-корр. РАН, д. г. н., МГИ РАН

Милячакова Н. А., к. б. н., ИМБИ РАН

Миронов О. Г., д. б. н., проф., ИМБИ РАН

Неврова Е. Л., д. б. н., ИМБИ РАН

Празукин А. В., д. б. н., ИМБИ РАН

Руднева И. И., д. б. н., проф., ИМБИ РАН

Рябушко В. И., д. б. н., ИМБИ РАН

Самышев Э. З., д. б. н., проф., ИМБИ РАН

Совга Е. Е., д. г. н., проф., МГИ РАН

Трапезников А. В., д. б. н., ИЭРиЖ УрО РАН

Финенко З. З., д. б. н., проф., ИМБИ РАН

Arvanitidis Chr., PhD (Marine Biol.), HCMR, Greece

Bat L., PhD (Marine Biol.), Prof., Sinop Univ., Turkey

Ben Souissi J., PhD (Env. Sc.), Prof., INAT, Tunis

Kociolek J. P., PhD (Marine Sc.), Prof., CU, USA

Magni P., PhD (Marine Sc.), IAMC-CNR, Italy

Moncheva S., PhD (Marine Biol.), Prof., IO BAS, Bulgaria

Pešić V., PhD, Prof., Univ. of Montenegro, Montenegro

Zaharia T., PhD (Ecology, Env. Sc.), NIMRD, Romania

Адрес редакции

Институт морских биологических исследований имени
А. О. Ковалевского РАН

пр. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Россия

Телефон: +7 (8692) 54-56-62

E-mail: mbj@imbr-ras.ru

Editorial Board

Editor-in-chief

Gulin S. B., D. Sc. (Biol.), Prof., IMBR RAS

Assistant editors

Tokarev Yu. N., D. Sc. (Biol.), Prof., IMBR RAS

Soldatov A. A., D. Sc. (Biol.), Prof., IMBR RAS

Executive secretary

Kornyychuk Yu. M., PhD (Biol.), IMBR RAS

Adrianov A. V., Acad. of RAS, D. Sc. (Biol.), Prof.,
IMBFEB RAS, Russia

Arvanitidis Chr., PhD (Marine Biol.), HCMR, Greece

Azovsky A. I., D. Sc. (Biol.), Prof., MSU, Russia

Bat L., PhD (Marine Biol.), Prof., Sinop Univ., Turkey

Ben Souissi J., PhD (Env. Sc.), Prof., INAT, Tunis

Egorov V. N., Acad. of RAS, D. Sc. (Biol.), Prof., IMBR RAS

Finenko Z. Z., D. Sc. (Biol.), Prof., IMBR RAS

Genkal S. I., D. Sc. (Biol.), Prof., IBIW RAS

Kociolek J. P., PhD (Marine Sc.), Prof., CU, USA

Kononov S. K., Corr. Member of RAS, D. Sc. (Geogr.),
Prof., MHI RAS

Magni P., PhD (Marine Sc.), IAMC-CNR, Italy

Milchakova N. A., PhD (Biol.), IMBR RAS

Mironov O. G., D. Sc. (Biol.), Prof., IMBR RAS

Moncheva S., PhD (Marine Biol.), Prof., IO BAS, Bulgaria

Nevrova E. L., D. Sc. (Biol.), IMBR RAS

Pešić V., PhD, Prof., Univ. of Montenegro, Montenegro

Prazukin A. V., D. Sc. (Biol.), IMBR RAS

Rudneva I. I., D. Sc. (Biol.), Prof., IMBR RAS

Ryabushko V. I., D. Sc. (Biol.), IMBR RAS

Samyshev E. Z., D. Sc. (Biol.), Prof., IMBR RAS

Sovga E. E., D. Sc. (Geogr.), Prof., MHI RAS

Trapeznikov A. V., D. Sc., IPAE RAS

Zaharia T., PhD (Ecology, Env. Sc.), NIMRD, Romania

Zuyev G. V., D. Sc. (Biol.), Prof., IMBR RAS

Address of the Editorial Office

Kovalevsky Institute of Marine Biological Research
Russian Academy of Sciences

Nakhimov avenue, 2, Sevastopol, 299011, Russian Federation

Tel.: +7 (8692) 54-56-62

E-mail: mbj@imbr-ras.ru

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ЗООЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНСТИТУТ МОРСКИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
им. А. О. КОВАЛЕВСКОГО

МОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

MARINE BIOLOGICAL JOURNAL

2017 Том 2 № 3

Основан в феврале 2016 г.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит 4 раза в год

СОДЕРЖАНИЕ

Научные сообщения

Болтачев А. Р., Карпова Е. П., Старцев А. В., Степаньян О. В.

Особенности количественного распределения рыб дельты Дона в тёплый сезон 2015 г. 3–11

Бондарев И. П., Ревков Н. К.

Консорты брюхоногого моллюска *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846)
в северной части Чёрного моря. Часть II: Mollusca (Polyplacophora, Bivalvia) 12–22

Празукин А. В., Фирсов Ю. К., Ли Р. И., Холодов В. В.

Формирование биообрастания в структурированном пространстве
искусственных рифовых конструкций 23–39

Раилкин А. И., Отвалко Ж. А., Коротков С. И., Фомин С. Е., Кулева Н. В.

Концепция экологически безопасной защиты от морского обрастания
и её разработка с использованием каучук-эпоксидных покрытий 40–52

Романова Д. Ю., Петров А. Н., Неврова Е. Л.

Действие сульфата меди на рост и морфологию клеток клоновых культур
четырёх видов бентосных диатомовых водорослей (Bacillariophyta) Чёрного моря 53–67

Рябушко В. И., Козинцев А. Ф., Тоичкин А. М.

Концентрация мышьяка в тканях культивируемой мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam.,
воде и донных осадках (Крым, Чёрное море) 68–74

Тихонова Е. А., Бурдиян Н. В., Соловьёва О. В.

Химико-микробиологическая характеристика вод и донных отложений
Керченского пролива и прилегающих акваторий 75–85

Хроника и информация

Неврова Е. Л.

XV Международная научная конференция «Диатомовые водоросли:
современное состояние и перспективы исследований» 86–88

Памяти Сергея Михайловича Игнатьева (04.03.1958–12.08.2017) 89–90

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
ZOOLOGICAL INSTITUTE
KOVALEVSKY INSTITUTE
OF MARINE BIOLOGICAL RESEARCH

МОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

MARINE BIOLOGICAL JOURNAL

2017 Vol. 2 no. 3

Established in February 2016

SCIENTIFIC JOURNAL

4 issues per year

CONTENTS

Scientific communications

Boltachev A. R., Karpova E. P., Startsev A. V., Stepanyan O. V.

Features of quantitative distribution of fish in the Don River delta during warm season 2015 3–11

Bondarev I. P., Revkov N. K.

Consorts of gastropod *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846)

in the Northern Black Sea. Part II: Mollusca (Polyplacophora, Bivalvia) 12–22

Prazukin A. V., Firsov Yu. K., Li R. I., Kholodov V. V.

Biofouling formation in the artificial reef structured space 23–39

Railkin A. I., Otvalko Zh. A., Korotkov S. I., Fomin S. E., Kuleva N. V.

Concept of environmentally friendly protection against sea fouling

and its development using epoxy-rubber coats 40–52

Romanova D. Yu., Petrov A. N., Nevrova E. L.

Copper sulphate impact on growth and cell morphology of clonal strains

of four benthic diatom species (Bacillariophyta) from the Black Sea 53–67

Ryabushko V. I., Kozintsev A. F., Toichkin A. M.

Concentration of arsenic in the tissues of cultivated mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam.,

water and bottom sediments (Crimea, Black Sea) 68–74

Tikhonova E. A., Burdiyan N. V., Soloveva O. V.

The chemical-microbiological characteristics of sea water

and bottom sediments of the Kerch Strait and adjacent water areas 75–85

Chronicle and information

Nevrova E. L.

XV International Scientific Phycological Conference

“The Diatoms: present and future research” 86– 88

To the memory of Sergey Mikhailovich Ignatyev (04.03.1958–12.08.2017) 89–90



НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 597.2/.5(282.247.35)

ОСОБЕННОСТИ КОЛИЧЕСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЫБ ДЕЛЬТЫ ДОНА В ТЁПЛЫЙ СЕЗОН 2015 Г.

© 2017 г. **А. Р. Болтачев**¹, канд. биол. наук, зав. отд., **Е. П. Карпова**¹, н. с.,
А. В. Старцев², канд. биол. наук, с. н. с., **О. В. Степаньян**², канд. биол. наук, зам. дир.

¹Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

²Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

E-mail: a_boltachev@mail.ru

Поступила в редакцию 09.02.2017 г. Принята к публикации 01.08.2017 г.

Изучены видовое разнообразие и особенности качественного и количественного распределения рыб в некоторых протоках дельты реки Дон, которая является верхней границей крупного эстуарного экотона между экосистемами бассейна этой реки и Азовского моря. Впервые определены удельная численность и удельная биомасса мелких донных и придонных видов рыб в протоках дельты, различающихся условиями обитания. Установлено, что непромысловые мелкие виды рыб доминируют по численности, а в отдельных случаях — и по биомассе, что определяет их важную роль в трофической структуре экотона дельты. Для сообществ рыб отмечены низкие значения индекса разнообразия Шеннона, что подтверждает хорошо выраженное доминирование эврибионтных короткоцикловых непромысловых рыб. Дальнейшее повышение солёности Азовского моря может привести к увеличению количественных показателей солоноватоводных понто-каспийских эндемиков в дельте Дона.

Ключевые слова: сообщество рыб, пресноводные рыбы, солоноватоводные рыбы, морские рыбы, удельная численность, удельная биомасса, бимтрал, индекс разнообразия Шеннона, дельта Дона

Дельта реки Дон по биоценотическим особенностям представляет собой верхнюю границу крупного эстуарного экотона между экосистемами бассейна р. Дон и Азовского моря, для которого характерны специфический гидролого-гидрохимический режим, повышенное видовое разнообразие, значительная биологическая продуктивность и исключительная рыбохозяйственная важность [10]. Всё это определило актуальность организации комплексных мониторинговых гидроэкологических исследований, которые осуществляются Южным научным центром РАН (ЮНЦ РАН) в этом районе на протяжении 15 лет. Количество научных публикаций, посвящённых результатам исследований структурно-функциональных характеристик сообществ рыб, значительно как у ЮНЦ РАН, так и у других академических и отраслевых институтов, однако в них недостаточное внимание уделяется мелким непромысловым рыбам, а сведения о таком важном показателе состояния популяций, как оценка их численности и биомассы, практически отсутствуют. При этом постоянно подчёркивается, что некоторые мелкие непромысловые рыбы в отдельных рукавах дельты весьма многочисленны и могут составлять пищевую конкуренцию промысловым видам, но конкретные оценки их численности и биомассы не приводятся [3, 4, 10]. При оценке эколого-трофической ёмкости бассейна Азовского моря, а также межвидовой и внутривидовой конкуренции рыб рассматриваются в основном промысловые виды, состояние популяций большинства из которых весьма напряжённое. На этом основании делается вывод о «тотальном недостатке консументов в экосистеме» [6].

С другой стороны, в последние годы на фоне затяжного маловодья и снижения водности р. Дон отмечено резкое (до 14,5 ‰) увеличение солёности Азовского моря. Особенно интенсивный рост солёности (до 10,5 ‰) наблюдается в Таганрогском заливе, где постоянная изогалина солёности с показателями 2–4 ‰ подошла к дельте р. Дон. Это вызывает всё более повторяющиеся при интенсивных нагонах случаи затока морских вод в р. Дон вплоть до г. Ростова-на-Дону (30 км от устья реки) [8, 9].

Целью настоящего сообщения является изучение некоторых структурных особенностей сообщества рыб дельты Дона на уровне мелких непромысловых и молоди промысловых видов путём сравнения их количественных показателей.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал собран в ходе двух совместных экспедиций Института морских биологических исследований (ФГБУН ИМБИ) и ЮНЦ РАН, выполненных в июле и сентябре 2015 г. В первой экспедиции были обследованы рукава дельты Дона (Сухая Каланча, Мериново и Свиное гирло), во второй — устье р. Старый Дон, Песчаное и Свиное гирло (рис. 1). Сбор материала проводили с моторной лодки с помощью бимтрала, имевшего ширину жёсткой рамы 2,0 м, высоту 0,3 м, с размером ячеи мелкочечной вставки в траловом мешке 10 мм в июле и 3 мм в сентябре. Всего выполнено 17 тралений общей протяжённостью около 15,5 км в диапазоне глубин от 0,4 до 6,5 м (табл. 1, рис. 1). Координаты начала и окончания траления определяли с помощью спутниковой навигационной системы GPS, глубину траления — портативным эхолотом.

Удельную численность выловленных рыб для каждого траления рассчитывали по формуле:

$$N = n / (L \times b) \times 10000, \quad (1)$$

где N — удельная численность рыб, экз.·га⁻¹;

n — общее количество экземпляров рыб в улове, экз.;

L — длина пройденного пути, вычисленная по координатам начала и окончания траления, м;

b — ширина жёсткой рамы бимтрала, м;

10000 — коэффициент для определения численности рыб на гектар.

По аналогичной формуле рассчитывали удельную биомассу (B) рыб в килограммах на гектар.

Для каждой протоки, в которой выполнено более одного траления, а также в целом для исследованного участка дельты Дона определены средние значения удельной численности (N_s) и биомассы (B_s), вычисленные как частное от суммы удельных соответствующих показателей на количество тралений.

Удельная величина количественных показателей является относительной: для каждой размерной группы рыб, в зависимости от видовой и индивидуальной реакции на орудие лова, коэффициент уловистости бимтрала установить проблематично. В связи с этим при расчётах мы его не учитывали. Несмотря на это, составить общее представление об особенностях количественного распределения малоразмерных особей рыб и соотношения видов, принадлежащих к различным экологическим группам, в исследованном районе вполне возможно. Более репрезентативными следует считать результаты, полученные в отношении качественного и количественного состава мелких или молоди крупных видов рыб, ведущих донный или придонно-пелагический образ жизни.

Русские и латинские названия приведены согласно [1, 13, 15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из 72 видов рыб и рыбообразных, относящихся к 17 семействам, зарегистрированных к настоящему времени в низовьях р. Дон [5, 6, 10], в уловах бимтрала отмечено всего 24 вида из 8 семейств, характерных для дельты. По разнообразию выделялось семейство карповых (представлено 8 видами), за ним следовали бычковые (6), окунёвые (4) и сельдевые (2 вида) (табл. 1).

Таблица 1. Список рыб и места их регистрации в дельте р. Дон по данным экспедиционных сборов в летне-осенний период 2015 г.**Table 1.** The fish list and sites of fish recording in the Don River delta based on field sampling in the summer – autumn period, 2015

№	Семейство, вид	Статус	Место лова				
			1	2	3	4	5
I. Сельдевые Clupeidae							
1	Азовский пузанок <i>Alosa caspia tanaica</i> (Grimm, 1901)	Прх				+	+
2	Черноморско-каспийская тюлька <i>Clupeonella cultriventris</i> (Nordmann, 1840)	С	+		+	+	+
II. Карповые Cyprinidae							
3	Уклейка <i>Alburnus alburnus</i> (Linnaeus, 1758)	Пт*					+
4	Густера <i>Blicca bjoerkna</i> (Linnaeus, 1758)	Пт	+	+			
5	Серебряный карась <i>Carassius gibelio</i> (Bloch, 1782)	Пп/п	+	+	+	+	+
6	Сазан <i>Cyprinus carpio</i> Linnaeus, 1758	Пп/п			+		+
7	Амурский чебачок <i>Pseudorasbora parva</i> (Temminck et Schlegel, 1846)	Пт*			+	+	+
8	Обыкновенный горчак <i>Rhodeus amarus</i> (Bloch, 1782)	Пт*			+	+	+
9	Плотва (тарань) <i>Rutilus rutilus</i> (Linnaeus, 1758)	Пп/п	+		+	+	+
10	Рыбец <i>Vimba vimba vimba</i> (Linnaeus, 1758)	Пп/п					+
III. Вьюновые Cobitidae							
11	Щиповка обыкновенная <i>Cobitis taenia</i> Linnaeus, 1758	Пт*					+
IV. Щуковые Esocidae							
12	Щука <i>Esox lucius</i> Linnaeus, 1758	Пт				+	+
V. Атериновые Atherinidae							
13	Черноморская атерина <i>Atherina pontica</i> (Eichwald, 1831)	М					+
VI. Игловые Syngnathidae							
14	Черноморская пухлощёкая игла-рыба <i>Syngnathus nigrolineatus</i> Eichwald, 1831	М*	+		+	+	+
VII. Окуневые Percidae							
15	Обыкновенный ёрш <i>Gymnocephalus cernuus</i> (Linnaeus, 1758)	Пт	+				
16	Речной окунь <i>Perca fluviatilis</i> Linnaeus, 1758	Пт	+				
17	Перкарина <i>Percarina demidoffii</i> Nordmann, 1840	С					+
18	Обыкновенный судак <i>Sander lucioperca</i> (Linnaeus, 1758)	Пп/п	+				
VIII. Бычковые Gobiidae							
19	Звёздчатая пуголовка <i>Benthophilus stellatus</i> (Sauvage, 1874)	С*	+				
20	Длиннохвостый бычок Книповича <i>Knipowitschia longecaudata</i> (Kessler, 1877)	С*		+	+	+	+
21	Бычок-песочник <i>Neogobius fluviatilis</i> (Pallas, 1814)	С	+		+	+	+
22	Бычок-гонец <i>Neogobius gymnotrachelus</i> (Kessler, 1857)	С*	+		+	+	+
23	Бычок-кругляк <i>Neogobius melanostomus</i> (Pallas, 1814)	С	+		+	+	+
24	Бычок-сирман <i>Neogobius syrman</i> (Nordmann, 1840)	С	+	+	+	+	+
Всего видов			13	4	12	13	19

Примечание. Статус: Прх — проходные виды, Пп/п — пресноводные полупроходные виды, Пт — пресноводные туводные виды, С — солоноватоводные виды, М — морские виды, * — непромысловые виды. Место лова: 1 — протока Сухая Каланча, 2 — протока Мериново гирло, 3 — протока Свиное гирло, 4 — рукав Старый Дон, 5 — протока Песчаное гирло.

Note. Status: Прх – anadromous species, Пп/п – freshwater semi-anadromous species, Пт – freshwater nonmigratory species, С – brackish species, М – marine species, * – non-commercial species. Catch sites: 1 – Sukhaya Kalancha arm, 2 – Merinovo girlo arm, 3 – Svinoe girlo arm, 4 – Staryy Don branch, 5 – Peschanoe girlo arm

По видовому богатству в дельте Дона преобладали пресноводные (полупроходные и туводные) рыбы, представленные 13 видами, солоноватоводные понто-каспийские эндемики — 8 видов, морские по своему происхождению рыбы — 2, однако черноморская пухлощёкая игла-рыба полностью адаптировалась к обитанию в пресной воде и является массовым видом в некоторых реках и сооружённых на

них русловых водохранилищах Черноморско-Азовского и Каспийского бассейнов (Днепр, Южный Буг, Дон, Волга). Из проходных видов в дельте Дона отмечена только молодь азовского пузанка (табл. 1).

Наибольшей частотой встречаемости в 17 обловах, выполненных бимтралом, отличались бычки кругляк и сирман (88,2 %), длиннохвостый бычок Книповича и черноморская пухлощёкая игла-рыба (82,3 %), бычок-песочник (76,5 %). Немногим более чем в половине тралений присутствовали бычок-голец, серебряный карась и плотва.

Принципиальные различия в количественных оценках на уровне семейств, видов и соотношения промысловых и мелких непромысловых рыб в протоках дельты получены в результате применения в бимтрале вставок с различным размером ячеи. Так, если при минимальном размере ячеи вставки 10 мм удельная численность рыб колебалась от 83,3 до 933,3 экз. $\cdot$ га⁻¹ (в среднем 321,3), удельная биомасса — от 1,20 до 7,68 кг $\cdot$ га⁻¹ (в среднем 4,28), то при использовании вставки с размером ячеи 3 мм удельная численность увеличилась на порядок, составив от 794,1 до 7466,2 экз. $\cdot$ га⁻¹ (в среднем 3375), в то время как увеличение биомассы было не столь существенным (в 1,7 раза) и варьировало от 3,19 до 18,81 кг $\cdot$ га⁻¹ (в среднем 7,44) (рис. 1, табл. 2). В основном это касалось самых мелких или имеющих специфическую форму тела рыб. Так, удельная численность длиннохвостого бычка Книповича при уменьшении размера ячеи вставки возросла в 16,7, а удельная биомасса — в 30 раз, а черноморской пухлощёкой иглы-рыбы — в 40,3 и 78 раз соответственно.

Основной вклад в среднюю удельную численность и биомассу в протоках Сухая Каланча, Мериново гирло и Свиное гирло вносили представители семейства карповых, среди которых в большинстве случаев по биомассе выделялся серебряный карась, имеющий более крупные размеры по сравнению с таковыми остальных рыб, облавливавшихся бимтралом (табл. 2). По численности только в протоке Сухая Каланча преобладали бычковые (за счёт бычка-сирмана), в остальных протоках — карповые, а именно серебряный карась в протоке Мериново гирло и горчак в Свином гирле (табл. 2).

В судоходном канале Старый Дон, проложенном по одному из основных рукавов дельты, и в протоке Песчаное гирло по количественным показателям доминировали представители семейства бычковых: по численности — длиннохвостый бычок Книповича, по биомассе — бычок-сирман, причём последний вносил существенный вклад в общую биомассу рыб и в других протоках дельты (табл. 2).

Из 24 видов, зарегистрированных в уловах бимтрала, по меньшей мере 8 относятся к мелким непромысловым рыбам (табл. 1). При применении вставки с размером ячеи 10 мм их доля в уловах в протоках Сухая Каланча и Мериново гирло не превышала 12,7 % по численности и 1,7 % по биомассе, но в Свином гирле она была существенно выше — 73,3 % по численности и 28,4 % по биомассе всех рыб. При использовании мелкой ячейной вставки 3 мм мелкие непромысловые рыбы повсеместно доминировали по численности, составляя в среднем 89,3 % и примерно пятую часть биомассы (20,8 %) общего улова всех рыб.

Из промысловых видов по количественным показателям в основном выделялись два вида — серебряный карась, наибольшая удельная численность которого достигала 117,6 экз. $\cdot$ га⁻¹, а биомасса — 6,77 кг $\cdot$ га⁻¹, и бычок-сирман с максимальными концентрациями 277,8 экз. $\cdot$ га⁻¹ и 6,74 кг $\cdot$ га⁻¹ соответственно. Средние удельные значения в исследованных водотоках приведены в табл. 2. Очевидно, фактические данные численности и биомассы могут быть выше, т. к. речь идёт о достаточно крупных для размеров входного отверстия бимтрала рыбах, способных активно избегать облова.

Из непромысловых рыб в дельте Дона наиболее многочисленными были четыре вида: длиннохвостый бычок Книповича, горчак, черноморская пухлощёкая игла-рыба и амурский чебачок (табл. 2). Самыми мелкими размерами отличался длиннохвостый бычок Книповича. Средняя стандартная длина особи составляла 24,3 мм, а максимальная — 35,8 мм, средняя масса — всего 0,23 г, наибольшая — 0,63 г, но на отдельных участках дельты его удельная численность достигала 6689,2 экз. $\cdot$ га⁻¹, а биомасса — 1,69 кг $\cdot$ га⁻¹. Вторым по наибольшему показателю удельной численности (1930,6 экз. $\cdot$ га⁻¹), но первым по удельной биомассе (2,09 кг $\cdot$ га⁻¹) был горчак, средняя масса особи которого на порядок превышала этот показатель у предыдущего вида (табл. 2). Черноморская пухлощёкая игла-рыба имеет специфиче-

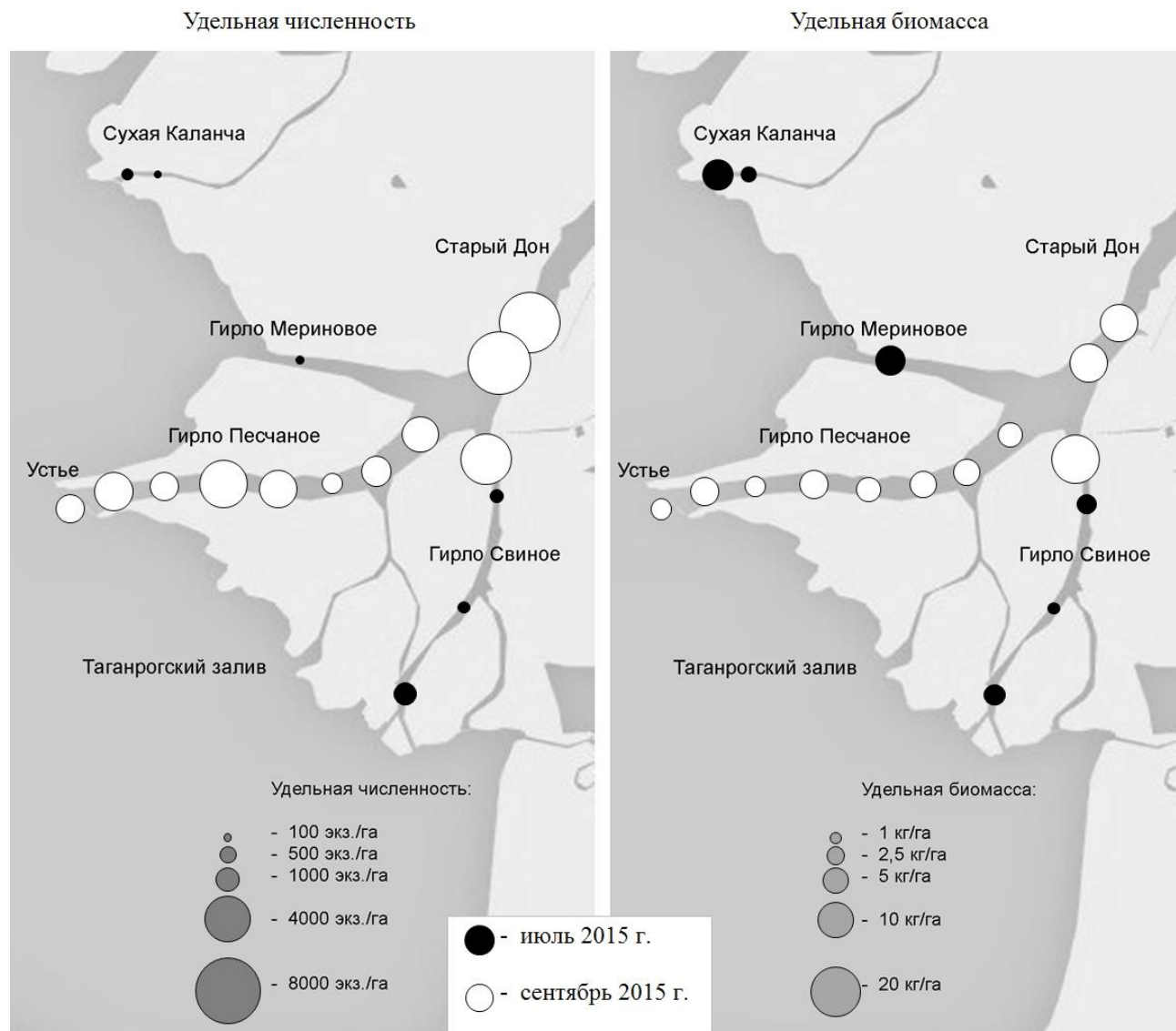


Рис. 1. Схема тралений и распределение удельной численности и удельной биомассы рыб в протоках дельты р. Дон в июле и сентябре 2015 г.

Fig. 1. Scheme of trawling and distribution of the specific numbers and the specific biomass of fish in the ducts the Don River delta in July and September 2015

скую нитевидную форму тела и при относительно большой средней длине (около 140 мм) её средняя масса составляла немногим более 1 г. При этом она была на третьем месте по наибольшим значениям удельной численности ($1491,8 \text{ экз.} \cdot \text{га}^{-1}$) и на втором по удельной биомассе ($1,8 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$). Четвёртый вид, самый крупный из выделенных массовых непромысловых, — это амурский чебачок (табл. 2), он достигал наибольшей удельной численности на уровне $1194,4 \text{ экз.} \cdot \text{га}^{-1}$ и биомассы $1,431 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$.

Количественное распределение этих видов рыб зависело от биотопических особенностей водотока. Наибольшие концентрации горчака и амурского чебачка характерны для протоки Свиное гирло, отличающейся небольшими глубинами (преимущественно менее 2 м), высокой степенью заиленности дна, массовыми скоплениями моллюсков-фильтраторов и развитой донной и околородной прибрежной водной растительностью. При этом прослеживалось увеличение концентрации горчака в непосредственной близости от зарослей водной растительности. Следует отметить, что Свиное гирло, проток дельты р. Дон, находится под довольно жёстким антропогенным прессом, что связано с расположением вдоль большей части её левого берега крупного с. Кагальник. От него в протоку поступают неочищенные

Таблица 2. Средняя удельная численность (экз.·га⁻¹) и удельная биомасса (кг·га⁻¹) рыб в протоках дельты р. Дон по данным уловов бимтрала**Table 1.** The average values of unit abundance (number·ha⁻¹) and biomass (kg·ha⁻¹) of fish in the arms of the Don River delta according of beam trawl catches

Семейство, вид	Протока Сухая Каланча	Протока Мериново гирло	Протока Свиное гирло (июль)	Протока Свиное гирло (сентябрь)	Рукав Старый Дон	Протока Песчаное гирло	Средняя стандартная длина особи, SL_s (мм)	Средняя масса особи, P_s (г)
Карповые Cyprinidae, в т. ч.:	31,6 3,17	82,2 7,2	335,4 1,77	3250,0 10,1	114,0 3,96	9,9 0,10		
Серебряный карась <i>Carassius gibelio</i>	9,1 1,64	68,5 6,77	39,2 0,89	111,1 6,53	50,6 3,81	1,1 0,04	107,6	71,22
Густера <i>Blicca bjoerkna</i>	20,7 1,44	13,7 0,43					104,3	27,15
Амурский чебачок <i>Pseudorasbora parva</i>			6,0 0,02	1194,4 1,43	3,4 0,02	1,3 0,01	65,5	6,03
Горчак <i>Rhodeus amarus</i>			284,2 0,70	1930,6 2,09	39,1 0,06	0,8 0,001	38,8	1,49
Иглообразные Syngnathidae								
Черноморская пухлощёкая игла-рыба <i>Syngnathus nigrolineatus</i>	1,7 0,004		13,1 0,005	527,8 0,39	335,9 0,40	573,6 0,65	140,2	1,05
Бычковые Gobiidae, в т. ч.:	121,7 1,49	34,2 0,48	122,7 0,86	1069,4 8,32	6727,9 5,75	1634,4 4,25		
Бычок-кругляк <i>Neogobius melanostomus</i>	10,9 0,17		43,3 0,46	138,9 1,25	207,8 0,99	150,9 1,09	65,8	11,5
Бычок-сирман <i>Neogobius syrman</i>	88,3 1,18	27,4 0,48	18,5 0,36	277,8 6,74	151,1 2,97	84,5 1,91	90,7	19,0
Длиннохвостый бычок Книповича <i>Knipowitschia longicaudata</i> (Kessler, 1877)		6,8 0,001	34,1 0,006	569,4 0,18	6316,3 1,59	1183,1 0,32	24,3	0,2
Прочие	5,7 0,26				3,4 1,05	5,0 0,01		
Всего	162,4 4,92	116,4 7,68	495,6 2,66	4847,2 18,81	7219,0 11,20	2228,9 5,02		
Число видов	13	4	12	9	13	19		
Индекс Шеннона	1,71	1,07	1,88	1,64	0,59	1,37		

Примечание: в числителе средняя удельная численность (Ns), в знаменателе средняя удельная биомасса (Bs)

Note: the average specific abundance (Ns) is in the numerator, the average specific biomass (Bs) is in the denominator

бытовые стоки, здесь происходит смыв удобрений и пестицидов с огородов и развито разведение домашних водных птиц.

На локальных участках нижней части судоходного русла рукава Старый Дон зарегистрирована наибольшая удельная численность рыб, достигавшая около 7,5 тыс. экз.·га⁻¹, в основном за счёт самого мелкого вида — длиннохвостого бычка Книповича. Второй была черноморская пухлощёкая игла-рыба,

причём ниже по течению оба вида лидировали по этому показателю, однако численность первого вида снижалась, а второго — увеличивалась (табл. 2). В низовьях Старого Дона в районе Сельдёвой тони траления выполнялись на глубинах от 0,6 до 1,8 м вдоль левого берега, для которого характерны наличие умеренно заиленных песчаных отмелей, присутствие локальных поселений моллюсков-фильтраторов и развитая прибрежная околотовдная растительность. В протоке Песчаное гирло облавливались глубины от 0,5 м (узкая вдольбереговая зона) до 6,5 м (фарватер судоходного канала). Дно преимущественно песчаное и илисто-песчаное с отдельными глинистыми и заиленными участками, водная и околотовдная растительность развита слабо либо отсутствует в связи с размывом берегов в результате интенсивного судоходства.

Из всех рассматриваемых массовых непромысловых рыб только у горчача основу питания составляют фитопланктон, нитчатые водоросли и другие водные растения, частично он употребляет мелких донных беспозвоночных. У остальных трёх видов молодь питается в основном зоопланктоном, а взрослые особи наряду с ним потребляют мелких донных ракообразных, моллюсков, личинок насекомых. Для всех четырёх указывается присутствие в спектре питания икры и личинок рыб [2, 7, 12]. Эти виды являются короткоцикловыми с продолжительностью жизни от года (длиннохвостый бычок Книповича) до 3–4, реже 5 лет (все остальные). Они характеризуются ранним половым созреванием (от 2,5 мес. (длиннохвостый бычок Книповича) до года) и проявляют заботу о потомстве [11, 14, 16].

Безусловно, при таких специфических особенностях экологии и количественных показателях непромысловые мелкие виды способны оказывать серьёзную пищевую конкуренцию молоди ряда ценных промысловых рыб, а также существенно влиять на численность, выедавая их икру и личинок. Все они являются, в свою очередь, потенциальными объектами питания хищных видов рыб [11, 14]. Однако, по данным промысловых и научных ловов и наших наблюдений, численность основных хищных видов (судака, речного окуня, щуки и др.) в низовьях Дона существенно снизилась. Следует особенно подчеркнуть факт единичного присутствия молоди ценных промысловых рыб (рыбца, сазана, судака) в уловах бимтрала, а также отсутствие леща, шемаи и других некогда массовых видов, молодь которых именно в июле и сентябре должна активно нагуливаться в дельте Дона. Из промысловых видов в основном облавливались серебряный карась и бычки (сирман, кругляк, реже песочник), в отдельных случаях — плотва и густера. Это заставляет обратить внимание на проблему пониженной эффективности естественного воспроизводства ценных видов рыб. Повышение солёности, в первую очередь придонных слоёв воды в дельте р. Дон, способствует, вероятно, увеличению численности и биомассы солоноватоводных понто-каспийских эндемичных видов (в основном представителей семейства бычковых), а также эврибионтного серебряного карася. При этом типичные пресноводные виды отходят вверх по течению.

Другим неутешительным показателем оценки состояния сообществ рыб в исследованных протоках дельты р. Дон является довольно низкое значение индекса разнообразия Шеннона (табл. 2). Это обусловлено выраженным доминированием преимущественно эврибионтных, короткоцикловых мелких непромысловых рыб, что свидетельствует, в свою очередь, о неблагоприятной экологической обстановке в исследованном районе, связанной с загрязнением, эвтрофированием, браконьерством и другими негативными факторами антропогенного пресса.

Сотрудниками ФГБУН ИМБИ исследования выполнены в рамках бюджетной темы ФГБУН ИМБИ «Мониторинг биологического разнообразия гидробионтов Черноморско-Азовского бассейна и разработка мер по его сохранению» (гос. рег. № 115081110013), сотрудниками ЮНЦ РАН — по проекту «Анализ динамики природных систем на основе мегабаз данных за многолетний (19–20 века) период наблюдений» (гос. рег. № 01201450487) и в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», проект RFMEFI60716X0163.

Благодарность. Авторы выражают глубокую благодарность Председателю Южного научного центра РАН академику Г. Г. Матишову за предоставленную возможность выполнения комплексных экспедиционных исследований на научно-экспедиционной базе ЮНЦ «Кагальник», а также сотрудникам ЮНЦ РАН и НЭБ «Кагальник» за помощь в сборе ихтиологического и гидробиологического материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Васильева Е. Д. *Рыбы Черного моря. Определитель морских, солоноватоводных, эвригалинных и проходных видов с цветными иллюстрациями, собранными С. В. Богородским.* Москва : Изд-во ВНИРО, 2007. 238 с. [Vasil'eva E. D. *Ryby Chernogo morya. Opredelitel' morskikh, solonovatovodnykh, evrigalinnykh i prokhodnykh vidov s tsvetnymi illyustratsiyami, sobrannymi S. V. Bogorodskim.* Moscow: Izd-vo VNIRO, 2007, 238 p. (in Russ.).]
2. Васильева Е. Д., Лужняк В. А. *Рыбы бассейна Азовского моря* / гл. ред. акад. Г. Г. Матишов. – Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2013. 272 с. [Vasil'eva E. D., Luzhnyak V. A. *Ryby basseina Azovskogo morya* / G. G. Matishov (Ed.). Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTs RAN, 2013, 272 p. (in Russ.).]
3. *Вселенцы в биоразнообразии и продуктивности Азовского и Черного морей* / ред. Г. Г. Матишов, А. Р. Болтачев. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2010. 114 с. [Vselentsyi v bioraznoobrazii i produktivnosti Azovskogo i Chernogo morey / G. G. Matishov, A. R. Boltachev (Eds.). Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTs RAN, 2010, 114 p. (in Russ.).]
4. Жукова С. В., Сыроватка Н. И., Беляев А. Г., Шишкин В. М., Куропаткин А. П., Лутынская Л. А., Фоменко И. Ф. *Дельта Дона: эволюция в условиях антропогенной трансформации стока.* Ростов-на-Дону : Изд-во ФГУП «АзНИИРХ», 2009. 184 с. [Zhukova S. V., Syrovatka N. I., Belyaev A. G., Shishkin V. M., Kuropatkin A. P., Lutyinskaya L. A., Fomenko I. F. *Del'ta Dona: evolyutsiya v usloviyakh antropogennoi transformatsii stoka.* Rostov-on-Don: Izd-vo FGUP "AzNIIRH", 2009, 184 p. (in Russ.).]
5. *Ихтиофауна Азово-Донского и Волго-Каспийского бассейнов и методы её сохранения* / ред. Г. Г. Матишова. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. 344 с. [Ikhtiofauna Azovo-Donskogo i Volgo-Kaspiiskogo basseinov i metody ee sokhraneniya / G. G. Matishov (Ed.). Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTs RAN, 2009, 344 p. (in Russ.).]
6. Куцын Д. Н. Видовой состав ихтиофауны восточной части Таганрогского залива и дельты Дона по результатам весенне-летних наблюдений 2011 г. // *Экосистемные исследования среды и биоты Азовского бассейна* / отв. ред. РАН Д. Г. Матишов. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2012. 272 с. [Kutsyin D. N. *Vidovoi sostav ikhtiofauny vostochnoi chasti Taganrogskogo zaliva i del'ty Dona po rezul'tatam vesenne-letnikh nablyudenii 2011 g.* In: *Ekosistemnye issledovaniya sredy i bioty Azovskogo basseina* / D. G. Matishov (Ed.). Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTs RAN, 2012, 272 p. (in Russ.).]
7. Лужняк В. А., Старцев А. В. Динамика разнообразия ихтиофауны бассейнов Азовского и Каспийского морей под влиянием климатических и антропогенных факторов // *Ихтиофауна Азово-Донского и Волго-Каспийского бассейнов и методы её сохранения* / ред. Г. Г. Матишов. Ростов-на-Дону : изд-во ЮНЦ РАН, 2009. С. 18–57. [Luzhnyak V. A., Startsev A. V. *Dinamika raznoobraziya ikhtiofauny basseinov Azovskogo i Kaspiiskogo morei pod vliyaniem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov.* In: *Ikhtiofauna Azovo-Donskogo i Volgo-Kaspiiskogo basseinov i metody ee sokhraneniya* / G. G. Matishov (Ed.). Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTs RAN, 2009, pp. 18–57. (in Russ.).]
8. Матишов Г. Г. Случаи экстремальной адвекции соленых вод в дельту Дона и льда в Керченский пролив // *Доклады Академии наук.* 2015. Т. 465, № 1. С. 99–103. [Matishov G. G. *Sluchai ekstremal'noi advektivsii solenyykh vod v del'tu Dona i l'da v Kerchenskii proliv.* *Doklady Akademii nauk.*

- 2015, vol. 465, iss. 1, pp. 99–103. (in Russ.)). doi: [10.7868/S0869565215310229](https://doi.org/10.7868/S0869565215310229).
9. Матишов Г.Г., Бердников С.В. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г. // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2015. Вып. 1. С. 111–118. [Matishov G. G., Berdnikov S. V. Ekstremal'noe zatoplenie del'ty Dona vesnoi 2013 g. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2015, iss. 1, pp. 111–118. (in Russ.)].
 10. Матишов Г.Г., Пономарева Е.Н., Лужняк В.А., Старцев А.В. *Результаты ихтиологических исследований устьевого взморья Дона*. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2014. 160 с. [Matishov G. G., Ponomareva E. N., Luzhnyak V. A., Startsev A. V. *Rezultaty ikhtologicheskikh issledovaniy ust'evogo vzmor'ya Dona*. Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTs RAN, 2014, 160 p. (in Russ.)].
 11. Мовчан Ю.В. *Фауна Украины. Т. 8. Рыбы. Вып. 3. Вьюновые, сомовые, икталуровые, пресноводные угри, конгеровые, саргановые, тресковые, колюшковые, игловые, гамбузиевые, зеусовые, сфиреновые, кефалевые, атериновые, ошибневые*. Киев : Наукова думка, 1988. 368 с. [Movchan Yu. V. *Fauna Ukrainy. Vol. 8. Ryby. Iss. 3. Vyunovye, somovye, iktalurovye, presnovodnye ugri, kongerovye, sarganovye, treskovye, kolyushkovye, iglovye, gambuzievye, zeusovye, sfirenovye, kefalevye, aterinovye, oshibnevye*. Kiev: Naukova dumka, 1988, 368 p. (in Russ.)].
 12. Мовчан Ю.В. *Рибі України (визначник-довідник)*. Київ : Золоті ворота, 2011. 444 с. [Movchan Yu. V. *Ribi Ukraini (viznachnik-dovidnik)*. Kiev: Zoloti vorota, 2011, 444 p. (in Ukrainian)].
 13. Световидов А.Н. *Рыбы Чёрного моря*. Москва : Наука, 1964. 550 с. [Svetovidov A. N. *Ryby Chernogo morya*. Moscow: Nauka, 1964, 550 p. (in Russ.)].
 14. Смирнов А.И. *Фауна Украины. Т. 8. Рыбы. Вып. 5. Окунеобразные (бычковидные), скорпенообразные, камбалообразные, присоскопорообразные, удильщикообразные*. Киев : Наукова думка, 1986. 320 с. [Smirnov A. I. *Fauna Ukrainy. Vol. 8. Ryby. Iss. 5. Okuneobraznye (bychkovidnye), skorpenoobraznye, kambaloobraznye, prisoskoperoobraznye, udil'shchikoobraznye*. Kiev: Naukova dumka, 1986, 320 p. (in Russ.)].
 15. Eschmeyer W. N., Fong J. D. Catalog of Fishes. Available at: <http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/SpeciesByFamily.asp> [accessed 31.07.2017].
 16. Kottelat M., Freyhof J. Handbook of European freshwater fishes. Germany: Kottelat, Cornol, Switzerland, Freyhof, 2007, 647 p.

FEATURES OF QUANTITATIVE DISTRIBUTION OF FISH IN THE DON RIVER DELTA DURING WARM SEASON 2015

A. R. Boltachev¹, E. P. Karpova¹, A. V. Startsev², O. V. Stepanyan²

¹Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS, Sevastopol, Russian Federation

²Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation

E-mail: a_boltachev@mail.ru

Species diversity and population dynamics of small non-target fish in hydrological and hydro-chemical restructuring of the Don River delta were studied. River delta is the boundary of a large estuarine ecotone between the ecosystems of the Azov Sea and the river basin. Low values of the Shannon index of diversity were recorded for fish communities. This confirms the dominance of short-cycle eurybiontic weed fish. The increase of the abundance of the Ponto-Caspian endemic species can result from faster growth of salinity of the Azov Sea.

Keywords: fish community, freshwater fish, brackish fish, marine fish, specific number, specific biomass, bimtrawl, diversity index of Shannon, Don River delta

УДК 594.3(262.5)

**КОНСОРТЫ БРЮХОНОГОГО МОЛЛЮСКА
RAPANA VENOSA (VALENCIENNES, 1846) В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ.
ЧАСТЬ II: MOLLUSCA (POLYPLACOPHORA, BIVALVIA)**

© 2017 г. **И. П. Бондарев**, канд. биол. наук, с. н. с., **Н. К. Ревков**, канд. биол. наук, вед. н. с.

Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

E-mail: igor.p.bondarev@gmail.com

Поступила в редакцию 23.06.2017 г. Принята к публикации 01.08.2017 г.

Исследование моллюсков-симбионтов хищной гастроподы *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) является продолжением работы по описанию таксономического состава комплекса эпибионтов, формирующегося на раковине рапаны. Современные исследования инвазивной гастроподы *R. venosa* показывают, что экологическая роль этого вида не сводится только к хищничеству. На довольно крупной раковине рапаны может формироваться специфический комплекс организмов-эпибионтов, рассматриваемый как консорция, ядром которой является *R. venosa*. Консорция брюхоногого моллюска-вселенца *R. venosa* является малоизученным и неучтённым звеном бентосных сообществ и экосистемы шельфа Чёрного моря. Для изучения консортного сообщества рапаны были осуществлены сборы в 7 районах северной части Чёрного моря: 1 — Мамайя, Румыния; 2 — северо-западная часть Чёрного моря (СЗЧМ), Крымский сектор; 3 — Севастополь; 4 — Алушка; 5 — Ялта — Алушта; 6 — Карадаг; 7 — Керченский пролив. Сбор рапаны в прибрежной зоне до глубины 15 м проводили totally с использованием легководолазного оборудования, в более глубоководной зоне (до 40 м) — дночерпателем «Океан-50» с борта НИС «Профессор Водяницкий». Каждый экземпляр помещали в отдельный пластиковый пакет с указанием района, глубины и биотопа. Параллельно со сбором моллюсков проводили визуальные наблюдения и фотофиксацию гидробионтов *in situ*. Всего проанализировано 890 экземпляров *R. venosa*. По сравнению с предыдущими исследованиями существенно расширен таксономический список консортных моллюсков *R. venosa*, относящихся к трём классам: Polyplacophora (Loricata), Bivalvia, Gastropoda. В этой части работы рассмотрены Polyplacophora, представленные в консорции 3 видами 2 родов 2 семейств, и Bivalvia — 7 видами 7 родов 5 семейств. Установлено, что моллюски являются важным компонентом консорции рапаны. На скальной рапане хитоны встречаются с частотой до 25 %, на песчаной рапане — до 10 %, в целом в консорции рапаны — около 12 %. Более 80 % численности всех хитонов на рапане приходится на *Lepidochitona cinerea*. Встречаемость бивальвий в большинстве обследованных районов составляет 50–75 %. Площадь покрытия раковины рапаны двустворками обычно составляет 2–20 %, иногда достигая 85 %. Наиболее распространённым видом бивальвий и моллюсков в целом в консорции черноморской рапаны является *Mytilaster lineatus*. Большинство Bivalvia имеют тесную связь с ядром консорции, прикрепляясь биссусом к поверхности раковины рапаны, а на самых ранних стадиях — и к поверхности эпифитов. Представители Polyplacophora приурочены преимущественно к скальной форме рапаны, а Bivalvia представлены большим количеством видов в консорции рапаны рыхлых грунтов, чем скальных (6 против 3 видов, соответственно). Различия в таксономическом составе эпибионтов и проценте покрытия раковины двух экоформ *R. venosa* преимущественно определяются спецификой динамического воздействия водной массы в зонах развития скальных и рыхлых грунтов.

Ключевые слова: консорция, экология, эпибионты, Mollusca, Polyplacophora, Bivalvia, Чёрное море

Исследование моллюсков-симбионтов хищной гастроподы *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) является продолжением работы по описанию таксономического состава комплекса эпибионтов, форми-

рующегося на её раковине [6]. Довольно крупный хищник *R. venosa* представляет потенциальную угрозу биоценозам моллюсков-фильтраторов [2, 3, 16, 17, 21]. С другой стороны, раковина рапаны выполняет функцию твёрдого субстрата для ряда эпибионтов, позволяя им значительно (на обширные пространства, покрытые рыхлыми грунтами) увеличить зону обитания [5, 6]. На её раковине может формироваться специфический комплекс симбионтов [6, 8, 20], который рассматривается как консорция [6, 8]. Многие моллюски-консорты являются объектами питания *R. venosa* [3, 4, 16] и находятся в различной степени и характере экологических взаимоотношений с ядром консорции.

До настоящего времени консорция организмов-эпибионтов *R. venosa* остаётся малоизученным и неучтённым звеном бентосных сообществ и экосистемы шельфа Чёрного моря в целом. Это определяет актуальность исследований её вклада в общую структуру биологического разнообразия экосистемы Чёрного моря. Основной задачей данного раздела работы является составление аннотированного списка таксонов моллюсков-консорт *R. venosa*, относящихся к двум классам — Polyplacophora и Bivalvia.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Сбор образцов и натурные исследования эпибионтов раковин *R. venosa* проведены в 7 различных районах северной части Чёрного моря (рис. 1).



Рис. 1. Карта районов исследований: 1 — пляж Мамайя; 2 — СЗЧМ, Крымский сектор; 3 — Севастопольский район; 4 — Алушка; 5 — Ялта — Алушта; 6 — Карадаг; 7 — район Керченского пролива

Fig. 1. Sampling map with indication of investigated regions: 1 — Mamaia Beach; 2 — NWBS, Crimean sector; 3 — Sevastopol region; 4 — Alupka; 5 — Yalta — Alushta; 6 — Karadag; 7 — Kerch Strait region

Дополнительно к материалу, указанному в части I исследования по консортам рапаны [6], использованы имеющиеся в распоряжении авторов раковины моллюсков (33 экз.), собранные в керченском регионе (район 7) в 60–70-е гг. XX века, а также материалы В. А. Гринцова (2007 г.) по рапане из района 6. Таким образом, всего была проанализирована консортная структура 890 экз. рапаны (табл. 1).

Линейные размеры моллюсков измеряли штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. У хитонов определяли длину (L) от переднего края первого (головного) до заднего края последнего щитка. Методика измерения морфометрических параметров рапаны изложена в работе [6]. У двустворчатых моллюсков измеряли длину (L) от переднего до заднего края раковин. Взвешивание моллюсков выполняли на электронных весах: особей рапаны — с точностью до 0,1 г, других моллюсков-консорт — до 0,0001 г.

Покрывание эпибионтами раковины рапаны (интенсивность обрастания) оценивали в процентах от общей площади внешней поверхности раковины по методике, изложенной в работе [6].

Встречаемость (экстенсивность обрастания) по отдельным районам и биотопам оценивали в % к количеству собранных в районе (биотопе) проб (экз.) рапаны. Обобщённая характеристика встречаемости таксонов в сводной таблице дана по следующей шкале: «—» — таксон в выборке моллюсков не

Таблица 1. Районы исследований в северной части Чёрного моря и показатели суммарной площади покрытия зооконсортиями поверхности раковин *R. venosa* в % (мин. – макс. / среднее)

Table 1. Investigated regions in the northern part of the Black Sea and indices of the *R. venosa* shell surface total coverage with zoo-consorts in % (min – max / average)

Районы	Кол-во проб	Глубина, м	Месяц, год	Грунт	Покрытие, % поверхности
1. пляж Мамайя	12	0,0–1,5	XI, 2008	песок	2 – 35 / 5
2. СЗЧМ	11	19,5–25,0	X–XI, 2010	ил с ракушей	0 – 5 / 2
3. Севастополь	630	2,0–10,0	VI–IX, 2015, 2016	песок	0 – 100 / 35
	120	1,5–4,0	VI–IX, 2015, 2016	скала	0 – 60 / 25
4. Алушка	25	0,5–5,5	IX, 2016	скала	0 – 30 / 10
5. Ялта — Алушта	2	34,0, 40,0	X–XI, 2010	ил	20, 25
6. Карадаг	3	3,0	VI, 2007	скала	–
	14	21,8–23,0	X–XI, 2010	песчаный ил	5 – 85 / 30
7. Керчь	40	8,0–15,0	VII, 2012	илистый песок	5 – 90 / 20
	33	10,0–12,0	1960–1970	ил с ракушей	5 – 25 / 15

обнаружен, «+» — встречается редко (до 1 % выборки), «++» — не часто (2–10 %), «+++» — часто (11–30 %), «++++» — очень часто (> 30 %).

Названия таксонов приведены в соответствии с современной редакцией WoRMS (2017). Для некоторых видов указаны синонимы или базонимы, наиболее часто используемые в литературе в качестве основного наименования таксона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Тип Mollusca в качестве консортов *R. venosa* в наших сборах представлен тремя классами: хитоны или панцирные (Polyplacophora), двустворчатые (Bivalvia) и брюхоногие (Gastropoda). В данной публикации рассмотрены первые два класса моллюсков (табл. 2).

Класс Polyplacophora представлен всеми тремя видами, упомянутыми для малакофауны Чёрного моря [7], относящимися к двум родам двух семейств. Это *Lepidochitona cinerea* (Linnaeus, 1767), *Lepidochitona caprearum* (Scacchi, 1836) и *Acanthochitona fascicularis* (Linnaeus, 1767). Первый вид является наиболее распространённым, в том числе и у берегов Крыма, второй и третий — более редкие [12]. Хитоны — одни из наиболее характерных моллюсков-консортов *R. venosa*. Частота их встречаемости как на раковинах рапаны, так и на её эпифитах в совокупности составляет около 12 %. На скальной рапане хитоны встречаются с частотой до 25 %, на песчаной рапане — до 10 %. В исследовании [8] приводится встречаемость Polyplacophora (без указания родовых и видовых таксонов) на раковинах рапаны от 1 до 10 % для 6 из 12 исследованных районов северной части Чёрного моря.

В индивидуальных консорциях рапаны обычно присутствуют по 1–2 экземпляра хитонов, редко встречаются группы до 5 особей одного-двух видов. Их преимущественная локализация — на поверхности раковины *R. venosa*, однако дважды хитоны обнаружены на крышечке рапаны (рис. 2 А) и в трёх случаях — на макроводорослях — обрастателях рапаны.

Семейство Lepidochitonidae. Размер обнаруженных особей хитонов варьирует от 0,6 до 14,0 мм, масса — от < 0,0001 до 0,11 г. Значительно чаще других хитонов (более 80 % всех особей) на рапане присутствует *L. cinerea*, который встречается как на песчаной, так и на скальной рапане севастопольских бухт (район 3) на глубинах от 2 до 10 м.

Для *L. cinerea* характерно большое разнообразие окрасок (от однородно грязно-белой, зеленоватой или коричневатой до пёстрой с красными, фиолетовыми, розовыми, жёлтыми, бурыми и чёрными

Таблица 2. Список таксонов Mollusca в консорции *R. venosa* и их встречаемость на раковинах рапаны рыхлых (1) и скальных (2) грунтов в северной части Чёрного моря

Table 2. List of Mollusca taxa in consortium of *R. venosa* and their occurrence on the shells of the soft (1) and rocky (2) grounds in the northern part of the Black Sea

Таксон	Встречаемость		Глубина, м
	1	2	
Polyplacophora			
Acanthochitona fascicularis	–	+	2,0–4,0
Lepidochitona caprearum	+	+	3,0–5,0
Lepidochitona cinerea	++	+++	2,0–10,0
Bivalvia			
Mytilaster lineatus	++++	++++	1,5–15,0
Mytilus galloprovincialis	+	+	1,5–10,0
Gibbomodiola adriatica	+	–	3,0–4,0
Anadara kagoshimensis	+	–	6,0–10,0
Parvicardium exiguum	+	–	4,0–6,0
Pholas dactylus	–	+	2,0
Ostrea edulis*	+	–	8,0–12,0

Примечание: * — объяснение в тексте

тонами) и рисунков на щитках и мантии моллюсков (рис. 2 А–К). При этом в разных бухтах одного района вариация окрасок различна. Например, в бухте Круглая (район 3) окраска хитонов более однородная (рис. 2 А, В, С) с преобладанием грязно-белой (рис. 2 А), тогда как в Голубой бухте (район 3) даже на одной особи рапаны можно обнаружить хитонов (до 5 экз.) различной окраски (рис. 2 D–К; на рис. 2 D два хитона длиной 3,2 и 9,2 мм один над другим). Такое различие окрасок *L. cinerea* связано, вероятно, с обеспеченностью пищи хитонов, как и других фитофагов, пигментами растительного происхождения — каротиноидами. Мы не располагаем прямыми данными учёта каротиноидов в теле хитонов, однако можем воспользоваться косвенными данными концентрации каротиноидов в теле рапаны, получающей их по трофической цепи из фитофагов. У *R. venosa* концентрация каротиноидов в гонадах увеличивается с возрастом и составляет для 3–6-летних особей в бухте Круглой 2,18–14,29, а в бухте Голубой — 9,07–57,04 мг·10⁻² г [18]. Более чем четырёхкратное превышение концентрации каротиноидов в тканях рапаны Голубой бухты является, очевидно, отражением различия концентраций этих пигментов в продуцентах бухт. Хитоны, являющиеся фитофагами, демонстрируют, соответственно, более широкий полиморфизм в окраске щитков и перинотума именно в Голубой бухте.

Несмотря на сомнения в наличии в фауне Чёрного моря третьего вида хитонов — *Lepidochitona caprearum* (= *Middendorffia caprearum* (Scacchi, 1836)) [12], его присутствие на раковинах рапаны подтверждено д. б. н. Б. И. Сиренко (ЗИН РАН, Санкт-Петербург) по нашим пробам, собранным в 2015 г. (район 3, глубина 3–5 м). В одной пробе (Голубая бухта) оказалась самка *L. caprearum* с недавно отложенными яйцами в жаберной борозде.

Семейство Acanthochitonidae. *Acanthochitona fascicularis* (рис. 2 L) встречен единично в районах 3 (бухты Голубая и Стрелецкая) и 4 (Алупка) исключительно на раковинах скальной формы рапаны на глубинах 2–4 м. На *R. venosa* обнаружены 16 экземпляров только взрослых особей *A. fascicularis* размером (l) 7,0–14,0 мм и средней массой 0,0125 г.

Bivalvia. Моллюски этого класса наиболее часто встречаются в консорции *R. venosa*. По нашим данным, здесь они представлены 7 видами, относящимися к 7 родам 5 семейств: Mytilidae, Arcidae, Cardiidae, Pholadidae и Ostreidae.

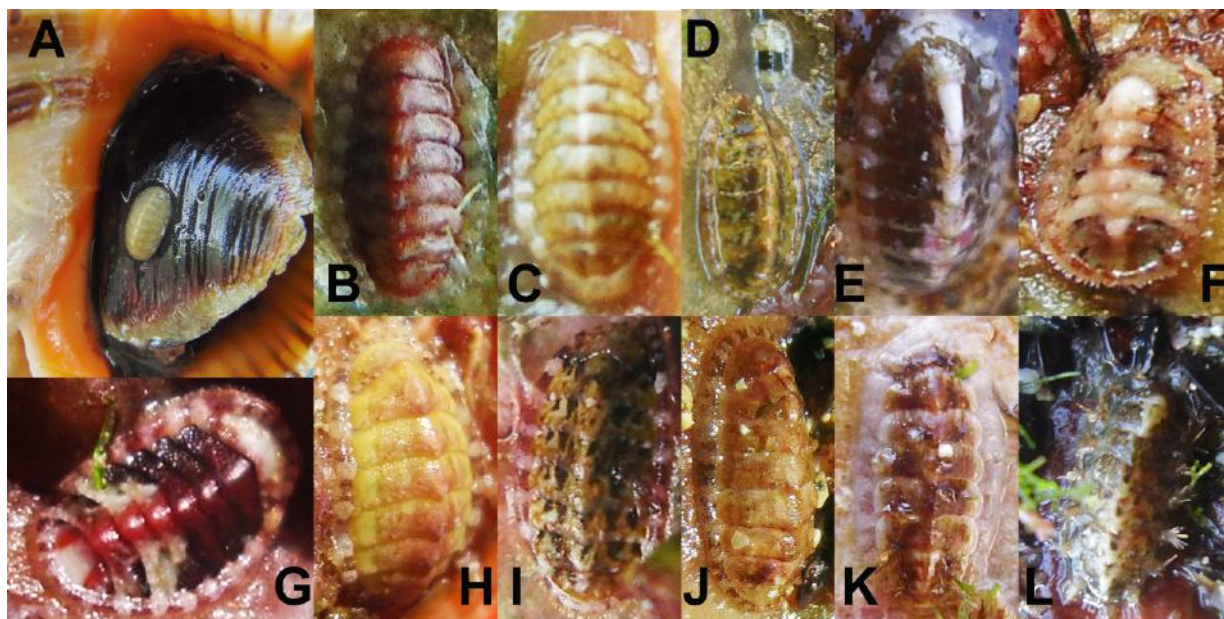


Рис. 2. Polyplacophora на поверхности крышечки (A) и раковин (B–L) *R. venosa* (без масштаба), район 3: A–K — разнообразие форм окрасок и рисунков у *L. cinerea* (A–C — бухта Круглая с глубины 2,0–3,0 м; D–K — бухта Голубая с глубины 2,0–4,5 м); L — *A. fascicularis* с характерной окраской, бухта Голубая, глубина 2,5 м

Fig. 2. Polyplacophora on the surface of *R. venosa* operculum (A) and shell (B–L) (without scale), region 3: A–K — diversity of color and patterns of *L. cinerea* (A–C — Kruglaya Bay at a depth of 2.0–3.0 m; D–K — Golubaya Bay at a depth of 2.0–4.5 m); L — *A. fascicularis* typical color, Golubaya Bay, depth of 2.5 m

Семейство Mytilidae. Среди моллюсков представители данного семейства — *Mytilaster lineatus* (Gmelin, 1791), *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) и *Gibbomodiola adriatica* (Lamarck, 1819) — являются наиболее часто встречающимися консортами рапаны. Все три вида в Чёрном море относятся к ценозообразующим [10], однако первые два могут формировать поселения как на твёрдых, так и рыхлых грунтах, а третий является фактически облигатным обитателем рыхлых грунтов [9]. В обрастании рапаны одиночные митилиды располагаются преимущественно в швах оборотов, в зоне пупка и в неровностях, создаваемых сессильными эпибионтами с известковым скелетом (балянусы, полихеты). Молодь митилид в незначительном количестве присутствует и на водорослевом обрастании рапаны.

Митилястер (*Mytilaster lineatus*). По нашим данным и по [8] этот вид доминирует среди митилид (как и двустворчатых моллюсков в целом) в консорции черноморской *R. venosa*, однако отсутствует в списке видов-эпибионтов рапаны в Средиземном море [20].

В районах 1 и 2 митилястер в консорции рапаны нами не обнаружен. В остальных районах его встречаемость на глубинах до 15 м составляет 50–75 %, что соответствует таковой по результатам предшествующих исследований [8].

Площадь покрытия раковины рапаны митилястером обычно составляет 2–20 %, иногда достигая 85 % с формированием плотных щёток (рис. 3). На *R. venosa* обычно преобладают (82 %) мелкоразмерные (до 3 мм) особи *M. lineatus*, особи с L до 1,0 мм составляют более 50 % всех моллюсков (рис. 4). При этом средняя масса митилястера — 0,05 г, а его общая масса в обрастании обычно не превышает 1,0–3,0 г (до 2–5 % массы рапаны). Возможно, что более крупные митилястеры выедаются рапаной при контакте с другими особями, поскольку являются одним из объектов её питания [4].

В популяции (район 7), где рапана имеет возможность питаться более крупными жертвами (анадара, мидия), *M. lineatus* достигает зрелого возраста и размера до 19,6 мм. Общая масса (134,2 г) обрастаний митилястером одного из экземпляров рапаны в этой популяции при 85 % покрытия (рис. 3)



Рис. 3. Экземпляр *R. venosa* (высота раковины — 89 мм), покрытый на 85 % щёткой *M. lineatus* (район 7, глубина 8 м)

Fig. 3. *R. venosa* specimen (shell height is 89 mm), covered 85 % by fetlock of *M. lineatus* (region 7, depth 8 m)

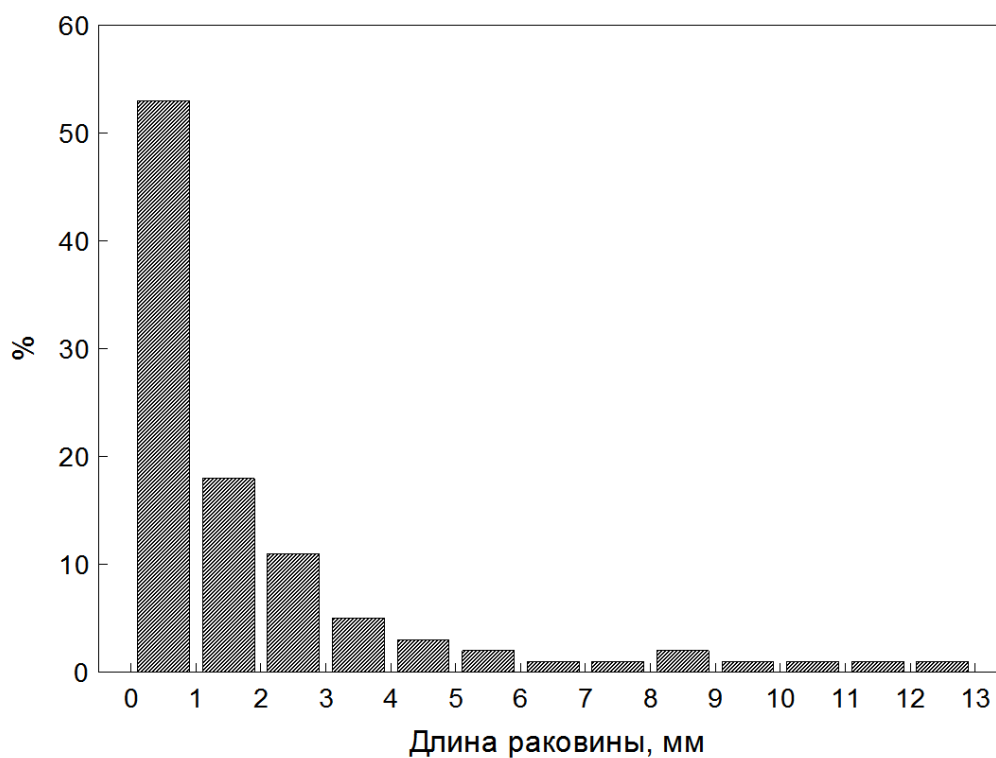


Рис. 4. Размерный ряд *M. lineatus* на раковинах *R. venosa* в районе 3

Fig. 4. Size range of *M. lineatus* on *R. venosa* shells in the investigated region 3

сопоставима с массой самой рапаны (155,1 г).

Мидия (*Mytilus galloprovincialis*) встречается, по нашим данным, в консорции черноморской рапаны редко: около 5–6 % на скальной рапане, до 3 % на песчаной рапане и в основном в виде одиночной молоди. На обеих морфах рапаны мидия обнаружена на глубинах до 10 м. В районе 3 размер мидий не превышает 10 мм (обычно до 3 мм), в районе 7 — до 18 мм. Более крупные мидии, вероятно, не удерживаются на рапане и перемещаются на грунт или выедаются хищником. В районах 1, 2, 4, 5 и 6

M. galloprovincialis в консорции рапаны не найдена.

По результатам предшествующих исследований [8], в Чёрном море *M. galloprovincialis* отмечена в 7 из 12 районов со встречаемостью в консорции рапаны 1–3 % (в шести районах) и 7 % (в районе о. Змеиный). В последнем районе мидия формирует промысловые запасы [21]. На рапане адриатической *M. galloprovincialis* является одним из самых распространённых видов-консорттов, её встречаемость составляет 78 % на скальной форме и 4 % — на песчаной [20].

Преобладание митилястера в консорции рапаны над мидией соответствует аналогичному современному соотношению данных видов в обрастаниях скал у берегов Крыма [13].

Модиола адриатическая (*Gibbomodiola adriatica*) не является типичным обрастателем твёрдых субстратов. Наличие биссуса позволяет ей формировать систему закоривания для удержания на поверхности илистых грунтов. С помощью этого же биссуса молодь *G. adriatica* способна некоторое время удерживаться на поверхности раковины рапаны после оседания из планктона [1]. На песчаной форме рапаны на глубине 3–4 м в районе 3 мы обнаружили два экземпляра молоди массой 0,010 г и 0,014 г (L — 5,5 и 6,0 мм соответственно).

Семейство Arcidae. Представитель семейства — анадара (*Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906)) — является недавним (с 1968 г.) вселенцем в Чёрное море. Первоначально он ошибочно приводился в сводках по Средиземному и Чёрному морю как *Anadara cornea* (Reeve, 1844) (= *Scapharca cornea* (Reeve, 1844)) и *Anadara inaequalis* (Bruguiere, 1789) (= *Scapharca inaequalis* (Bruguiere, 1789)) [14]. В настоящее время на отдельных участках побережья Чёрного моря анадара стала массовым ценообразующим видом бентоса [14] и, наряду с известными видами двустворчатых моллюсков (мидия, модиола, венус, питар), новым объектом питания рапаны [3, 14]. В условиях массового развития анадары на рыхлых грунтах в Керченском регионе (район 7) на раковинах рапаны нами найдены 3 экз. (2 + 1) *A. kagoshimensis* массой 0,397, 0,509 и 3,953 г (L — 11,8, 12,5 и 23,6 мм соответственно).

Предшествующими исследованиями [8] этот моллюск в консорции черноморской *R. venosa* не обнаружен. Среди эпибионтов скальной рапаны Адриатического моря присутствует другой вид анадары — *Anadara transversa* (Say, 1822) (= *Anadara demiri* (Piani, 1981)) [20] со встречаемостью 3 %.

Семейство Cardiidae. Три экземпляра *Parvicardium exiguum* (Gmelin, 1791) длиной до 5 мм и общей массой 0,014 г обнаружены на двух особях песчаной *R. venosa* в бухте Голубой (район 3) на глубине 4–6 м. В консорции рапаны этот вид отмечен впервые. В Чёрном море парвикардиум относится к типичным представителям фауны рыхлых грунтов, однако, при наличии относительно слабо развитого биссуса [1], [19], иногда встречается в составе эпифитона [11].

Семейство Pholadidae. Один экземпляр *Pholas dactylus* Linnaeus, 1758 длиной 8 мм обнаружен в раковине рапаны из района 6 (Карадаг, скала Золотые ворота) в 2007 г. (сборы Гринцова В. А.). Данный вид моллюсков, относящийся к камнеточцам, наряду с губкой клионой представляет паразитарную составляющую и для индивидуальной консорции черноморской рапаны указывается впервые.

Семейство Ostreidae. На раковинах черноморской рапаны из сборов от начала 1960-х до конца 1970-х гг. с глубин 10–12 м, имеющих в распоряжении авторов, присутствуют створки *Ostrea edulis* Linnaeus, 1758 размером до 4,5 см. Встречаемость створок устриц составляет 30 %, площадь покрытия варьирует от 5 до 25 % (средняя 15 %). В современных обрастаниях черноморской рапаны устрицы не обнаружены [8], что подтверждено и нашими исследованиями. Данный факт связан с резким сокращением черноморской популяции *O. edulis* во второй половине XX века, в итоге определившим включение вида в Красные книги Украины, Крыма и Севастополя [15]. При условии восстановления популяций *O. edulis* и (или) при дальнейшем развитии марикультуры *S. gigas* эти устрицы могут занять место в консорции *R. venosa* Чёрного моря. В Адриатике устрицы *O. edulis* и *Magallana gigas* (Thunberg, 1793) (= *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793)) являются одними из характерных представителей двустворчатых моллюсков-эпибионтов рапаны. Устричный спат там присутствует на 49 % скальной и 8 % песчаной рапаны [20].

Заключение. По результатам исследований, в составе консорции, ядром которой является *R. venosa*, хитоны (Polyplacophora) представлены 3 видами 2 родов 2 семейств, двустворчатые моллюски (Bivalvia) — 7 видами 7 родов 5 семейств.

Консорция черноморской рапаны, обитающей на рыхлых и скальных грунтах, отличается по таксономическому составу и количеству моллюсков. Хитоны, приспособленные к жизни в прибойной зоне, чаще встречаются на рапане, обитающей на прибрежных скалах и камнях. Большинство двустворчатых моллюсков имеет достаточно прочную связь с ядром консорции, прикрепляясь биссусом к поверхности раковины рапаны. Среди двустворчатых моллюсков наиболее типичными представителями в консорции рапаны являются митилиды *M. galloprovincialis* и *M. lineatus*, обладающие наиболее развитой системой биссусного прикрепления к твёрдому субстрату. Благодаря такой способности митилястер широко распространён на прибрежных скальных грунтах и наиболее часто встречается в консорции рапаны Чёрного моря. Мидии на настоящем этапе развития черноморской экосистемы на прибрежных скалах встречаются довольно редко, чем объясняется их незначительное участие в консорции *R. venosa*. Остальные двустворки, обнаруженные в консорции рапаны, имеют более слабый (*G. adriatica*), чем у мидии и митилястера, или менее развитый (*A. kagoshimensis*, *P. exiguum*), чем у митилид, биссусный аппарат. В отличие от биотопа скал прибойной зоны, на рыхлых грунтах, где гидродинамика ослаблена, такие моллюски способны лучше удерживаться на раковине рапаны, что определяет большее видовое разнообразие Bivalvia в консорции соответствующей экоформы *R. venosa*.

Степень и длительность взаимодействия моллюсков-консортотрофов с ядром сообщества различна. Для панцирных моллюсков раковина рапаны является едва ли ни единственным субстратом для существования в зоне развития рыхлых грунтов. Наличие на раковинах *R. venosa* как взрослых особей хитонов с отложенными яйцами, так и их молоди позволяет предположить, что в пределах консорции рапаны они способны осуществлять почти полный жизненный цикл за исключением стадии личинки. В отдельных случаях двустворки (*M. lineatus*) могут достигать половой зрелости и участвовать в процессе размножения вида.

Из рассмотренных моллюсков только один редко встречающийся вид *P. dactylus* является паразитом рапаны, повреждающим её раковину. В большинстве случаев влияние моллюсков-консортотрофов на её жизнедеятельность незначительно. Обычно их общая масса не превышает 10 % живой массы рапаны. Только в редких случаях масса моллюсков-обрастателей сопоставима с массой самой рапаны, что должно, несомненно, создавать трудности для полноценного осуществления жизненных функций последней.

По мере развития марикультуры и улучшения экологической обстановки в бассейне Чёрного моря есть перспектива появления в консорции рапаны *S. gigas* и восстановления присутствия в ней *O. edulis*.

Таксономическое разнообразие видов-консортотрофов, разнообразие связей внутри консорции *R. venosa* и широкое распространение вида — ядра консорции определяют необходимость дальнейшего изучения этого элемента морской экосистемы.

Работа выполнена в рамках госзадания ФГБУН ИМБИ по теме «Мониторинг биологического разнообразия гидробионтов Черноморско-Азовского бассейна и разработка эффективных мер по его сохранению» (гос. рег. № 115081110013).

Благодарность. Авторы признательны д. б. н. Б. И. Сиренко (ЗИН РАН, г. Санкт-Петербург) за идентификацию панцирного моллюска *L. caprearum* и к. б. н. Гринцову В. А. (ФГБУН ИМБИ, г. Севастополь) за предоставленный материал по *P. dactylus*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Багдасарян К. Г., Татишвили К. Г., Казахшвили Ж. Р., Мухелишвили Л. В., Бадзошвили Ц. И., Ахвелидиани Е. Г., Жгенти Е. М.,

Тактакишвили И. Г., Квалиашвили Г. А. *Справочник по экологии морских двустворок. Образ жизни двустворчатых моллюсков, принадлежащих к родам, представленным в морских и солоноватоводных отложениях*

- юга СССР / отв. ред.: Л. Ш. Давиташвили, Р. Л. Мерклин. Академия Наук Грузинской ССР, Институт палеобиологии. Москва: Наука, 1966, 350 с. [Bagdasaryan K. G., Tatishvili K. G., Kazahashvili Zh. R., Mushelishvili L. V., Badzoshvili Ts. I., Ahvelidiani E. G., Zhgenti E. M., Taktakishvili I. G., Kvaliashvili G. A. *Spravochnik po ekologii morskikh dvustvorok. Obraz zhizni dvustvorchatykh mollyuskov, prinaldhashchikh k rodam, predstavlenym v morskikh i solonovatovodnykh otlozheniyakh yuga SSSR* / L. Sh. Davitashvili, R. L. Merklin (Eds.). Akademiya Nauk Gruzinskoi SSR, Institut paleobiologii. Moscow: Nauka, 1966, 350 p. (in Russ.)].
2. Бондарев И. П. Морфогенез раковины и внутривидовая дифференциация рапаны *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) // *Ruthenica*. 2010. Т. 20, № 2. С. 69–90. [Bondarev I. P. Shell morphogenesis and intraspecific differentiation of *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846). *Ruthenica*, 2010, vol. 20, no. 2, pp. 69–90. (in Russ.)].
 3. Бондарев И. П. Особенности питания и перспективы развития рапаны *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) в Чёрном море // *Вопросы сохранения биоразнообразия водных объектов: материалы Междунар. конф. (Ростов-на-Дону, 27 ноября 2015 г.)*. Ростов-н/Д.: ФГБНУ «АзНИИРХ», 2015. С. 44–48. [Bondarev I. P. Feeding habits and development prospects of rapa – whelk *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) in the Black Sea. In: *Voprosy sokhraneniya bioraznoobraziya vodnykh ob'ektov: materialy Mezhdunar. konf., (Rostov-on-Don, 27 Nov. 2015)*. Rostov-n/D.: FGBNU “AzNIIRKH”, 2015, pp. 44–48. (in Russ.)].
 4. Бондарев И. П. Структура популяций *Rapana venosa* (Gastropoda, Muricidae) Севастопольских бухт (Чёрное море) // *Морской биологический журнал*. 2016. Т. 1, № 3. С. 14–21. [Bondarev I. P. Structure of *Rapana venosa* (Gastropoda, Muricidae) population of Sevastopol bays (the Black Sea). *Morskoj biologicheskij zhurnal*, 2016, vol. 1, no. 3, pp. 14–21. (in Russ.)]. doi: [10.21072/mbj.2016.01.3.02](https://doi.org/10.21072/mbj.2016.01.3.02).
 5. Бондарев И. П. Экологические связи рапаны (*Rapana venosa* Valenciennes, 1846) с представителями ихтиофауны в Чёрном море // *Морской биологический журнал*. 2016. Т. 1, № 4. С. 76–77. [Bondarev I. P. Environmental relations *Rapana* (*Rapana venosa* Valenciennes, 1846) with the ichthyofauna in the Black Sea. *Morskoj biologicheskij zhurnal*, 2016, vol. 1, no. 4, pp. 76–77. (in Russ.)]. doi: [10.21072/mbj.2016.01.4.10](https://doi.org/10.21072/mbj.2016.01.4.10).
 6. Бондарев И. П., Ревков Н. К. Консорты брюхоногого моллюска *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) в северной части Чёрного моря. Часть I: Porifera, Cnidaria, Bryozoa, Chordata // *Морской биологический журнал*. 2017. Т. 2, № 2. С. 20–33. [Bondarev I. P., Revkov N. K. Consorts of Gastropod *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) in the Northern Black Sea. Part I: Porifera, Cnidaria, Bryozoa, Chordata. *Morskoj biologicheskij zhurnal*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 20–33. (in Russ.)]. doi: [10.21072/mbj.2017.02.2.02](https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.2.02).
 7. Голиков А. Н., Старобогатов Я. И., Скарлато О. А. Тип моллюски – Mollusca // *Определитель фауны Чёрного и Азовского морей*. Киев : Наукова думка, 1972. Т. 3. С. 60–249. [Golikov A. N., Starobogatov Ya. I. Tip mollyuski — Mollusca. In: *Opredelitel' fauny Chernogo i Azovskogo morei*. Kiev: Naukova dumka, 1972, vol. 3, pp. 60–249 (in Russ.)].
 8. Емельянов И. Г., Комиссарова М. С., Марченко В. С. Консортивные связи инвазионного вида гастропод *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) на шельфе Чёрного моря. (Консортивные зв'язки інвазійного виду гастропод *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) на шельфі Чорного моря) // *Екологія та ноосферологія*. 2010. Т. 21, № 3–4. С. 92–97. [Emel'yanov I. G., Komisarova M. S., Marchenko V. S. Consorting correlation of the invasive species *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) in the shelf area of the Black Sea. *Ecologiya i Noosferologiya*, 2010, vol. 21, no. 3–4, pp. 92–97. (in Ukrainian)].
 9. Заика В. Е., Валовая Н. А., Повчун А. С., Ревков Н. К. *Митилиды Чёрного моря*. Киев: Наукова думка, 1990, 208 с. [Zaika V. E., Valovaya N. A., Povchun A. S., Revkov N. K. *Mitilidy Chernogo morya* (Mussels of the Black

- Sea). Kiev: Naukova dumka, 1990, 208 p. (in Russ.)). doi: [10.13140/RG.2.1.1765.6804](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1765.6804).
10. Киселёва М.И. *Бентос рыхлых грунтов Чёрного моря*. Киев: Наукова думка, 1981. 168 с. [Kiselyova M. I. *Bentos rykhlykh gruntov Chernogo morya*. Kiev: Naukova dumka, 1981, 168 p. (in Russ.)].
11. Маккавеева Е.Б. *Беспозвоночные зарослей макрофитов Чёрного моря*. Киев : Наукова думка, 1979. 228 с. [Makkaveeva E. B. *Bespozvonochnye zaroslei makrofитov Chernogo morya*. Kiev: Naukova dumka, 1979, 228 p. (in Russ.)].
12. Ревков Н.К. Макрозообентос. Таксономический состав донной фауны Крымского побережья Чёрного моря // *Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма (Черноморский сектор)*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. С. 209–218, 326–338. [Revkov N. K. Macrozoobenthos. Taxonomical composition of the bottom fauna at the Black Sea Crimean coast. In: *Sovremennoe sostoyanie bioraznoobraziya prirodnikh vod Kryma (Chernomorskii sektor)*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2003, pp. 209–218, 326–338. (in Russ.)].
13. Ревков Н.К. Макрозообентос Украинского шельфа Чёрного моря. Современное состояние зооресурсов бентали Азово-Черноморского бассейна // *Промысловые биоресурсы Чёрного и Азовского морей*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. С. 140–162. [Revkov N. K. Makrozoobentos Ukrainского shelfa Chernogo morya. Sovremennoe sostoyanie zooresursov bentali Azovo-Chernomorskogo basseina. In: *Promyslovye resursy Chernogo i Azovskogo morei*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2011, pp. 140–162. (in Russ.)]. doi: [10.13140/RG.2.1.4583.7280](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4583.7280).
14. Ревков Н.К. Особенности колонизации Чёрного моря недавним вселенцем – двустворчатым моллюском *Anadara kagoshimensis* (Bivalvia: Arcidae) // *Морской биологический журнал*. 2016. Т. 1, № 2. С. 3–17. [Revkov N. K. Colonization's features of the Black Sea basin by recent invader *Anadara kagoshimensis* (Bivalvia: Arcidae). *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2016, vol. 1, no. 2, pp. 3–17. (in Russ.)]. doi: [10.21072/mbj.2016.01.2.01](https://doi.org/10.21072/mbj.2016.01.2.01).
15. Ревков Н.К., Пиркова А.В. Устрица европейская. *Ostrea edulis* Linnaeus, 1758 // *Красная книга Республики Крым. Животные*. Симферополь : ООО «ИТ «АРИАЛ», 2015. С. 38. [Revkov N. K., Pirkova A. V. Ustritsa evropeiskaya. *Ostrea edulis* Linnaeus, 1758. In: *Red book of the Republic of Crimea. Animals*. Simferopol: PP “ARIALB” LLC, 2015, p. 38. (in Russ.)].
16. Чухчин В.Д. *Экология брюхоногих моллюсков Чёрного моря*. Киев: Наукова думка, 1984. 176 с. [Chukhchin V. D. *Ekologiya bryukhonogikh mollyuskov Chernogo morya*. Kiev: Naukova dumka, 1984, 176 p. (in Russ.)].
17. Bondarev I. P. Dynamics of *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) (Gastropoda: Muricidae) population in the Black Sea. *International Journal of Marine Science*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 42–56. doi: [10.5376/ijms.2014.04.0003](https://doi.org/10.5376/ijms.2014.04.0003).
18. Bondarev I. P., Malakhova L. V. The total concentration of carotenoids in *Rapana venosa* gonad. *International Journal of Marine Science*, 2016, vol. 6, no. 11, pp. 1–7. doi: [10.5376/ijms.2016.06.0011](https://doi.org/10.5376/ijms.2016.06.0011).
19. Petersen G. H., Russell P. J. C. *Cardium hauniense* compared with *C. exiguum* and *C. glaucum*. *Journal of Molluscan Studies*, 1971, vol. 39, iss. 6, pp. 409–420 doi: [10.1093/oxfordjournals.mollus.a065123](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.mollus.a065123).
20. Savini D., Castellazzi M., Favruzzo M., Occhipinti-Ambrogi A. The alien mollusk *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846; GASTROPODA, MURICIDAE) in the northern Adriatic Sea: population structure and shell morphology. *Chemical Ecology*, 2004, no. 20, pp. 411–424. doi: [10.1080/02757540310001629242](https://doi.org/10.1080/02757540310001629242).
21. Snigirov S., Medinets V., Chichkin V., Sylantyev S. Rapa whelk controls demersal community structure off Zmiinyi Island, Black Sea. *Aquatic Invasions*, 2013, vol. 8, iss. 3, pp. 289–297. doi: [10.3391/ai.2013.8.3.05](https://doi.org/10.3391/ai.2013.8.3.05).

**CONSORTS OF GASTROPOD *RAPANA VENOSA* (VALENCIENNES, 1846)
IN THE NORTHERN BLACK SEA.
PART II: MOLLUSCA (POLYPLACOPHORA, BIVALVIA)**

I. P. Bondarev, N. K. Revkov

Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS, Sevastopol, Russian Federation

E-mail: igor.p.bondarev@gmail.com

The study of mollusks-symbionts of the predatory gastropod *Rapana venosa* is a continuation of the work on the description of the taxonomic composition of the epibiont complex formed on the shell of the rapana. Modern studies of invasive gastropods *R. venosa* show that the ecological role of this species is not reduced only to predation. On a fairly large rapana shell a specific complex of organisms-epibionts considered as a consortium can be formed, the core of which is *R. venosa*. The consort of the gastropod mollusk-invader *R. venosa* is poorly understood and unaccounted for link in benthic communities and the ecosystem of the Black Sea shelf. In order to study the rapana consortian community, sampling were conducted in 7 regions of the Northern part of the Black Sea: 1 – Mamaya, Romania; 2 – the north-western part of the Black Sea, Crimean sector; 3 – Sevastopol, 4 – Alupka, 5 – Yalta – Alushta, 6 – Karadag, 7 – Kerch Strait. The sampling of *R. venosa* in the coastal zone to a depth of 15 m was carried out with the use of light-diving equipment, while in the deeper zone (up to 40 m), the “Ocean-50” bottom grab was used on board of the RV “Professor Vodyanitsky”. The collection of specimens was carried out totally, each sample was placed in a separate plastic bag indicating the collection region, depth and biotope. Along with the collection of mollusks, visual observations and photographic fixation of hydrobionts *in situ* were carried out. A total 890 specimens of *R. venosa* were sampled and analyzed. Compared with previous studies, the taxonomic list of consonant mollusks of *R. venosa* has been significantly expanded. The mollusc-consorts found on rapana have been classified into three classes: Polyplacophora, Bivalvia, Gastropoda. In this part of the investigation Polyplacophora, presented in a consortium of 3 species of 2 genera of 2 families, and Bivalvia, 7 species of 7 genera of 5 families, were considered. It was found that mollusks are an important component of the consortium of rapana. On rocky rapana ecomorph chitons were observed at a frequency of up to 25 %, on sandy rapana — up to 10 %, in the consortium of rapans as a whole chitons were found in around 12 % frequency. More than 80 % of the all chitons total number on rapana is in *Lepidochitona cinerea*. The occurrence of Bivalvia in most of the investigated regions is 50–75 %. The area of covering the shell of rapana with bivalves is usually 2–20 %, sometimes reaching 85 %. The most common species of bivalves and mollusks as a whole in the consortium of the Black Sea rapana is the *Mytilaster lineatus*. Most Bivalvia have a close relationship with the core of the consortium attaching to the surface of the shell of the rapana, and at the earliest stages and to the surface of the epiphytes. Representatives of Polyplacophora are confined mainly to the rocky form of rapana, while Bivalvia show a greater species diversity in the consociation of the ecomorph *R. venosa* of loose grounds (6 species) than the rocky form (3 species). Differences in the taxonomic composition of epibionts and the percent coverage of the shell of the two ecoforms of *R. venosa* are predominantly determined by specific dynamic impact of the water mass in the zones of development of rocky and loose grounds.

Keywords: consortium, ecology, epibionts, Mollusca, Polyplacophora, Bivalvia, Black Sea

УДК 574.586:62-757.7

ФОРМИРОВАНИЕ БИООБРАСТАНИЯ В СТРУКТУРИРОВАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ ИСКУССТВЕННЫХ РИФОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© 2017 г. **А. В. Празукин**, д-р. биол. наук, вед. н. с., **Ю. К. Фирсов**, канд. биол. наук, с. н. с.,
Р. И. Ли, н. с., **В. В. Холодов**, вед. инж.

Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

E-mail: prazukin@mail.ru

Поступила в редакцию 22.05.2017 г. Принята к публикации 01.08.2017 г.

В статье обсуждаются вопросы, связанные с возможностью управления биообрастанием через структуру искусственных рифовых конструкций (ИРК), и вопросы пространственной организации растительных покровов, формируемых на ИРК, что является актуальным при решении задач культивирования гидробионтов на твёрдых субстратах. ИРК представляет собой частокор вертикальных структур цилиндрической формы ($d_i = 0,33$ см, $l_i = 20$ см) на горизонтально расположенной пластине $S_0 = a_1 \cdot a_2 = 900$ см². Частокор охватывает пространство ($V_r = 0,018$ м³), одна часть которого занята вертикальными структурами ($\sum V_i = V_i \cdot n$, где n — общее количество осевых структур на горизонтальной поверхности модуля), а другая свободна от них ($V_f = V_r - \sum V_i$). Задавались три варианта плотности расположения вертикальных структур (n/S_0): 544, 3956 и 10 678 экз·м⁻² — и, соответственно, три варианта величины концентрации их площади поверхности в границах объёма ИРК ($C_s = (\sum S_i) / V_r$): 0,056, 0,295 и 1,106 см⁻¹. В течение 43 суток (с 27 мая по 9 июля 2014 г.) ИРК экспонировались в прибрежной акватории бухты Севастополя (Чёрное море) на глубине 2 м. Температура воды в море варьировала в пределах +23,3...+25,6 °С. Пробы отбирали каждые 6–8 суток. В составе биообрастания по массе преобладали диатомовые водоросли, присутствовали проростки многоклеточных водорослей, из животных встречались гидроиды, мшанки, спирорбисы, личинки баянусов. На 7-е сутки экспозиции на поверхности ИРК при «редком» (544 экз·см⁻²) и «плотном» (10 678 экз·см⁻²) расположении структур идентифицирован 51 вид диатомовых водорослей, из которых только 15 видов (каждый по отдельности) вносят заметный (> 5 %) вклад в общую численность (n_i , %) и биомассу (W_i , %) сообщества на отдельно взятых участках вертикальных структур. К ним относятся: *Achnanthes longipes*, *Amphora hyalina*, *Berkeleya rutilans*, *Cylindrotheca closterium*, *Entomoneis paludosa*, *Haslea ostrearia*, *Licmophora abbreviata*, *L. hastata*, *Neosynedra provincialis*, *Nitzschia sigma*, *N. tenuirostris*, *Parlibellus delognei*, *Pleurosigma elongatum*, *Proboscidea insecta*, *Trachyneis aspera*. Значения коэффициентов Сёренсена — Чекановского ($K_{sc} = 0,7$) и Стюгrena — Радулеску ($P_{sr} = -0,077$) указывают на очень близкое сходство систематического состава сравниваемых сообществ. На рассматриваемом отрезке времени выделяются четыре характерных этапа в изменении величины плотности обрастания вертикальных структур (W/S_i , где W — сухая биомасса обрастания, S_i — площадь поверхности осевой структуры). Условно первый этап завершается седьмым днём наблюдения, и к этому моменту на верхушках структур, независимо от плотности их расположения, создаётся примерно одинаковая плотность обрастания (0,51–0,91 мг (сухой массы) · см⁻²), а в срединной части ИРК она сильно различается (0,03–0,57 мг (сухой массы) · см⁻²). Второй этап (7–21-е сутки) характеризуется низкими величинами скорости изменения биомассы на единицу обрастаемой поверхности и меняющимся вектором её направленности (0,003–0,08, 0,25, -0,17 мг (сухой массы) · сут⁻¹ · см⁻²) и относительно невысокими значениями W/S_i (0,36–2,23 мг (сухой массы) · см⁻²). Третий этап отличается быстрым увеличением плотности обрастания (0,30–0,75 мг (сухой массы) · сут⁻¹ · см⁻²). Максимум W/S_i (3,09–9,07 мг (сухой массы) · см⁻²) достигается на 29-е и 36-е сутки экспозиции. Четвёртый этап проявляется снижением W/S_i и не может рассматриваться как закономерный: он является следствием

действия внешних факторов среды (подвижности воды). Рассмотрено вертикальное распределение сухой биомассы биообрастаний (W/S_i) вдоль осевых структур при разной плотности их расположения на 7, 14, 21, 29, 36-е и 43-и сутки эксперимента. Общая картина вертикального распределения W/S_i на 29-е и 43-и сутки была сходной: с увеличением плотности размещения вертикальных структур максимум биомассы обрастателей смещается в сторону верхней границы ИРК. На конструкциях с редким расположением структур максимум биомассы отмечен в срединной части растительного полога, при «частом» ($3956 \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$) расположении основная часть биомассы ($83,5\text{--}73,8 \%$) сосредоточена в верхней половине растительного полога, а при плотном — в верхнем двухсантиметровом слое ($63,9\text{--}79,3 \%$). Рассмотрена связь величин концентрации сухой массы биообрастания в объёме обитаемого пространства ($C_w = (\sum W_i) / V_f$) и концентрации физической поверхности ИРК (C_s) по отношению к верхнему двухсантиметровому слою ИРК (1) и по отношению ко всему объёму рифовой конструкции (2) при высоте вертикальных структур в 20 см, на 29-е сутки эксперимента ((1): $C_w = -0,232 + 7,136C_s$, $R^2 = 0,99$; (2): $C_w = 0,084 + 2,652C_s$, $R^2 = 0,93$). Показано, что при высоте вертикальных структур в 20 см с увеличением значений C_s усиливается экранирующее действие как со стороны структур конструкции, так и со стороны биообрастаний, что приводит к частичному световому и биогенному лимитированию роста биообрастателей и, следовательно, к «недобору» биомассы в соответствующем объёме пространства конструкции.

Ключевые слова: биообрастание, фитообрастание, колонизация, фитоценоз, диатомовые водоросли, искусственные рифы, растительный полог, обитаемое пространство, сообщества твёрдых субстратов

Проблема колонизации твёрдых тел бентосными организмами существует давно и рассматривается разносторонне [1, 3, 4, 6, 7, 9, 17–19, 21, 23, 29, 32–35]. Один из обсуждаемых вопросов связан с возможностью управлять зоо- и фитообрастанием через структуру искусственных рифовых конструкций (ИРК) [10, 12, 15, 24–28, 30, 31], что является актуальным при решении задач культивирования гидробионтов на твёрдых субстратах. В этой связи структурированность пространства и соотношение величин площади обрастаемой поверхности и объёма обитаемого пространства являются неотъемлемыми характеристиками любой рифовой конструкции. Интересным считается и вопрос, связанный с пространственной организацией растительных покровов, формируемых на ИРК [11, 12, 15, 16].

В настоящей статье мы попытаемся ответить на обозначенные выше вопросы, используя для этого искусственные рифовые конструкции с заданными геометрическими характеристиками [10, 12, 15, 24].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

С физической точки зрения ИРК (модуль) представляет собой комбинацию жёстких структурных элементов (в нашем случае — из частокола вертикальных структур цилиндрической формы, $d_i = 0,33$ см, $l_i = 20$ см, и горизонтально расположенной пластины), изготовленных из нетоксичной пластмассы (рис. 1). Частокол вертикальных осевых структур своим расположением охватывает пространство ($V_r = a_1 \cdot a_2 \cdot l_i$, где $a_1 = a_2 = 30$ см), одна часть которого занята вертикальными структурами ($\sum V_i = V_i \cdot n$, где n — общее количество вертикальных структур на горизонтальной поверхности модуля), а другая свободна от них ($V_f = V_r - \sum V_i$). Показатель плотности расположения вертикальных структур на единицу горизонтальной поверхности модуля (n/S_0 , $S_0 = a_1 \cdot a_2 = 900 \text{ см}^2$) задавался в трёх вариантах: «редкое» расположение структур — $544 \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$, ИРК № 1; «частое» расположение структур — $3956 \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$, ИРК № 2; «плотное» расположение структур — $10\,678 \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$, ИРК № 3. В соответствии с этими вариантами задавались общая поверхность вертикальных структур ИРК ($\sum S_i$, см^2) и величина концентрации их площади поверхности в границах объёма ИРК ($C_s = (\sum S_i) / V_r$): $0,056$, $0,295$ и $1,106 \text{ см}^{-1}$.

Экспозицию ИРК осуществляли в прибрежной акватории Чёрного моря (бухта Севастопольская, рис. 2) с постоянно действующим выпуском хозяйственно-бытовых сточных вод с 27 мая по 9 июля 2014 г. (в течение 43 суток). ИРК размещались на общей горизонтальной платформе, на глубине 2 м, на участке, защищённом от прямого действия штормовых волн. Температура воды с 27 мая по 17 июня (первые 20 дней эксперимента) постоянно увеличивалась с $+20,4$ до $+25,6$ °C, затем снижалась и с 25 июня по 9 июля удерживалась в диапазоне от $+22,0$ до $+23,6$ °C (рис. 3).

С периодичностью 6–8 суток с каждой ИРК извлекали по две вертикальные структуры (оси), а на их место помещали новые, которые при последующих отборах проб не изымали.

По длине осевых структур в их верхней половине с шагом 0,5–1,0 см, а в нижней — с шагом 2,0–4,0 см выделяли участки, с которых снимали обрастания. Пробы, снятые с одной осевой структуры, высушивали при 105 °С и взвешивали с точностью до 0,001 мг, а пробы, снятые с другой оси, фиксировали спиртом для последующего определения в них видового состава одноклеточных водорослей и их количественных характеристик.

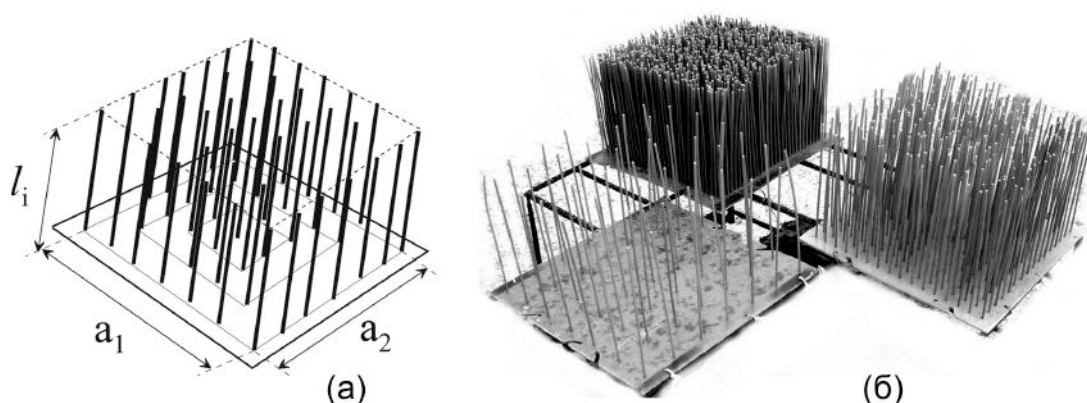


Рис. 1. Схема модуля искусственной рифовой конструкции (ИРК) (а). Модули ИРК с разной плотностью расположения вертикальных структур (10 678, 3956, 544 экз.·м⁻²) (б)

Fig. 1. Scheme of artificial reef structure module (а). Modules of artificial reef structures with different density of vertical structures (10 678, 3956, 544 copies per m²) (б)

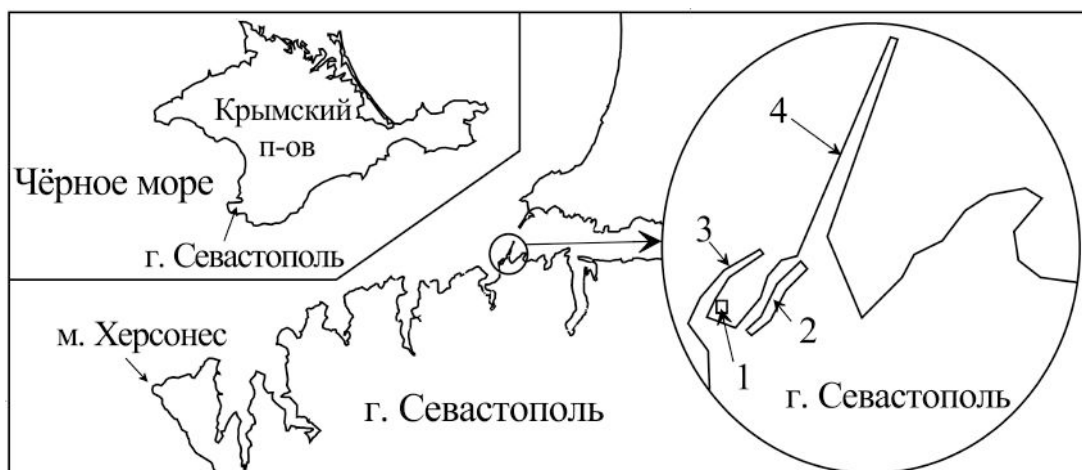


Рис. 2. Карта-схема места расположения искусственных рифовых конструкций (1) в прибрежной акватории г. Севастополя (44°36'56.11"N, 33°30'10.45"E). Аквариальный корпус Института морских биологических исследований имени А. О. Ковалевского РАН (2). Малый мол (3). Южный мол (4)

Fig. 2. Map-scheme of the location of artificial reef structures (1) in the coastal water area of Sevastopol (44°36'56.11"N, 33°30'10.45"E). The aquarium building of Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS (2). A small pier (3). South Pier (4)

Идентифицировали виды фитопланктона и определяли линейные размеры и численность в камере Горяева в 3–4 повторностях, под световым микроскопом «ЛОМО Микмед-2». Оценку биомассы микроводорослей проводили с помощью методики клеточного объёма, вычисленного по формулам геометрического подобия [2].

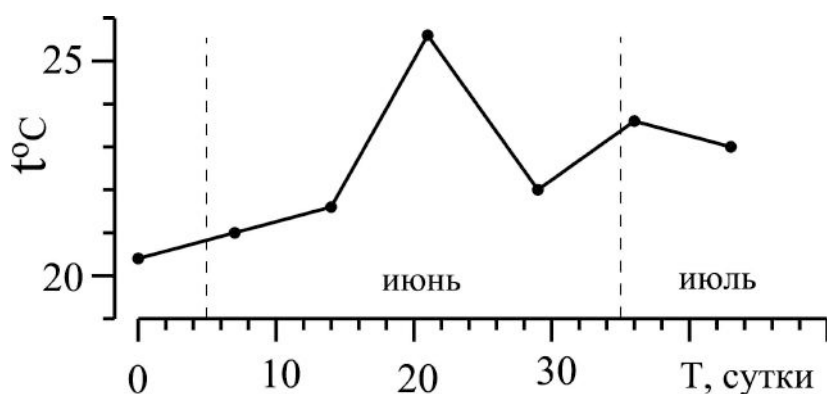


Рис. 3. Изменение температуры воды вблизи модулей искусственных рифовых конструкций за период их экспозиции в прибрежной акватории Севастопольской бухты

Fig. 3. Change in water temperature near the modules of artificial reef structures for the period of their exposure in the coastal water area of the Sevastopol Bay

Обрастание ИРК оценивали по количеству сухой массы на единицу обрастаемой поверхности вертикальной структуры (W/S_i , мг (сухой массы) $\cdot$ см $^{-2}$). Рассчитывали концентрацию сухой массы обрастания в объёме свободного пространства ИРК (C_w), представляющую отношение сухой массы обрастания ($\sum W_i$) к объёму свободного пространства ИРК (V_f): $C_w = (\sum W_i) / V_f$, мг (сухой массы) $\cdot$ см $^{-3}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Таксоны диатомовых водорослей ИРК с разной плотностью расположения вертикальных структур. В сообществе обрастаний ИРК по массе доминировали одноклеточные водоросли, преимущественно диатомовые. В рамках этой статьи мы ограничимся краткой характеристикой видового состава таксонов диатомовых водорослей двух рифовых конструкций: с редким (544 экз. $\cdot$ м $^{-2}$) и с плотным (10 678 экз. $\cdot$ м $^{-2}$) расположением вертикальных структур (рис. 1), сформированных на седьмой день экспозиции конструкций в море.

Таблица 1. Список диатомовых водорослей, обнаруженных на рифовых конструкциях с редким (ИРК № 1) и плотным (ИРК № 3) расположением вертикальных структур (рис. 1 б)

Table 1. A list of diatoms found on reef structures with a rare (ARS no. 1) and dense (ARS no. 3) arrangement of vertical structures (fig. 1 b)

№ п/п	Таксон	ИРК № 1	ИРК № 3
1.	<i>Achnanthes longipes</i> C. A. Agardh 1824	*	*
2.	<i>Amphora hyalina</i> Kützing 1844	*	*
3.	<i>Amphora</i> sp.	*	—
4.	<i>Ardissonea crystallina</i> (C. Agardh) Grunow 1880	*	—
5.	<i>Bacillaria paxillifera</i> (O. F. Müller) Hendey 1951	—	*
6.	<i>Berkeleya rutilans</i> (Trentepohl ex Roth) Grunow 1880	*	*
7.	<i>Berkeleya micans</i> (Lyngbye) Grunov 1868	*	—
8.	<i>Caloneis liber</i> (W. Smith) Cleve 1894	—	*
9.	<i>Chaetoceros</i> sp.	—	*
10.	<i>Climaconeis inflexa</i> (Brébisson ex Kützing) E. J. Cox 1982	*	—
11.	<i>Cocconeis costata</i> Gregory 1855	*	*
12.	<i>Cocconeis scutellum</i> Ehrenberg 1838	*	*

Продолжение на следующей странице...

№ п/п	Таксон	ИРК № 1	ИРК № 3
13.	<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenberg) Reimann et J. C. Lewin 1964	*	*
14.	<i>Diploneis subadvena</i> Hustedt 1937	—	*
15.	<i>Entomoneis paludosa</i> (W. Smith) Reimer 1975	*	*
16.	<i>Falcula media</i> var. <i>subsalina</i> Proschkina-Lavrenko 1963	*	—
17.	<i>Grammatophora marina</i> (Lyngbye) Kützing 1844	*	*
18.	<i>Grammatophora serpentina</i> (Ralfs) Ehrenberg 1844	—	*
19.	<i>Gyrosigma fasciola</i> var. <i>prolongatum</i> (W. Smith) Proschkina-Lavrenko 1950	*	*
20.	<i>Haslea ostrearia</i> (Gaillon) Simonsen 1974	*	*
21.	<i>Licmophora abbreviata</i> C. A. Agardh 1831	*	*
22.	<i>L. dalmatica</i> (Kützing) Grunow 1867	—	*
23.	<i>L. flabellata</i> (Carmichael ex Greville) C. A. Agardh 1831	*	*
24.	<i>L. hastata</i> Mereschk. 1901	*	*
25.	<i>L. paradoxa</i> (Lyngbye) C. Agardh 1828	*	*
26.	<i>Licmophora</i> sp.	—	*
27.	<i>Navicula cancellata</i> Donkin 1872	*	—
28.	<i>Navicula</i> sp.	—	*
29.	<i>Neosynedra provincialis</i> (Grunow) D. M. Williams et Round 1986	*	*
30.	<i>Nitzschia constricta</i> (Kützing) Ralfs 1861	—	*
31.	<i>N. hybrida</i> Grunov 1880	*	*
32.	<i>N. hybrida</i> f. <i>hyalina</i> Proschkina-Lavrenko 1963	*	*
33.	<i>N. longissima</i> (Brébisson ex Kützing) Grunov 1862	*	*
34.	<i>N. sigma</i> (Kützing) W. Smith 1853	*	*
35.	<i>N. tenuirostris</i> Mereschkowsky 1902	*	*
36.	<i>Nitzschia</i> sp.	—	*
37.	<i>Parlibellus delognei</i> (Van Heurck) E. J. Cox 1988	*	*
38.	<i>Pleurosigma elongatum</i> W. Smith 1852	*	*
39.	<i>Proboscia alata</i> (Brightwell) Sundström 1986	*	—
40.	<i>Proboscidea insecta</i> (Grunow ex A. W. F. Schmidt) Paddock et P. A. Sims 1980	*	*
41.	<i>Pseudo-nitzschia seriata</i> (Cleve) H. Peragallo et Peragallo 1899	—	*
42.	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	*	*
43.	<i>Pseudosolenia calcar avis</i> (Schaltze) B. G. Sundström 1986	—	*
44.	<i>Striatella delicatula</i> (Kützing) Grunov ex Van Heurck 1881	—	*
45.	<i>Striatella unipunctata</i> (Lyngbye) C. A. Agardh 1832	*	*
46.	<i>Synedra curvata</i> Proschkina-Lavrenko 1951	—	*
47.	<i>Tabularia fasciculata</i> (C. Agardh) D. M. Williams et Round 1986	*	*
48.	<i>Thalassiosira eccentrica</i> (Ehrenberg) Cleve emend Fryxell et Hasle 1972	—	*
49.	<i>Thalassiosira parva</i> Proschkina-Lavrenko 1955	*	—
50.	<i>Trachyneis aspera</i> (Ehrenberg) Cleve 1894	*	*
51.	<i>Undatella quadrata</i> (Brébisson ex Kützing) Paddock et P. A. Sims 1980	—	*

Полный список видов диатомовых водорослей, обнаруженных на обеих ИРК, содержит 51 вид и внутривидовой таксон (табл. 1), из которых только 15 видов вносят заметный (значимый, > 5 %) вклад (каждый по отдельности) в общую численность (n, %) и общую биомассу (W, %) диатомовых на отдельно взятых участках вертикальных структур (табл. 2). В сообществе ИРК с редким расположением вертикальных структур обнаружено 35 видов диатомовых водорослей, из них 8 видов встречаются исключительно на этой конструкции (табл. 1). На ИРК с плотным расположением вертикальных структур

обнаружено 43 вида диатомовых, из которых 15 видов характерны только для этого сообщества. Число видов, общих для двух сообществ, — 27. Значения рассчитанных коэффициентов Сёренсена — Чекановского ($K_{sc} = 0,69$) и Стюгrena — Радулеску ($P_{sr} = -0,08$) указывают на очень близкое сходство систематического состава сравниваемых сообществ.

Таблица 2. Список из 15 видов водорослей с соответствующими характеристиками, доля которых в общей численности (n_i , %) и массе (W_i , %) клеток диатомовых составляла пять и больше процентов хотя бы на одном отдельно взятом участке вертикальных структур ИРК

Table 2. A list of 15 species of algae with the corresponding characteristics, the proportion of which in the total number (n_i , %) and mass (W_i , %) of diatom cells was five or more percent, at least on one separate section of the vertical structures of the artificial reef structures (ARS)

Вид	Средний объём клетки, мкм ³	Плотность расположения опорных структур, экз·м ⁻²			
		544		10 678	
		n_i , %	W_i , %	n_i , %	W_i , %
<i>Cylindrotheca closterium</i>	8	6,7–23,1	*) –	–	–
<i>Nitzschia tenuirostris</i>	35	36,0–64,2	–	17,4–64,8	–
<i>Licmophora hastata</i>	41	–	–	5,6–9,2	–
<i>Licmophora abbreviata</i>	72	–	–	6,1–12,4	–
<i>Berkeleya rutilans</i>	141	5,2–6,7	–	11,5	–
<i>Neosynedra provincialis</i>	621	–	–	8,6	–
<i>Haslea ostrearia</i>	1221	4,8–5,0	5,0	4,7–15,9	4,5–7,4
<i>Parlibellus delognei</i>	1394	4,9–10	5,0–8,1	6,4–7,3	5,8
<i>Nitzschia sigma</i>	3387	–	5,0–7,5	–	–
<i>Amphora hyalina</i>	5099	–	22,4	5,0–5,2	4,5–11,6
<i>Entomoneis paludosa</i>	10 836	5,9–13,6	28,8–88,1	11,7–27,2	74,1–83,7
<i>Trachyneis aspera</i>	17 097	–	6,6	–	–
<i>Achnanthes longipes</i>	23 384	–	8,9	–	–
<i>Proboscidea insecta</i>	27 831	–	20,0	–	–
<i>Pleurosigma elongatum</i>	46 331	–	16,5	–	–

*) Незаполненная ячейка в таблице означает, что этот вид водорослей присутствует в пробе, но по численности или по массе не превышает 5%-ный порог

*) An unfilled cell in the table indicates that this species of algae is present in the sample, but it is either in number or in mass not exceeding 5 % threshold

В то же время сравнение сообществ по численности (n_i , %) и по массе (W_i , %) значимых видов (табл. 2) позволяет говорить о существенном их различии. На конструкциях с редким расположением структур формируются сообщества, у которых число значимых по численности (n , %) видов ограничено шестью, из них заметно выделяются четыре (*N. tenuirostris*, *C. closterium*, *E. paludosa*, *P. delognei*), и только один вид (*N. tenuirostris*) на всех участках осевой структуры доминирует (36,0–64,2 %). По биомассе (W , %) доминирующее положение занимает *E. paludosa* (28,8–88,1 %), и в этом случае список значимых видов расширяется до девяти. Выделяются четыре вида (*E. paludosa*, *A. hyalina*, *Pleurosigma elongatum*, *Proboscidea insecta*), вклад которых в общую биомассу сообщества на отдельных участках осевой структуры составляет более 10 %.

Структура таксоцена диатомовых ИРК с плотным расположением вертикальных структур заметно отличается от таковой на ИРК с редким расположением (описана выше). В первую очередь число значимых видов по численности (n_i , %) увеличивается до 9 за счёт повышения значимости 4 новых видов (*L. hastata*, *L. abbreviata*, *A. hyaline*, *N. provincialis*), и в то же время *C. closterium* перестаёт быть значимой (табл. 2). Наибольший вклад в общую численность таксоцена вносит *N. tenuirostris* (17,4–

64,8 %), и только в одной пробе из 7 первую строчку списка занимает *E. paludosa* (21,6 %). Этот же вид в остальных случаях был всегда вторым в списке (11–26 %).

Меняется и картина распределения видов по биомассе. Число значимых видов сокращается до 4 (*E. paludosa*, *A. hyalina*, *H. ostrearia*, *P. delognei*) вследствие исключения из списка значимых наиболее крупных по индивидуальной массе видов: *Pleurosigma elongatum*, *Proboscidea insecta*, *A. longipes*, *T. aspera*. Во всех семи пробах, отобранных с разных участков опорной структуры, по массе доминировала только *E. paludosa* (74,1–83,7 %).

2. Динамика биообрастания поверхности вертикальных структур ИРК с разной плотностью их расположения. На рис. 4 а представлены данные по динамике изменения количества сухой массы обрастания на единицу площади поверхности верхнего двухсантиметрового участка осевой структуры, а на рисунке 4 б — динамика той же характеристики, но по отношению к поверхности двухсантиметрового участка осевой структуры, расположенного в её серединной части на расстоянии 10 см от её верхушки. На рассматриваемом отрезке времени выделяются четыре характерных этапа в изменении величины плотности обрастания, W/S_i (рис. 4). Условно первый завершается седьмым днём наблюдения, и к этому моменту на верхушках вертикальных структур, независимо от плотности их расположения, создаётся примерно одинаковая плотность обрастания (0,51–0,91 мг (сухой массы) · см⁻²), а в серединной части осевой структур на рифовых конструкциях под номерами 1 и 2 значения W/S_i оказываются несколько ниже, чем на верхушках осей этих же конструкций (0,48 и 0,57 мг (сухой массы) · см⁻² соответственно), и существенно ниже (0,03 мг (сухой массы) · см⁻²) на ИРК при плотном расположении вертикальных структур.

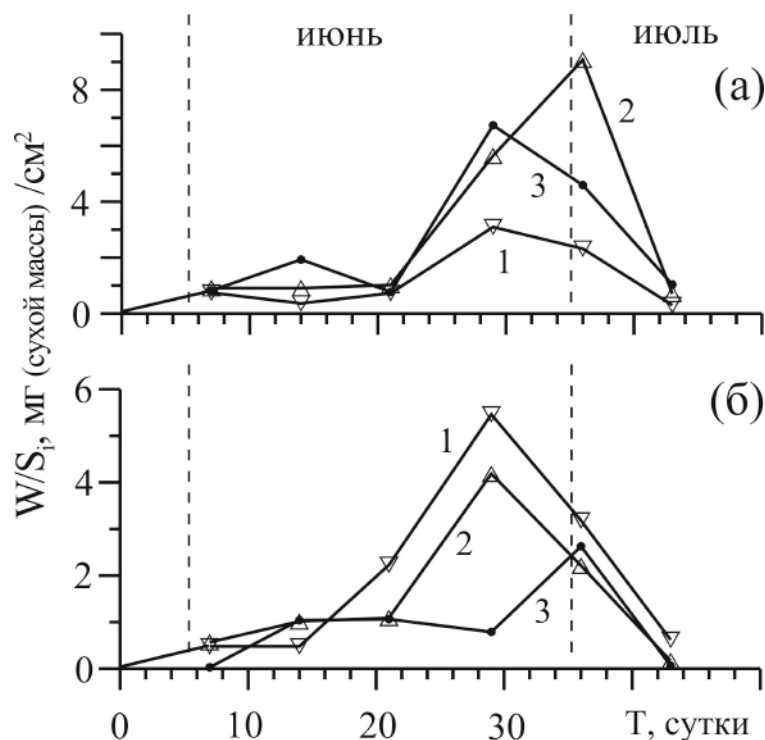


Рис. 4. Динамика изменения количества сухой массы обрастания на единицу площади поверхности (W/S_i) на верхнем двухсантиметровом участке осевой структуры (а) и на двухсантиметровом участке в её серединной части (б) при разной плотности расположения вертикальных структур: 544 (1), 3956 (2), 10 678 (3) экз. · м⁻²

Fig. 4. Dynamics of the change in the amount of dry fouling weight per unit surface area (W/S_i) at the upper two-centimeter section of the axial structure (a) and at the two-centimeter section in its middle part (б) at different density of vertical structures: 544 (1), 3956 (2), 10 678 (3) copies per m²

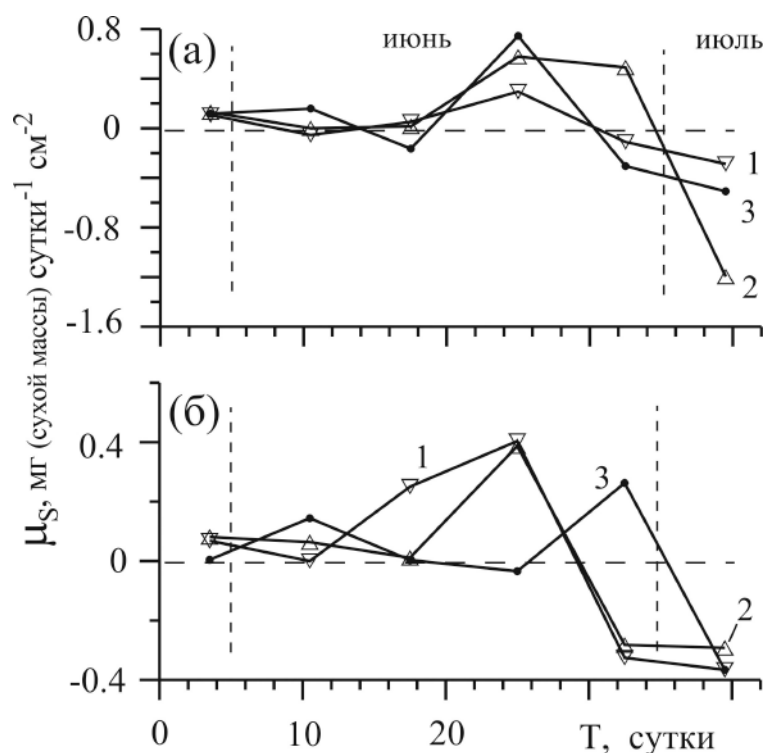


Рис. 5. Динамика скорости изменения количества сухой массы биообрастания на единицу площади поверхности ($\mu_s = \Delta W / (\Delta t \cdot S_i)$) на верхнем двухсантиметровом участке осевой структуры (а) и на двухсантиметровом участке в её срединной части (б) при разной плотности расположения вертикальных структур: 544 (1), 3956 (2), 10 678 (3) экз. $\cdot$ м $^{-2}$

Fig. 5. Dynamics of the rate of change in the amount of dry weight of biofouling per unit surface area ($\mu_s = \Delta W / (\Delta t \cdot S_i)$) on the upper two-centimeter section of the axial structure (a) and at the two-centimeter section in its middle part (б) at different density of vertical structures: 544 (1), 3956 (2), 10 678 (3) copies per m 2)

Второй этап формирования сообщества обрастания характеризуется низкими величинами скорости изменения биомассы на единицу обрастаемой поверхности (μ_s , рис. 5) и относительно невысокими значениями W/S_i (рис. 4). Для третьего этапа характерно быстрое увеличение плотности обрастания, причём на верхушках осевых структур, независимо от плотности их расположения, начало быстрого увеличения W/S_i приходится примерно на одно и то же время — на 21-е сутки от старта эксперимента (рис. 4 а), тогда как на участках срединной части вертикальных структур сроки начала третьего этапа во многом связаны с величиной плотности расположения вертикальных структур ИРК (рис. 4 б). Чем плотней располагаются вертикальные структуры на горизонтальной поверхности модуля, тем позже в середине стоящие оси начинают активно обрастать.

Четвёртый этап проявляется снижением W/S_i . Факт относительно быстрого снижения биомассы обрастателей на поверхности ИРК на 30–40-е сутки с начала экспозиции наблюдался нами и в других наших экспериментах [10, 15, 24], причём при дальнейшем пребывании конструкций в море происходило повторное увеличение значений W/S_i . При экспонировании ИРК больше 113 суток основная роль в формировании фитообрастания принадлежит многоклеточным водорослям [14].

3. Распределение плотности (W/S_i) сухой массы биообрастания по вертикальному профилю ИРК. Для удобства рассмотрения данные эксперимента сгруппированы в различные комбинации рисунков (рис. 6, 7, 8). На рис. 6 представлено распределение биообрастания на 7, 29 и 43-и сутки экспозиции одновременно на трёх рифовых конструкциях. Динамика вертикального распределения биообрастания по каждой рифовой конструкции в отдельности за первые 29 дней экспозиции пред-

ставлена на рис. 7, а в последующие 14 дней — на рис. 8.

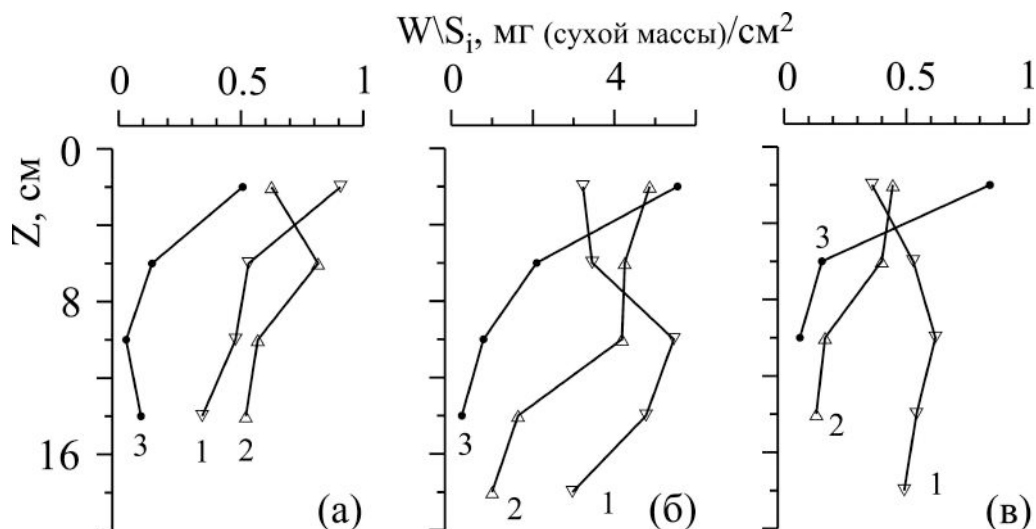


Рис. 6. Распределение плотности (W/S_i) сухой массы биообрастания по вертикальному профилю искусственных рифовых конструкций с разной плотностью расположения вертикальных структур (544 (1), 3956 (2), 10 678 (3) экз. $\cdot$ м $^{-2}$) на 7 (а), 29 (б) и 43-и (в) сутки экспозиции

Fig. 6. Distribution of the dry weight of the biofouling (W/S_i) along the vertical profile of artificial reef structures with different density of vertical structures (544 (1), 3956 (2), 10 678 (3) copies per m 2) on the 7th (a), 29th (б) and 43rd (в) day of exposure

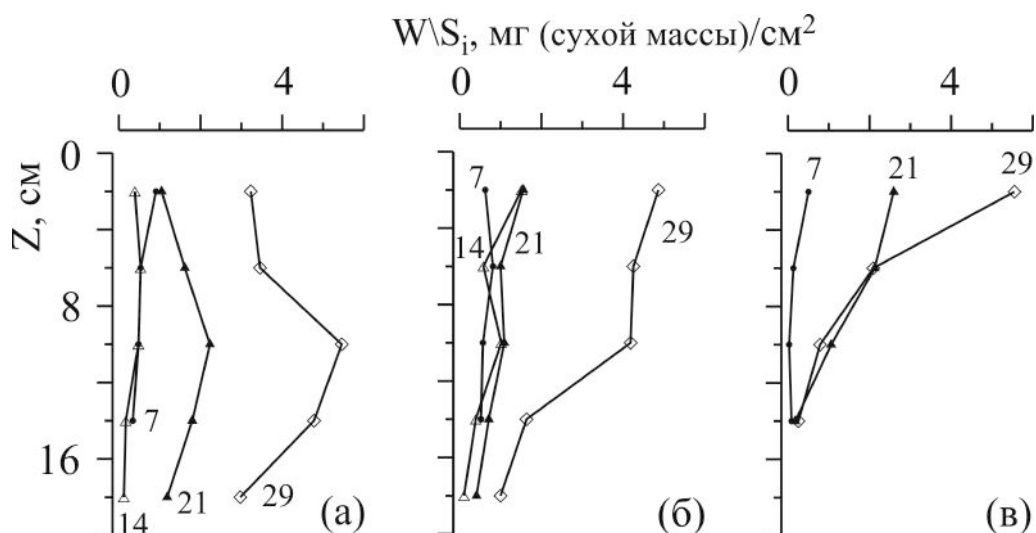


Рис. 7. Распределение плотности (W/S_i) сухой массы биообрастания по вертикальному профилю искусственных рифовых конструкций с разной плотностью расположения вертикальных структур (544 (а), 3956 (б), 10 678 (в) экз. $\cdot$ м $^{-2}$) на 7, 14, 21 и 29-е сутки экспозиции

Fig. 7. Distribution of the dry weight of the biofouling (W/S_i) along the vertical profile of artificial reef structures with different density of vertical structures (544 (а), 3956 (б), 10 678 (в) copies per m 2) on the 7th, 14th, 21st and 29th day of exposure

Уже на 7-е сутки складывается явная неравномерность в вертикальном распределении плотности биообрастания (рис. 6 а). Максимум биомассы обнаруживается на верхних участках структур и с глубиной конструкций W/S_i заметно снижается, особенно на ИРК с плотным расположением вертикальных структур.

Если проследить динамику $W/S_i(T)$ на отдельных участках осевых структур (рис. 7), можно увидеть очевидное увеличение во времени плотности биообрастания на каждом из участков, протекающее с разной скоростью, в зависимости от глубины их расположения и от величины плотности расположения вертикальных структур. На ИРК с редкой ($544 \text{ экз.}\cdot\text{м}^{-2}$) плотностью структур (рис. 7 а) максимум W/S_i ($2,229$ и $5,46 \text{ мг (сухой массы)} \cdot \text{см}^{-2}$) обнаруживается на 21 и 29-е сутки соответственно на расстоянии 10 см от верхней границы ИРК, а на других двух ИРК (рис. 7 б, в) — у верхней границы. Отметим, что на ИРК со средней плотностью на 29-е сутки экспозиции величина W/S_i относительно постоянна ($4,2$ – $4,9 \text{ мг (сухой массы)} \cdot \text{см}^{-2}$) во всей верхней половине глубины конструкции, её значение быстро снижается с расстояния 10 см и глубже (рис. 7 б). В то же время на конструкциях с плотным расположением структур значение W/S_i экспоненциально снижается сразу, начиная с верхней границы ИРК (рис. 7 в). Экспоненциальное снижение W/S_i наблюдается и при частом расположении структур ($3956 \text{ экз.}\cdot\text{м}^{-2}$), но только на 36-е сутки эксперимента (рис. 8 б). В этом случае на верхушках вертикальных структур отмечена высокая плотность биообрастания ($7,199 \text{ мг (сухой массы)} \cdot \text{см}^{-2}$).

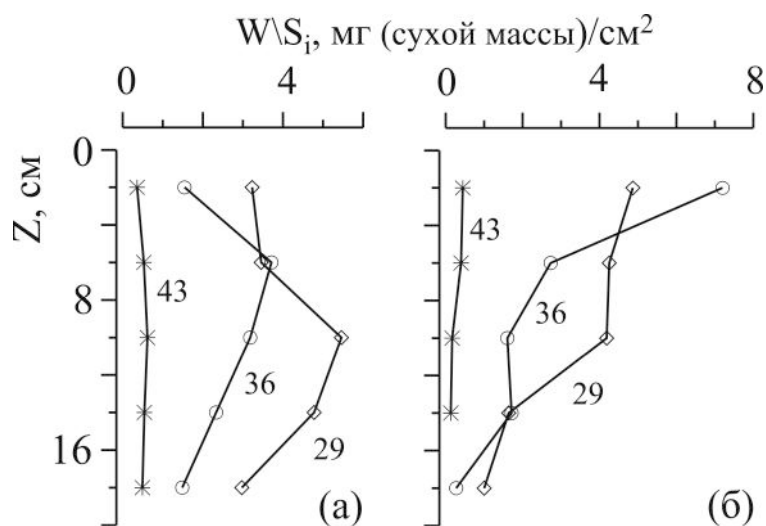


Рис. 8. Распределение плотности (W/S_i) сухой массы биообрастания по вертикальному профилю искусственных рифовых конструкций с разной плотностью расположения вертикальных структур (544 (а), 3956 (б), $10\,678$ (в) экз. $\cdot\text{м}^{-2}$) на 7, 14, 21 и 29-е сутки экспозиции

Fig. 8. Distribution of the dry weight of the biofouling (W/S_i) along the vertical profile of artificial reef structures with different density of vertical structures (544 (a), 3956 (б), $10\,678$ (в) copies per m^2) on the 7th, 14th, 21st and 29th day of exposure

Состояние вертикального распределения W/S_i на осевых структурах трёх рассматриваемых ИРК на 43-й день эксперимента представлено на рис. 6 в. К этому времени большая часть ранее сформированного сообщества обрастаний была утрачена, а оставшаяся часть распределилась по высоте вертикальных структур соответствующим образом (рис. 6 в), при этом значения W/S_i не превышали $1 \text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$. В общих чертах картина вертикального распределения W/S_i на 29-й и 43-й дни эксперимента была одинаковой (рис. 6 б, в). В том и другом случае с увеличением плотности размещения вертикальных структур максимум биомассы обрастателей смещается в сторону верхней границы ИРК. На конструкциях с редким расположением структур максимум биомассы располагается в срединной части растительного полога, кривая распределения близка к симметричной относительно своего максимума. На ИРК с частым расположением структур основная доля биомассы ($83,5$ и $73,8 \%$ на 29-е и 43-и сутки эксперимента соответственно) сосредоточена в верхней половине растительного полога. На структурах с плотным расположением большая часть биомассы сосредоточена в верхнем двухсантиметровом слое ($63,9$ и $79,3 \%$ на 29-е и 43-и сутки эксперимента соответственно).

Обратим внимание ещё на одну особенность в вертикальном распределении биообрастания на 43-и

сутки эксперимента. На конструкциях с частым и с плотным расположением структур нижняя граница растительного полога не опускается глубже 15 и 11 см соответственно (рис. 6 в). Ниже этих границ поверхность осевых структур покрыта биообрастанием, но его плотность настолько мала, что технология наших измерений не позволяет его количественно учесть.

4. Связь концентрации сухой массы биообрастания в объёме обитаемого пространства (C_w) с концентрацией физической поверхности ИРК (C_s). Любая рифовая конструкция — это изолят с определённым ограниченным объёмом пространства (V_r), в пределах которого размещается физическая поверхность (S_i), пригодная для заселения гидробионтами, и пространство, не занятое элементами конструкции (V_f), где потенциально могут размещаться биообрастатели.

Были проведены два варианта расчёта концентрации сухой массы биообрастания в объёме обитаемого пространства ($C_w = (\sum W_i) / V_f$): первый — по отношению к верхнему двухсантиметровому слою ИРК, второй — по отношению ко всему объёму рифовой конструкции при высоте вертикальных структур в 20 см, на 7-е и 29-е сутки эксперимента (рис. 9).

Связь $C_w = f(C_s)$ в первом приближении тривиальна: чем больше площади обрастающей поверхности в единице объёма, тем больше количество массы биообрастателей в единице объёма, что справедливо по отношению к верхнему двухсантиметровому слою, и в этом случае связь рассматриваемых характеристик описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \text{на 7-е сутки экспозиции: } C_w &= -0,010 + 0,937C_s, R^2 = 0,999; \\ \text{на 29-е сутки экспозиции: } C_w &= -0,232 + 7,136C_s, R^2 = 0,9964, \end{aligned}$$

а по отношению ко всему объёму ИРК:

$$\begin{aligned} \text{на 7-е сутки экспозиции: } C_w &= 0,011 + 0,403C_s, R^2 = 0,837; \\ \text{на 29-е сутки экспозиции: } C_w &= 0,084 + 2,652C_s, R^2 = 0,930. \end{aligned}$$

Концентрация массы биообрастания, рассчитанная для всей конструкции, возрастает не в точном соответствии с увеличением концентрации физической поверхности ИРК (рис. 9). Это связано с тем, что при высоте вертикальных структур в 20 см с увеличением плотности их расположения усиливается экранирующее действие как со стороны структур конструкции, так и со стороны биообрастателей, что приводит к частичному световому и, вероятно, биогенному лимитированию роста водорослей в нижних горизонтах полога и, соответственно, к «недобору» биомассы в соответствующем объёме пространства конструкции (заштрихованный сектор на рис. 9).

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученный материал обсудим в двух направлениях — в аспекте формирования биообрастания на физической поверхности и в аспекте заполнения биоорганическим веществом искусственно структурированного пространства.

В соответствии с первым направлением обратимся к работам [1, 3, 18, 19, 32–35], показывающим, что биообрастание (колонизация) — это сложный процесс, включающий ряд элементарных процессов, которые сменяют друг друга во времени. Полученные нами результаты (см. рис. 4 и рис. 5) в определённой степени отражают сказанное выше, но мы не можем строго привязать наблюдаемые изменения к тому или иному этапу процесса. Характер состояния биообрастания на 7-й день экспозиции (см. рис. 4 и рис. 6 а) может рассматриваться как результат трёх процессов: «транспорта», «оседания» и «прикрепления». Важно подчеркнуть, что названные события реализуются (проявляются) в соответствии со спецификой условий, создаваемых внутри рифовых конструкций. Частокос осевых структур является физической преградой для движущейся воды и солнечной радиации и, в зависимости от плотности расположения вертикальных структур, картина пространственного распределения характеристик

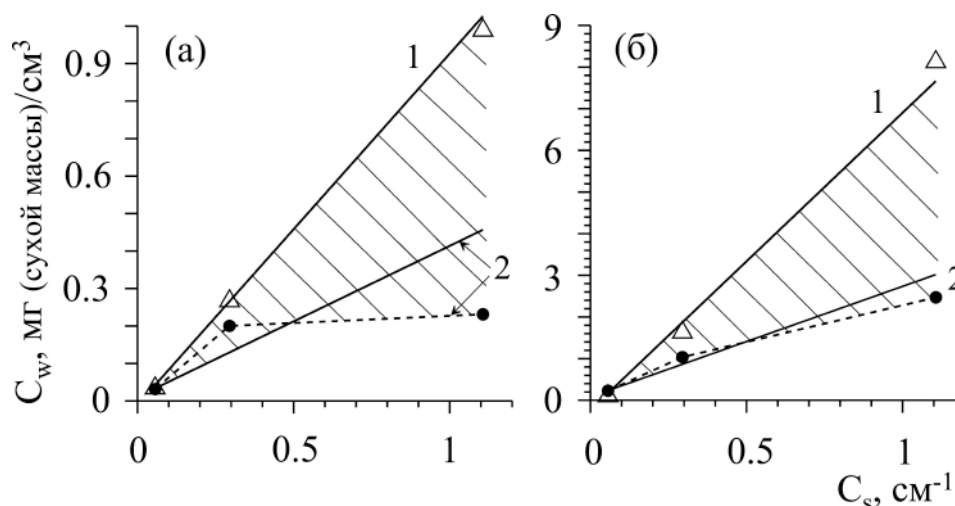


Рис. 9. Связь концентрации сухой массы биообрастания в объёме обитаемого пространства (C_w) с концентрацией обрастаемой поверхности искусственных рифовых конструкций (C_s) в верхнем двухсантиметровом слое растительного полога (1) и в пологе растений всей конструкции (2) на 7-е (а) и 29-е (б) сутки экспозиции

Fig. 9. The relationship between the concentration of dry weight of the biofouling in the volume of the inhabited space (C_w) with the concentration of the surface of the artificial reef structures (C_s) in the upper two-centimeter layer of the plant canopy (1) and in the plant canopy of the whole structure (2) on the 7th (a) and 29th (b) day of exposure

названных факторов в границах ИРК, а следовательно и распределения биообрастателей, будет специфична. Известно, что процессы транспорта, оседания и прикрепления на первых этапах формирования биообрастания во многом зависят от гидродинамических условий внутри ИРК и вблизи физической поверхности. В то же время свет как регулирующий фактор не играет, возможно, такой большой роли и становится заметным на следующих этапах формирования, когда активно включаются процессы развития и роста у одноклеточных и многоклеточных водорослей. Можно предположить, что при плотном расположении вертикальных структур роль света как регулиującego фактора по отношению к водорослям очевидна и является одинаково важной с первых дней эксперимента (см. рис. 6 а).

Быстрое увеличение биомассы, наблюдаемое после 20-х суток эксперимента (см. рис. 3), может объясняться многими причинами, каждая из которых вносит соответствующий вклад. Это может быть связано как с индивидуальным, так и с популяционным ростом прикрепленных к поверхности растений и животных [18]. В нашем случае в составе сообщества биообрастания по массе преобладали диатомовые водоросли, присутствовали проростки многоклеточных водорослей, из животных встречались гидроиды, мшанки, спирорбисы, личинки баянусов. Увеличение значений плотности биомассы могло происходить и за счёт последующих волн оседания и прикрепления расселительных форм. Хорошо известно, что ранее поселившиеся организмы могут являться дополнительной поверхностью для вновь оседающих поселенцев [18], в результате чего над поверхностью осевых структур создаётся сообщество со сложной пространственной структурой [9] и со своей динамикой роста. В наших предыдущих экспериментах [12] поверхность вертикальных структур при их плотном расположении на 30-е сутки покрывалась сплошным слоем из колоний *Berkeleya rutilans* с участием других видов диатомовых, которые, в свою очередь, обильно обрастали колониями *Licmophora ehrenbergii* (Kützinger) Grunov 1880 и *L. flabellata*. При этом высота оброста достигала 3 мм, а на конструкциях при частом расположении структур — 6 мм. В настоящем эксперименте высота оброста на 36-е сутки экспозиции варьировала в пределах 0,31–1,84 мм, и к этому моменту наблюдали заметное снижение количества сухой массы биообрастания на единицу площади поверхности конструкций (см. рис. 4). Вышеуказанное и последующее снижение плотности биомассы (см. рис. 4) объясняется, возможно, тем, что происходит смыв с осевых

структур детрита, а с ним и диатомовых водорослей, на котором они поселяются. Но важно обратить внимание на то обстоятельство, что при дальнейшем экспонировании ИРК на этом же участке моря значения плотности биомассы биообрастания быстро достигали прежних максимальных величин [14]. Наблюдаемое снижение биомассы является, возможно, не закономерностью обрастательного процесса, а частным случаем, спровоцированным внешними факторами среды.

Следующий аспект нашего обсуждения затрагивает вопрос вертикального распределения биообрастания в границах ИРК. Поскольку в его составе по массе преобладали диатомовые водоросли, характер наблюдаемых распределений $W/S_i(Z)$ (см. рис. 6, 7, 8) будем связывать с поведением этой группы водорослей, что позволит нам проводить сравнения и с другими растительными объектами (как водными, так и наземными).

Мы исходим из того, что архитектура любого естественно созданного растительного полога, каким является и полог водорослей, формируемый на ИРК, оптимально организована по отношению к соответствующим условиям окружающей среды и, в частности, к уровню поступающей энергии. В наших экспериментах в границах рифовых конструкций мы создаём три варианта условий по уровню освещения и водообмену, и наблюдаются, соответственно, три варианта отклика фитосистемы (см. рис. 6). С увеличением плотности расположения вертикальных структур максимум плотности биомассы биообрастания перемещается с серединой части полога к его верхней границе. Сходная динамика наблюдается и в посевах, и в насаждениях сельскохозяйственных культур [20], и в древостое леса [5] с увеличением плотности их посадки. Аналогичные варианты вертикального распределения фитомассы обнаруживаются и в пологах многоклеточных водорослей [12, 13].

Схожесть картины вертикального распределения фитомассы объясняется тем, что каждый вид или группа растений формируют максимум биомассы в оптимальных для них условиях, т. е. тогда, когда поглощённая ими фотосинтетически активная радиация (ФАР) близка интенсивности радиации приспособления и когда КПД газообмена максимален [22]. Чаше наблюдается одновершинность в распределениях концентрации фитомассы в пологе, с преимущественным расположением максимума в верхнем или среднем его горизонте [5, 12, 13, 20, 22].

Выводы:

1. Каждый этап колонизации поверхности ИРК гидробионтами («транспорт», «оседание», «прикрепление», «рост») опосредованно связан со структурированностью пространства искусственных рифовых конструкций. С ней же связана и пространственная организация растительного полога ИРК.
2. Обнаруживается явное сходство в пространственной организации фитосистем ИРК и естественных пологов водных и наземных растений.

Исследования выполнены в рамках бюджетной темы ФГБУН ИМБИ по теме «Изучение механизмов адаптации, трансформации и эволюции морских и океанических систем в условиях климатических изменений и антропогенного влияния» (гос. рег. № 115081110014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Брайко В. Д. *Обрастание в Черном море*. Киев : Наукова думка, 1985. 124 с. [Brajko V. D. *Obrastanie v Chernom more*. Kiev: Naukova dumka, 1985, 124 p. (in Russ.)].
2. Брянцева Ю. В., Лях А. М., Сергеева А. В. *Расчет объемов и площадей поверхности одноклеточных водорослей Черного моря*. Севастополь, 2005. 25 с. (Препринт / НАН Украины, Институт биологии южных морей).
3. Горбенко Ю. А. *Экология морских микроорганизмов перифитона*. Киев : Наукова думка, 1977. 252 с. [Gorbenko Yu. A. *Ekologiya morskikh mikroorganizmov perifitona*. Kiev: Naukova dumka, 1977, 252 p. (in Russ.)].
4. Брянцева Ю. В., Лях А. М., Сергеева А. В. *Расчет объемов и площадей поверхности одноклеточных водорослей Черного моря*. Севастополь, 2005. 25 с. (Preprint / NAN Ukrainy, Institut biologii yuzhnykh morei). (in Russ.)].

4. Ковальчук Ю. Л., Неврова Е. Л. Шалаева Е. А. *Диатомовые обрастания твердых субстратов*. Москва : Т-во науч. изд-в КМК, 2008. 174 с. [Koval'chuk Yu. L., Nevrova E. L., Shalaeva E. A. *Diatomovye obrastaniya tverdykh substratov*. Moscow: T-vo nauch. izd-v KMK, 2008, 174 p. (in Russ.)].
5. Карманова И. В. *Математические методы изучения роста и продуктивности растений*. Москва : Наука, 1976. 221 с. [Karmanova I. V. *Matematicheskie metody izucheniya rosta i produktivnosti rastenii*. Moscow: Nauka, 1976, 221 p. (in Russ.)].
6. Ли Р. И. Рябушко Л. И. Сезонная динамика видового состава и количественных характеристик диатомовых водорослей эпилитона Карантинной бухты в зависимости от температуры воды в Чёрном море // *Системы контроля окружающей среды* : сб. науч. тр. / НАН Украины, Мор. гидрофиз. ин-т. Севастополь, 2010. С. 215–221. [Li R. I., Ryabushko L. I. Sezonnaya dinamika vidovogo sostava i kolichestvennykh kharakteristik diatomovykh vodoroslei epilitona Karantinnoi bukhty v zavisimosti ot temperatury vody v Chernom more. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*: sb. nauch. tr. / NAN Ukrainy, Mor. gidrofiz. in-t. Sevastopol, 2010, pp. 215–221. (in Russ.)].
7. Марфенин Н. Н. *Феномен колониальности*. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1993. 239 с. [Marfenin N. N. *Fenomen kolonial'nosti*. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1993, 239 p. (in Russ.)].
8. Неврова Е. Л. *Бентосные диатомовые водоросли (Bacillariophyta) Чёрного моря: разнообразие и структура таксоценов различных биотопов* : автореф. дис. ... докт. биол. наук: 03.02.01, 03.02.10. Москва, 2015. 45 с. [Nevrova E. L. *Bentosnye diatomovye vodorosli (Bacillariophyta) Chernogo morya: raznoobrazie i struktura taksotsenov razlichnykh biotopov*: avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk: 03.02.01, 03.02.10. Moscow, 2015, 45 p. (in Russ.)].
9. Парталы Е. М. *Обрастание в Азовском море*. Мариуполь : Рената, 2003. 378 с. [Partaly E. M. *Obrastanie v Azovskom more*. Mariupol': Renata, 2003, 378 p. (in Russ.)].
10. Празукин А. В. Формирование фитообрастаний на искусственных рифовых конструкциях // *Альгология*. 2001. Т. 11, № 1. С. 57–69. [Prazukin A. V. Phytofouling formation on the artificial reef constructions. *Al'gologiya*, 2001, vol. 11, no. 1, pp. 57–69. (in Russ.)].
11. Празукин А. В. Водные биокосные фитосистемы природного и антропогенного происхождения (структурное сопоставление) // *Морской экологический журнал*. 2003. Т. 2, № 2. С. 16–28. [Prazukin A. V. Water bioinert phytosystems of anthropogenic and natural origins (structural comparison). *Morskoy ekologicheskij zhurnal*, 2003, vol. 2, no. 2, pp. 16–28. (in Russ.)].
12. Празукин А. В. *Экологическая фитосистемология*. Москва : Перо, 2015. 375 с. [Prazukin A. V. *Ecological Phytosystemology*. Moscow: Pero Publ., 2015, 375 p. (in Russ.)].
13. Празукин А. В. Фирсов Ю. К. Архитектоника растительных покровов цистозировых фитоценозов, Черное море // *Вестник Тверского Государственного университета. Сер.: Биология и экология*. 2016. № 1. С. 105–118. [Prazukin A. V., Firsov Yu. K. The architectonics of cystoseira phytocenoses canopies in the Black Sea. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Biologiya i ekologiya*, 2016, no. 1, pp. 105–118. (in Russ.)].
14. Празукин А. В., Фирсов Ю. К., Холодов В. В., Ли Р. И. Сезонная динамика биообрастания искусственных рифовых конструкций в евтрофируемой морской акватории // *Морские биологические исследования: достижения и перспективы* : в 3-х т.: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, приуроч. к 145-летию Севастопольской биологической станции (Севастополь, 19–24 сент. 2016 г.) / под общ. ред. А. В. Гаевской. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. Т. 3. С. 432–435. [Prazukin A. V., Firsov Yu. K., Holodov V. V., Li R. I. Sezonnaya dinamika bioobrastaniya iskusstvennykh rifovykh konstrukcii v evtrofiruemoi morskoi akvatorii. In: *Morskie biologicheskie issledovaniya: dostizheniya i perspektivy*: v 3-kh t.: sb. materialov Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem,

- priuroch. k 145-letiyu Sevastopol'skoi biologicheskoi stantsii (Sevastopol, 19–24 Sept. 2016) / A. V. Gaevskaya (Ed.). Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2016, vol. 3, pp. 432–435. (in Russ.).
15. Празукин А. В., Хайлов К. М. Пространственная организация полога диатомового обрастания на экспериментальных конструкциях в сравнении с другими фитосистемами // *Гидробиологический журнал*. 1998. Т. 34, № 5. С. 38–48. [Prazukin A. V., Khailov K. M. Spatial organization of the canopy of diatom fouling on experimental constructions in comparison with other phytosystems. *Gidrobiologicheskii zhurnal*, 1998, vol. 34, no. 5, pp. 38–48. (in Russ.).]
 16. Празукин А. В., Хайлов К. М., Ковардаков С. А. Сравнение структурно-функциональных соотношений в морских фитосистемах разного уровня организации на основе их унифицированного описания // *Морской экологический журнал*. 2003. Т. 2, № 3. С. 51–62. [Prazukin A. V., Khailov K. M., Kovardakov S. A. Comparison of structural and functional relationships in marine phytosystems of different levels of organization on the basis of their unified description. *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2003, vol. 2, no. 3, pp. 51–62. (in Russ.).]
 17. Протасов А. А. *Пресноводный перифитон*. Киев : Наукова думка, 1994. 307 с. [Protasov A. A. *Presnovodnyi perifiton*. Kiev: Naukova dumka, 1994, 307 p. (in Russ.).]
 18. Раилкин А. И. *Процессы колонизации и защита от биообрастания*. Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1998. 272 с. [Railkin A. I. *Protsessy kolonizatsii i zashchita ot bioobrastaniya*. Sankt-Peterburg: Izd-vo S.-Petersburg. un-ta, 1998, 272 p. (in Russ.).]
 19. Раилкин А. И. *Колонизация твердых тел бентосными организмами*. Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2008. 427 с. [Railkin A. I. *Kolonizatsiya tverdykh tel bentosnymi organizmami*. Sankt-Peterburg: Izd-vo S.-Petersb. un-ta, 2008, 427 p. (in Russ.).]
 20. Росс Ю., Нильсон Т. Вертикальное распределение биомассы в посевах // *Фотосинтезирующие системы высокой продуктивности*. Москва : Наука, 1966. С. 96–108. [Ross Yu., Nil'son T. Vertikal'noe raspredelenie biomassy v posevakh. In: *Fotosinteziruyushchie sistemy vysokoi produktivnosti*. Moscow: Nauka, 1966, pp. 96–108. (in Russ.).]
 21. Рябушко Л. И. *Микрофитобентос Черного моря*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. 416 с. [Ryabushko L. I. *Microphytobentos of the Black Sea*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2013, 416 p. (in Russ.).]
 22. Тамметс Т. Х., Тооминг Х. Г. Функциональность архитектуры фитоценоза // *Физиология растений*. 1985. Т. 32, вып. 4. С. 629–635. [Tammets T. H., Tooming H. G. Funkcional'nost' arhitektury fitotsenoza. *Fiziologiya rastenii*, 1985, vol. 32, iss. 4, pp. 629–635. (in Russ.).]
 23. Фирсов Ю. К. Исследование фотосинтеза фитоперифитона стеклянных пластин в зависимости от сезона и длительности экспозиции субстрата в море // *Системы контроля окружающей среды* : сб. науч. тр. / НАН Украины, Мор. Гидрофиз. ин-т. Севастополь, 2013. Вып. 19. С. 268–272. [Firsov Yu. K. Issledovanie fotosinteza fitoperifitona steklyannykh plastin v zavisimosti ot sezona i dlitel'nosti ekspozitsii substrata v more. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*: sb. nauch. tr. / NAN Ukrainy, Mor. Gidrofiz. in-t. Sevastopol, 2013, iss. 19, pp. 268–272. (in Russ.).]
 24. Хайлов К. М., Празукин А. В., Рабинович М. А., Чепурнов В. А. Связь биологических параметров фитообрастания с физическими параметрами экспериментальных «рифовых» конструкций в евтрофируемой морской акватории // *Водные ресурсы*. 1994. Т. 21, № 2. С. 166–175. [Khailov K. M., Prazukin A. V., Rabinovich M. A., Chepurinov V. A. Relation of the biological parameters of periphyton and physical parameters of experimental reef Structures in an Eutrophicated Marine Environment. *Vodnye resursy*, 1994, vol. 21, no. 2, pp. 166–175. (in Russ.).]
 25. Хайлов К. М., Празукин А. В., Смолев Д. М. Формирование и рост поселений водорослей на экспериментальных объектах // *Ботанический журнал*. 1995. Т. 80, № 9. С. 21–34. [Khailov K. M., Prazukin A. V., Smolev D. M. Formirovaniye i rost poseleniy vodorosley na eksperimental'nykh ob'ektakh // *Botanicheskij zhurnal*. 1995. T. 80, № 9. S. 21–34. [Khailov K. M., Prazukin A. V.,

- Smolev D.M. Formirovanie i rost poselenii vodoroslei na eksperimental'nykh ob'ektakh. *Botanicheskii zhurnal*, 1995, vol. 80, no. 9, pp. 21–34. (in Russ.).
26. Хайлов К. М., Юрченко Ю. Ю., Смолев Д. М., Празукин А. В. Геометрические условия заполнения гидробионтами пространств и поверхностей искусственных жилищ // *Успехи современной биологии*. 1998. Т. 118, вып. 5. С. 585–596. [Khailov K.M., Yurchenko Yu.Yu., Smolev D.M., Prazukin A.V. Geometric conditions for filling hydrobionts of spaces and surfaces of artificial dwellings. *Uspekhi sovremennoi biologii*, 1998, vol. 118, iss. 5, pp. 585–596. (in Russ.).]
 27. Юрченко Ю. Ю. *Биогеохимический подход в изучении обрастания и задачах конструирования искусственных рифов*: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.10. Севастополь, 2000. 21 с. [Yurchenko Yu.Yu. *Biogeokhimicheskii podkhod v izuchenii obrastaniya i zadachakh konstruirovaniya iskusstvennykh rifov*: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk: 03.02.10. Sevastopol, 2000, 21 p. (in Russ.).]
 28. Acs E., Kiss K.T. Colonization processes of diatoms on artificial substrates in the River Danube near Budapest (Hungary). *Hydrobiologia*, 1993, vol. 269/270, pp. 307–315. doi: [10.1007/BF00028029](https://doi.org/10.1007/BF00028029).
 29. Almeida O. U. H., Beltrones D. A. S. Variations in the structure of epiphytic diatom assemblages in subtropical macroalgae. *Hidrobiologica*, 2008, vol. 18, no. 1, pp. 51–61.
 30. Cattaneo A., Amireault M. C. How artificial are artificial substrata for periphyton. *Journal of the North American Benthological Society*, 1992, vol. 11, no. 2, pp. 244–256. doi: [10.2307/1467389](https://doi.org/10.2307/1467389).
 31. Desrosiers C., Leflaive J., Eulin A., Ten-Hage L. Optimal colonization and growth of marine benthic diatoms on artificial substrata: protocol for a routine use in bioindication. *Journal of Applied Phycology*, 2014, vol. 26, iss. 4, pp. 1759–1771. doi: [10.1007/s10811-013-0204-3](https://doi.org/10.1007/s10811-013-0204-3).
 32. Railkin A.I. *Marine biofouling: Colonization processes and defenses*. Boca Raton (Florida, USA); London; New York; Washington: CRC Press, 2004, 303 p.
 33. Scheer B. T. The development of marine fouling communities. *Biological Bulletin*, 1945, vol. 89, no. 1, pp. 103–121. doi: [10.2307/1538088](https://doi.org/10.2307/1538088).
 34. Wahl M. Marine epibiosis. I. Fouling and antifouling: some basic aspects. *Marine Ecology Progress Series*, 1989, vol. 58, no. 1-2, pp. 175–189. doi: [10.3354/meps058175](https://doi.org/10.3354/meps058175).
 35. Wahl M. Living attached: Aufwuchs, fouling, epibiosis. In: *Fouling Organisms in the Indian Ocean: Biology and Control Technology*. Nagabhushanam R., Thompson M.F. (Eds.). New Delhi: Oxford and IBH Publ. Co, 1997, pp. 31–83.

BIOFOULING FORMATION IN THE ARTIFICIAL REEF STRUCTURED SPACE

A. V. Prazukin, Yu. K. Firsov, R. I. Li, V. V. Kholodov

Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS, Sevastopol, Russian Federation

E-mail: prazukin@mail.ru

The paper focuses on the possibility of using artificial reef structures (ARS) to control biofouling and focuses on the spatial organization of vegetative canopies formed in the ARS, which is relevant for solving the problems of cultivation of hydrobionts on solid substrates. ARS is a kind of stockade made up of cylindrical vertical structures ($d_i = 0.33$ cm, $l_i = 20$ cm) that are placed on a horizontal plate ($S_0 = a_1 \cdot a_2 = 900$ cm²). The stockade covers space ($V_g = 0.018$ m³) partly occupied by vertical structures ($\sum V_i = V_i \cdot n$, where n is the total number of axial structures on the module horizontal surface), while the rest of it remains free ($V_f = V_g - \sum V_i$). Three possible densities were considered for the arrangement of the said vertical structures (n/S_0), and namely: 544, 3956 and 10 678 pieces per m², while the concentration of their surface area within the ARS ($C_s = (\sum S_i) / V_g$) was set as 0.056, 0.295 and 1.106 per cm. For 43 days (from May 27 to July 9 2014), the ARSs were kept in the offshore strip of the Sevastopol Bay (Black Sea) at the depth of 2 m.

The water temperature in the sea ranged from 23.3 to 25.6 °C. Samples were taken every 6–8 days. In the composition of the biofouling, diatom algae were found to be predominating in the mass, while also present were sprouts of multicellular algae and, of animals, hydroids, bryozoans, spirogobis, and larvae of balanuses were also observed. On the 7th day of exposure, 51 species of diatom algae were found on the surface of the ARS with a loose (544 pieces per cm²) and dense (10 678 pieces per cm²) structures arrangement, with only 15 species making a significant (> 5 %) contribution to the total number (n_i , %) and biomass (W_i , %) of the community in certain sections of vertical structures (*Achnanthes longipes*, *Amphora hyalina*, *Berkeleya rutilans*, *Cylindrotheca closterium*, *Entomoneis paludosa*, *Haslea ostrearia*, *Licmophora abbreviata*, *L. hastata*, *Neosynedra provincialis*, *Nitzschia sigma*, *N. tenuirostris*, *Parlibellus delognei*, *Pleurosigma elongatum*, *Proboscidea insecta*, *Trachyneis aspera*). The values of the Sorensen – Chekanovskii ($K_{sc} = 0.7$) and Stugren – Radulescu ($P_{sr} = -0.077$) coefficients indicate a very close similarity between the systematic composition of the communities being compared. As the fouling density value changes in vertical structures (W/S_i) during the period under consideration, four characteristic stages can be distinguished. The first, by convention, is completed on the 7th day of observation, and an approximately equal fouling density (0.51–0.91 mg (dry weight) per cm²) is found to have been created by this time on the tops of the structures, regardless of the density of their structures, and it differs significantly (0.03–0.57 mg (dry weight) per cm²) in the middle part of the ARS. The second stage (7th–21st days) is characterized by low rates of biomass increase per unit of the surface colonized (0.003–0.08, 0.25, -0.17 mg (dry weight) · day⁻¹ · cm⁻²) and by relatively low values W/S_i (0.36–2.23 mg (dry weight) per cm²). The third stage is characterized by a rapid increase in the fouling density (0.30–0.75 mg (dry weight) · day⁻¹ · cm⁻²). The maximum W/S_i (3.09–9.07 mg (dry weight) per cm²) is reached on the 29th and 36th days of exposure. The fourth, final stage is characterized by a decrease in W/S_i , this being the period of partial “disintegration” of the previously formed fouling community. The paper analyzes in detail the vertical distribution of the dry biofouling biomass (W/S_i) along the axial structures with different density of their arrangement on the 7th, 14th, 21st, 29th, 36th and 43rd days of the experiment. The general picture of the vertical distribution of W/S_i on the 29th and 43rd days was found to be similar. With the increase in the density of vertical structures arrangement, the maximum fouling biomass shifts towards the upper boundary of the ARS. In loosely arranged structures, the maximum biomass is located in the middle part of the canopy, while in not so densely arranged structures (3956 pieces per cm²), the bulk of the biomass (83.5–73.8 %) is concentrated in the upper half of the canopy, while in densely arranged structures, in the upper 2-cm layer (63.9–79.3 %). The paper also considers the relationship between the biofouling dry mass concentration throughout the inhabited space ($C_w = (\sum W_i) / V_f$) and the concentration of the ARS physical surface with respect to the upper ARS (1) layer and the entire volume of the reef structure (2) in 20-cm high structures on the 29th day of the experiment ((1): $C_w = -0.232 + 7.136C_s$, $R^2 = 0.99$; (2): $C_w = 0.084 + 2.652C_s$, $R^2 = 0.93$). It shows that in 20-cm vertical structures an increase in the value of C_s is accompanied by the increased screening effect produced by both structure elements and biofouling – a process which leads to the growth of biofouling agents being partially checked by the insufficient inflow of light and biogenic elements and, accordingly, to a “shortage” of biomass in the given volume of the structure space.

Keywords: biofouling, phytofouling, colonization, phytocenosis, diatoms, artificial reef, vegetative canopy, inhabited space, communities inhabiting hard surfaces

УДК 62-757.7

КОНЦЕПЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ МОРСКОГО ОБРАСТАНИЯ И ЕЕ РАЗРАБОТКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАУЧУК-ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

© 2017 г. **А. И. Раилкин**¹, д-р биол. наук, ген. дир., **Ж. А. Отвалко**², канд. хим. наук, зав. лаб., **С. И. Коротков**², канд. хим. наук, с. н. с., **С. Е. Фомин**², н. с., **Н. В. Кулева**³, д-р биол. наук, проф.

¹ ООО «БиоМорЗащита», Санкт-Петербург, Россия,

² Научно-исследовательский институт синтетического каучука

им. акад. С. В. Лебедева, Санкт-Петербург, Россия,

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: railkin@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.06.2017 г. Принята к публикации 01.08.2017 г.

Развиты положения авторской концепции экологически безопасной защиты от морского обрастания. Изучены три направления её практической реализации: небактерицидная противобактериальная защита с использованием оксидов некоторых металлов и органических соединений, а также покрытия с пониженной экологической опасностью за счёт частичного замещения меди противобактериальным компонентом. В качестве базового использовано покрытие КЭЛТ-2, разработанное в ФГУП «НИИСК». Для лабораторных исследований противобактериальных веществ и покрытий использованы методы экспериментальной биологии, для морских испытаний покрытий — нестационарные стенды (гидрофлюгеры). Представлены результаты технических и биологических испытаний каучук-эпоксидных покрытий. При испытаниях в Белом и Чёрном морях разработанные покрытия показали более высокую эффективность, чем судовые краски. Обсуждается перспективность дальнейшей разработки экологически безопасных противобактериальных покрытий и медных покрытий с пониженной экологической опасностью.

Ключевые слова: защита, морское обрастание, экологическая безопасность, каучук-эпоксидные покрытия, испытания покрытий

Проблема защиты от биологического обрастания существует более 2000 лет, с начала освоения человечеством речных, морских и океанических вод. Однако она не ограничивается защитой судов от биообрастания и биоповреждения. Обрастанию и повреждению биологическими организмами подвергаются все незащищённые искусственные (антропогенные) объекты, находящиеся в контакте с водной средой. К ним, кроме плавсредств, относятся нефтяные и газовые платформы на шельфе, гидросооружения, подводные газо- и нефтепроводы, подводные кабели и другие системы коммуникаций, гидроэлектростанции, АЭС, навигационное оборудование, научные приборы, системы охлаждения предприятий и других объектов, оснастка аквакультуры, рыболовные сети и прочее [4, 7].

По весьма скромным подсчётам, не учитывающим все обрастаемые и биоповреждаемые в водной среде объекты, ежегодные мировые убытки от обрастания даже при условии проведения профилактических, регламентных и ремонтных работ составляют около 50 млрд долларов США [2]. Если бы такие работы не проводились, убытки были бы на 1–2 порядка больше, и это без учёта ущерба от повреждений, связанных с биокоррозией и биообрастанием [3]. Вот почему во всём мире проблеме защиты от биообрастания и биоповреждения уделяется серьёзное внимание.

В 80–90-е годы XX века остро встал вопрос о снижении экологических рисков от использования в судовых противообрастающих покрытиях сильных биоцидов (оловоорганических и медных соединений). Они оказались весьма опасными для человека, а также нанесли большой ущерб сообществам прибрежных вод, что проявилось снижением численности ряда популяций, в т. ч. промысловых, и де-стабилизацией крупных морских экосистем [7, 16].

В связи с этим в 2005 г. влиятельный международный комитет Marine Environment Protection Committee принял решение запретить применение в судовых красках трибутилолова оксида как экологически весьма опасного, но вместе с тем наиболее эффективного противообрастающего агента [15]. Это решение соблюдается всеми странами. Сейчас на повестке дня стоит вопрос о полном запрете применения любых биоцидов, включая медные, для защиты от морского обрастания и биоповреждения различных объектов. Несмотря на многолетние попытки создания экологически безопасной защиты с использованием физических, химических и хемобиологических подходов и способов, её до сих пор не реализовали на промышленном, технологическом уровне. Правда, имеются патенты на супергидрофобные [5] и на безбиоцидные химические покрытия [6].

Разработанная нами концепция [7] позволяет, в принципе, предложить не только общий подход, но и конкретные эффективные способы неббиоцидной и экологически безопасной защиты от биообрастания, что и будет показано в статье. Суть заключается в развитии представлений о колонизационных циклах обрастателей, их анализе, выделении ключевых процессов, приводящих к переходу от временного планктонного существования расселительных стадий обрастателей к постоянной жизни ювенильных и взрослых форм на поверхности твёрдого тела. В настоящей статье сформулированы общие положения и предложены некоторые вещества для осуществления такой защиты.

Цель данной работы заключалась в дальнейшем развитии концепции экологически безопасной защиты от биообрастания, а также в рассмотрении ряда методических и экспериментальных вопросов её реализации.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Предварительные испытания противообрастающих веществ и покрытий проводили в лабораторных условиях в Морском аквариальном комплексе [12], в Ресурсном центре «Обсерватория экологической безопасности» (г. Санкт-Петербург) и на Морской биологической станции Санкт-Петербургского государственного университета (губа Чупа Кандалакшского залива Белого моря).

Для этого использовали подвижные споры (зооспоры) бурой водоросли ламинарии *Saccharina latissima*, личинки беспозвоночных животных (усоногих раков *Semibalanus balanoides*, двустворчатых моллюсков *Mytilus edulis* и *Mya truncatella*), а также молодь (возраста 0+) морских звёзд *Asterias rubens* (размах лучей 12–15 мм) и моллюсков *M. edulis* (длина раковины 0,75–1,50 мм). Споры получали методом подсушивания участков талломов со спороносными пятнами с последующим их помещением в морскую воду в соответствии с методикой [1]. Личинок собирали малой планктонной сетью Джели, молодь — на литорали во время отлива.

Опыты с беспозвоночными животными проводили в 3–5 повторностях в чашках Петри разного диаметра и объёма с 20–30 личинками и молодью. Продолжительность опытов составляла не более 1–2 ч, что определялось известной длительностью обследования поверхности и последующего прикрепления к ней расселительных стадий обрастателей (как спор водорослей, так и личинок беспозвоночных животных) [7]. Исключение составили циприсы усонного рака *S. balanoides*, имеющие сильно хитинизированные покровы с низкой проницаемостью для химических веществ. О подавлении адгезии молоди мидий судили по потере ими связи с субстратом, что проявлялось в откреплении ноги и падении моллюска на бок. Откреплённые от субстрата молодые морские звёзды не передвигались и очень легко сдвигались с места. После подавления подвижности и прикрепления через то или иное время (в зависимости от концентрации тестируемых противообрастающих веществ) организмы переносили в чистую морскую воду. В течение суток и более следили за восстановлением подавленных физиологических и

поведенческих реакций.

Опыты с зооспорами ламинарии проводили в трёх повторностях при их концентрации от 200 000 до 1 000 000 спор·мл⁻¹ в маленьких (диаметром 4 см) чашках Петри. На 15 мин суспензию спор помещали в раствор испытываемого вещества той или иной концентрации, после чего суспензию сливали, а чашки Петри несколько раз интенсивно всполаскивали, чтобы удалить оставшиеся неприкреплённые споры. Аналогично поступали и в контроле. Под микроскопом с водной иммерсией при увеличении ×600 подсчитывали число спор в каждом из 20 случайно выбранных полей зрения.

В качестве базового было использовано противообрастающее каучук-эпоксидное покрытие КЭЛТ-2, разработанное в Научно-исследовательском институте синтетического каучука им. академика С. В. Лебедева (ФГУП «НИИСК») [14], в котором агентом, защищающим от обрастания, была закись меди. В экспериментальные покрытия вместо закиси меди (или в дополнение к ней) вводили другие вещества, которые, по результатам лабораторных опытов, эффективно подавляли прикрепление. Контрольными служили КЭЛТ-2 (с содержанием закиси меди 40 массовых %) или грунтовка (без биоцидов) и судовые краски.

Морские испытания противообрастающих покрытий проводили в период массового оседания основных видов обрастателей в прибрежных районах Белого моря (Кандалакшский залив, губа Чупа) в 2013–2016 гг. и Чёрного моря (г. Геленджик, Голубая бухта) в 2013 г. в поверхностном слое на глубине 1,5 и 3,0 м соответственно. Алюминиевые пластины размером 2×100×200 мм с покрытиями экспонировали в 3–5 повторностях в горизонтальном положении на гидрофлюгере [7, 9]. Обилие обрастателей определяли по их плотности (численности в расчёте на 1 м²) на наиболее обросшей стороне покрытий и выражали средними арифметическими величинами с их ошибками.

Противообрастающее действие покрытий оценивали с помощью противообрастательного индекса (ПИ) [11] по формуле:

$$\text{ПИ} = \sum [Q_i / Q(1 - Q'_i / Q_i)], \quad (1)$$

где Q_i и Q'_i — обилие i -го вида (группы видов) на контрольном и защитном покрытиях соответственно, Q — суммарное обилие всех обрастателей на контрольном покрытии. При высоком обилии численность обрастателей определяли на поперечной трансекте, отстоящей от её переднего края (в направлении обтекания) на расстояние, равное ¼ длины пластины и соответствующее среднему обилию обрастания для всей пластины [7].

Применение универсального количественного критерия ПИ для оценки защитного действия противообрастающих покрытий позволяет не только сравнивать между собой различные экспериментальные покрытия, но и сопоставлять их эффект с действием промышленных судовых красок. С учётом этого сравнение осуществляли на основе шкалы эффективности, в которой для ранжирования покрытий принят шаг 0,1 (табл. 1).

Таблица 1. Классификация противообрастающего действия покрытий [11]

Table 1. Classification of antifouling effect of coatings [11]

Диапазон защитного индекса (ПИ)	Характеристика защиты от обрастания
0,90–1,00	Особенно перспективна (на уровне лучших судовых красок)
0,79–0,89	Весьма перспективна
0,68–0,78	Перспективна
Ниже 0,68	Не перспективна

Потенциальную экологическую опасность ряда испытанных в море противообрастающих покрытий изучали в Морском аквариальном комплексе СПбГУ [12]. Для этого в каждый из 7 аквариумов объёмом 60 или 100 л на три месяца без смены воды индивидуально помещали доставленные с Белого

моря бурые водоросли *Fucus vesiculosus* (высота 15–25 см), песчаный грунт с гастротрихами, колонии гидроидных полипов *Gonothyrea loveni* на бурой водоросли *Ascophyllum nodosum*, взрослых усоногих раков *S. balanoides*, молодь двустворчатых моллюсков *M. edulis* (длина раковины 2–3 мм), молодь морских звёзд *A. rubens* (размах лучей 1,5–2,5 см) и трёхиглых колюшек *Gasterosteus aculeatus* (размер 2,5–3,5 см). Объём всех аквариумов, связанных общим протоком, составлял около 500 л. В течение всего периода проведения экспериментов работали механический и бактериальный фильтры, а также пеноотделительные колонки (скиммеры) для удаления избытка органических веществ.

Суть эксперимента состояла в следующем: в технологический контейнер одной из идентичных модельных экосистем (экспериментальной) помещали кассету с 10 пластинами (5×10 см), окрашенными противообрастающими покрытиями с оксидами лантана, кобальта, марганца и железа, а в другую (контрольную) — аналогичную кассету, на пластины которой было нанесено контрольное покрытие, не содержащее противообрастающих веществ.

Условия проведения эксперимента были достаточно жёсткими для гидробионтов. В первую очередь это касалось отсутствия смены (или подмены) морской воды. Сравнительно плотной была посадка экспериментальных животных и водорослей в аквариумы: 4–5 камней (размером около 15×8×6 см), плотно заселённых баланусами, более 200 моллюсков, более 100 морских звёзд, более 50 колюшек, 5–7 фукусов. Суммарная площадь противообрастающих покрытий составила около 0,1 м².

С периодичностью 2 раза в месяц определяли общее состояние гидробионтов, их обилие, количество живых и мёртвых особей, численность гастротрих в грунте, скорость роста гидроидных полипов, моллюсков и морских звёзд (по приросту их средних размеров). Поскольку для различных модельных объектов использовали разные параметры для оценки состояния биологических объектов и воздействий на них противообрастающих веществ, полученные результаты для опытной экосистемы для большей наглядности представляли как долю от значения тех же параметров в контрольной экосистеме. Средние значения исследованных параметров для опытных и контрольных экосистем с их ошибками сравнивали с помощью t-критерия Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Теоретические положения. Зарубежные учёные в разработке общих и конкретных подходов к экологически безопасной защите от морского обрастания продолжают идти по пути изучения и копирования в противообрастающих покрытиях эпибиотической защиты, с помощью которой бурые водоросли, губки, кораллы, мшанки, асцидии и другие организмы защищаются от обрастания, выделяя в воду вещества различной природы, структуры и действия на потенциальных эпибионтов [7, 16–18]. Анализ этой литературы показывает, что средства защиты от обрастания, химические и физические, у всех организмов разные. Поэтому можно уверенно говорить о том, что найти панацею на этом пути для защиты от обрастателей вряд ли удастся.

В настоящем исследовании теоретические положения ранее предложенной концепции экологически безопасной защиты от биообрастания [7, 16] развиваются и дополняются. В основе концепции лежат анализ мировой литературы (около 1000 источников) и представления о колонизационных циклах [4, 7], объясняющие неизбежность заселения любой незащищённой от обрастания твёрдой поверхности.

В настоящей редакции концепция экологически безопасной защиты от биообрастания может быть сформулирована следующим образом:

1. Защита от обрастания должна быть эффективной против основных, массовых видов.
2. Необходимо, чтобы она обеспечивала эксплуатацию технических объектов в течение одного-многих лет в зависимости от их особенностей, района эксплуатации, частоты докования и профилактики защиты.
3. Средства защиты должны эффективно подавлять процессы, непосредственно предшествующие колонизации. К ним относятся оседание и прикрепление.

4. Оседание может быть подавлено репеллентами, а прикрепление — противoadгезионными химическими агентами или воздействием физических факторов.
5. Приоритетным является подавление адгезии (прикрепления), т. к. этот процесс колонизации обязателен для всех обрастателей, тогда как репелленты действуют только на подвижные расселительные (ювенильные и взрослые) формы. Споры красных и ряда бурых макроводорослей неподвижны.
6. Теоретически более предпочтительны физические способы защиты, т. к. они могут быть обеспечены технически с возможностью регулируемого (дозированного) воздействия на биологические объекты и водную среду. Однако до настоящего времени на промышленном уровне такие способы не разработаны. Основными остаются химические способы защиты.
7. Среди химических веществ (и составов) потенциально опасными являются в первую очередь такие, которые обладают канцерогенным, мутагенным или тератогенным действием.
8. Экологически безопасные агенты, репелленты и противoadгезионные вещества не должны иметь признаков веществ из п. 7.
9. Некоторые биоциды могут быть использованы в качестве неопасных для экологии средств защиты от обрастания, если они удовлетворяют ряду требований. Их действие и последствие должны быть кратковременными, исчисляться долями секунд или немногими минутами. Примером могут служить активные формы кислорода [7]. В качестве биоцидов другого рода для тех же целей могут быть использованы органические вещества, трансформирующиеся до безвредных продуктов водными микроорганизмами.
10. В ближайшей перспективе необходимо исключить из судовых красок соединения меди и другие биоциды в качестве противообрастающих агентов в соответствии с принятым международным соглашением.
11. Промежуточным этапом на пути к полному отказу от опасных биоцидных покрытий должно стать продолжение разработки противообрастающих покрытий с пониженным содержанием меди и других биоцидов.
12. Необходима разработка экологически безопасной защиты от обрастания с использованием в первую очередь противoadгезионных небioцидных веществ.
13. Для создания экологически безопасной защиты от обрастания необходим комплекс биологических, химических и технологических исследований: изучение механизмов, ответственных за биологическую адгезию и её подавление; отбор эффективных и экологически безопасных противообрастающих веществ; разработка методических приёмов испытания противообрастающих веществ, составов и покрытий; разработка высокотехнологичных противообрастающих покрытий.

2. Результаты лабораторных биологических исследований на организменном уровне.

Следует указать, что основная цель экспериментов состояла в том, чтобы выявить потенциально наиболее эффективные противообрастающие вещества, способные подавлять прикрепление обрастателей в максимально короткие сроки, а также соответствующие критериям, изложенным в [7]. В то же время указанные вещества не должны являться биоцидами для обрастания в проводимых опытах.

Выполненное ранее исследование механизма подавления адгезии (прикрепления) обрастателей было основано на гипотезе участия в этом процессе ионов кальция, что подтвердилось экспериментально [13]. Действительно, на ряде объектов с разными механизмами прикрепления было показано, что снижение концентрации кальция в искусственной морской воде или её полное отсутствие приводит к уменьшению числа прикрепляющихся особей или к полному подавлению их адгезии, практически не влияя или слабо влияя (в случае полного отсутствия кальция в воде) на их жизнеспособность.

Поэтому в опытах в первую очередь было изучено действие ионов-антагонистов кальция на спорах ламинарии, личинках и молоди ряда обрастателей (см. «Материал и методы»). Полученные результаты отражены в табл. 2. Важно отметить следующее. Наибольшую эффективность показал хлорид лантана. Он подавлял прикрепление личинок и молоди двустворчатых моллюсков, а также молоди морских звёзд в низкой концентрации в течение одной-нескольких минут и при этом не оказывал на них ника-

кого биоцидного действия. Менее эффективным был кобальт. Сходное действие имели марганец и железо, которые обычно не относят к антагонистам кальция. Никель, известный антагонист кальция, хотя и был достаточно эффективным, тем не менее обладал токсичностью, что проявлялось в гибели определённого процента особей: не все организмы восстанавливались после отмытки от него. Достаточно эффективной оказалась и бензойная кислота, быстро подавлявшая прикрепление. Как и большинство изученных веществ, она не оказывала никакого биоцидного или иного отрицательного воздействия на обрастателей.

Для всех ионов-антагонистов кальция и бензойной кислоты была характерна следующая последовательность подавления физиологических реакций. Сначала наблюдалось подавление передвижения (локомоции), после чего организмы теряли связь с субстратом, т.е. откреплялись от него, а затем у них подавлялись сократительные и поведенческие реакции. В конечном счёте морские звёзды теряли способность переворачиваться с аборальной стороны на оральную. В чистой морской воде все подавленные реакции полностью восстанавливались, но в обратном порядке.

Таблица 2. Обобщённые данные подавления прикрепления обрастателей

Table 2. Summary dates of suppression of foulers attachment

№ п/п	Название вещества	Биологические объекты	Подавление прикрепления	
			Концентрация, мМ	Время, мин
1	Хлорид лантана (III)	<i>Saccharina latissima</i> (зооспоры)	10	15
		<i>Semibalanus balanoides</i> (циприцы)	5	180
		<i>Mytilus edulis</i> (педивелигеры)	1	0–3
		<i>Mytilus edulis</i> (молодь)	0,5	0–5
		<i>Mya truncatella</i> (педивелигеры)	2,5	0–3
		<i>Asterias rubens</i> (молодь)	1	0–1
2	Хлорид никеля (II)	<i>Semibalanus balanoides</i> (циприцы)	50	180
		<i>Mytilus edulis</i> (педивелигеры)	20	30
		<i>Mytilus edulis</i> (молодь)	2,5	20
		<i>Mya truncatella</i> (педивелигеры)	10	30
3	Хлорид кобальта (II)	<i>Saccharina latissima</i> (зооспоры)	250	15
		<i>Semibalanus balanoides</i> (циприцы)	250	120
		<i>Mytilus edulis</i> (педивелигеры)	100	30
		<i>Mytilus edulis</i> (молодь)	100	10
		<i>Mya truncatella</i> (педивелигеры)	25	90
		<i>Asterias rubens</i> (молодь)	25	1
4	Сульфат железа (II)	<i>Saccharina latissima</i> (зооспоры)	250	15
		<i>Mytilus edulis</i> (молодь)	50	15
		<i>Asterias rubens</i> (молодь)	50	10–30
5	Хлорид марганца (II)	<i>Saccharina latissima</i> (зооспоры)	250	15
		<i>Mytilus edulis</i> (молодь)	25	10–15
		<i>Asterias rubens</i> (молодь)	25	10
6	Бензойная кислота	<i>Mytilus edulis</i> (молодь)	80	5–15
		<i>Asterias rubens</i> (молодь)	25	5
7	Хлорид меди (I)	<i>Mytilus edulis</i> (молодь)	1	5–10

Ионы меди также подавляли прикрепление моллюсков мидий (табл. 2), что проявлялось в замыкании ими створок с последующим прекращением движения ноги внутри раковины. Восстановление адгезии и других подавленных реакций если и происходило, то значительно медленнее, чем после дей-

ствия на них ионов-антагонистов кальция. При этом после отмывки от меди наблюдалась 50–60%-ная смертность особей.

При действии на зооспоры бурой водоросли ламинарии ионов-антагонистов кальция их движение подавлялось достаточно быстро (и обратимо). В случае лантана и железа это происходило уже через 1 мин при концентрации 1 и 10 мМ соответственно. Для марганца и кобальта требовалось 5 мин при существенно более высокой концентрации, равной 250 мМ. Дополнительные опыты показали, что в растворах ионов-антагонистов кальция (лантана, кобальта) или ионов, проявляющих сходный эффект (железо, марганец), прикрепление подавляется практически полностью (табл. 2), что следует из сравнения с контролем (без ионов-антагонистов кальция). Процент прикрепившихся зооспор составил для кобальта и марганца 0, для лантана — 2, а для железа — 5 %.

3. Результаты разработки экспериментальных противообрастающих покрытий. В качестве основы для противообрастающих покрытий использовали каучук-эпоксидное покрытие КЭЛТ-2 [14]. Оно изготавливалось смешиванием одного компонента, состоящего из эпоксидированных низкомолекулярных углеводородных каучуков с эпоксидными соединениями и наполнителями и включающего противообрастающее вещество (или вещества), и другого компонента, представляющего собой отвердитель аминного типа. Покрытие имеет высокий уровень физико-механических характеристик (табл. 3), оно устойчиво при воздействии гидростатического давления до $8,0 \cdot 10^6$ Па и работоспособно в интервале температур от -50 до +100 °С.

Таблица 3. Технические характеристики покрытия КЭЛТ-2

Table 3. Technical characteristics of the epoxy-rubber coating KELT-2

№ п/п	Наименование показателя	Значение показателя
1	Условная прочность при разрыве, МПа	15,0–30,0
2	Относительное удлинение при разрыве, %	10
3	Физико-механические показатели после теплового старения (72 часа при 100 °С):	
	– условная прочность при разрыве, МПа;	12,0–25,0
	– относительное удлинение при разрыве, %	не менее 5
4	Температурный диапазон эксплуатации, °С	-2...+40
5	Адгезия (сталь, титан), балл	не более 1
6	Твёрдость покрытий, отн. ед.	не менее 0,2
7	Прочность плёнки при ударе по прибору У-1А, см	не менее 30
8	Эластичность плёнки при изгибе, мм	не более 3
9	Противообрастающий агент — закись меди, %	40
10	Время обрастания (срок службы), годы	не менее 2

Из испытанных в лаборатории для изготовления покрытий были взяты все вещества (табл. 2), кроме никеля, который оказался токсичным, по данным лабораторных опытов. Медь использовалась для того, чтобы сравнить противообрастающее действие каучук-эпоксидных покрытий с таковым промышленных судовых красок. Вместо хлоридов металлов в каучук-эпоксидное покрытие вводили их оксиды, т. к. хлориды быстро вымылись бы и не смогли обеспечить сколько-нибудь длительную защиту. Бензойная кислота была модифицирована с учётом того, что при отверждении каучук-эпоксидных покрытий используются амины, которые полностью её связывают химически и таким образом нейтрализуют её как противообрастающее вещество. По этой причине вместо бензойной кислоты использовали её производное (ПБК). В контрольное покрытие противообрастающие вещества не добавляли.

Важно отметить, что введение в каучук-эпоксидное покрытие противообрастающих веществ даже

в относительно больших количествах не снижало его высоких физико-механических и других характеристик, что было проверено неоднократно.

4. Результаты морских испытаний противообрастающих покрытий. В период проведения биологических испытаний в Белом море (июль — сентябрь 2013–2015 гг.) основными обрастателями были двустворчатые моллюски, главным образом *Mytilus edulis*, а также *Hiatella arctica* и *Anomia squamula*. В контроле (покрытия без противообрастающих веществ) более обросшей была верхняя сторона пластин с покрытиями. Обилие наиболее массового вида *M. edulis* на контрольных покрытиях в разные годы была сходным. Оно составляло в сентябре около 70 тыс. экз. в расчёте на 1 м² (табл. 4). Кроме беспозвоночных животных, в небольшом количестве встречались проростки макрофитов, гидроидные полипы, морские звёзды, мшанки и асцидии.

Таблица 4. Обилие основных обрастателей на контрольных каучук-эпоксидных покрытиях (без противообрастающих веществ) в конце испытаний на наиболее обросшей стороне покрытий

Table 4. Abundance of basic foulers on control epoxy-rubber coatings (without antifouling substances) on the most fouled side of coatings at the end of trials

№ п/п	Море	Годы	Группы обрастателей	Сторона пластины	Обилие, экз.·м ⁻²
1	Белое	2013	двустворчатые моллюски	верхняя	69 700 ± 7450
2	— « —	2014	двустворчатые моллюски	— « —	79 400 ± 9230
3	— « —	2015	мидии	— « —	73 300 ± 6880
4	Чёрное	2013	водоросли	— « —	132 500 ± 19 300
5	— « —	— « —	усоногие раки	нижняя	15 800 ± 2100
6	— « —	— « —	двустворчатые моллюски	верхняя	125 000 ± 16 400
7	— « —	— « —	мшанки	нижняя	200 000 ± 18 500

В Чёрном море в период проведения испытаний (апрель — август 2013 г.) обилие и видовое разнообразие обрастателей в контроле было более высоким, чем в Белом море (табл. 4). Массовыми были более 10 видов. Среди водорослей отмечены красные *Phyllophora*, *Polysiphonia* и *Ceramium*, бурые *Cystoseira* и зелёные *Ulva*. В первые два месяца доминировали гидроидные полипы *Obelia loveni*. Корковая мшанка *Lepralia palassiana* занимала значительную часть покрытия или всю его площадь на протяжении всех четырёх месяцев. В достаточно большом количестве встречались двустворчатые моллюски *Mytilus galloprovincialis* и усоногие раки *Balanus eburneus* и *B. improvisus*. В контроле в августе отмечены также полихеты *Spirorbis pusilla* и мшанки родов *Membranipora* и *Electra*.

Результаты биологических испытаний в Белом и Чёрном морях показали достаточно высокую эффективность разработанных каучук-эпоксидных противообрастающих покрытий (табл. 5). Наиболее эффективные из них имели ПИ не ниже 0,8. Таким образом, они защищали от всех обрастателей, включая массовые, не менее чем на 80 %.

Успешным оказалось использование противoadгезионных веществ для защиты от биообрастания. Хотя ПИ в этом случае был ниже, чем у судовых красок, разработанные композиции показали достаточную эффективность. При этом оксиды марганца, лантана и кобальта дали сходный защитный эффект и были отнесены к перспективным в соответствии с разработанной классификацией (табл. 1). Следует обратить внимание на то, что покрытия с ними не уступали по эффективности медному покрытию, правда с пониженным содержанием меди.

Необходимо также отметить следующее. Использование производного бензойной кислоты (ПБК) позволило снизить содержание меди в каучук-эпоксидных покрытиях до уровня около 30 массовых %. Такие покрытия следует рассматривать как имеющие пониженную экологическую опасность, т. к. в промышленных судовых красках содержание меди составляет от 40 до 60 %. Наряду с этим следует указать, что ПБК повышает противообрастающее действие. Действительно, покрытие с содержанием

меди 30 % и совсем небольшим количеством ПБК оказалось более эффективным, чем покрытие с 36 % закиси меди (табл. 5). Весьма вероятно, что при дальнейшей разработке составов с ПБК и повышении его содержания в покрытии (при одновременном снижении содержания меди) ПИ будет находиться в тех же пределах или, может, окажется даже выше.

Таблица 5. Защитное действие каучук-эпоксидных покрытий (КЭП)

Table 5. Defensive effect of epoxy-rubber coatings and shipping paints

№ п/п	Противообрастающее вещество КЭП или судовая краска	Место испытания покрытий	ПИ	Характеристика защитного действия покрытий
1	Судовая краска Trilux-33 импортная	БМ	0,99	На уровне лучших судовых красок (0,90–1,00)
2	Закись меди, 40 %	БМ	0,97	
3	Судовая краска «Гамма-ХВ-5286 С» российская	БМ	0,94	
4	Закись меди, 30 % + ПБК, 4,6 %	БМ	0,92	
5	Закись меди, 28,8 % + ПБК, 9,0 %	ЧМ	0,89	Весьма перспективно (0,79–0,89)
6	Оксид марганца (II+III), 20 %	БМ	0,85	
7	Закись меди, 36 %	ЧМ	0,82	
8	Оксид лантана (III), 20 %	БМ	0,82	
9	Оксид кобальта (II), 20 %	БМ	0,81	Перспективно
10	Судовая краска Cruiser импортная	БМ	0,70	
11	Оксид железа (II), 20 %	БМ	0,62	Не перспективно

Обозначения: ПИ — противообрастательный индекс, БМ — Белое море, ЧМ — Чёрное море

Abbreviations: ПИ – antifouling index, БМ – the White Sea, ЧМ – the Black Sea

5. Результаты лабораторных биологических исследований на экосистемном уровне. Эксперименты с 7 биологическими объектами, в совокупности составляющими модельную экосистему, показали следующее (табл. 6). На протяжении трёх месяцев в несменяемой воде, в которой контролируются параметры морской среды (температура, солёность, pH, аммиак, нитриты, нитраты, фосфаты, кальций) находились тем не менее на удовлетворительном уровне, наблюдался рост гидроидных полипов, моллюсков и морских звёзд. В опытной и контрольной экосистемах достоверно не различались ($p > 0,05$) ни выживаемость гастротрих, живущих в песке, ни скорости роста гидроидных полипов, мидий и морских звёзд. В принципе, выживаемость усонюгих раков и трёхиглых колюшек в опытной и контрольной экосистемах также не различалась, хотя в этом случае, ввиду отсутствия повторностей, статистические различия между средними оценить не удалось.

Обсуждение. Рассмотрение и анализ основных положений концепции экологически безопасной защиты от биообрастания позволяют вполне определённо утверждать, что основным направлением её разработки должно быть создание противoadгезионной защиты. В принципе, она может быть как физической, так и химической [5–7].

В ходе исследования была доказана возможность защиты от обрастания с помощью небииоцидных веществ как неорганической, так и органической природы. Испытанные нами неорганические вещества (соли лантана, никеля, кобальта) объединяет то, что все они в растворах действуют как ионы-антагонисты кальция. Замещение ими кальция приводит, очевидно, к блокированию кальциевых каналов, в результате чего кальций не поступает к рабочим структурам — ундулоподиям (ресничкам и жгутикам), участвующим в локомоции, а также к структурам, обеспечивающим мышечные формы движения и сокращения [10]. Весьма вероятно, что сходные механизмы справедливы и в отношении ионов марганца и железа.

Проведённое исследование показало, что ионы-антагонисты кальция (лантан, никель и кобальт),

Таблица 6. Испытание противoadгезионных покрытий в модельных экосистемах

Table 6. Trials of antiadhesion coatings with using model ecosystems

№ п/п	Биологические объекты	Измеряемые показатели	Относительные значения опытная : контрольная экосистемы		
			1-й месяц	2-й месяц	3-й месяц
1	Гидроидные полипы <i>Gonothyrea loveni</i>	Скорость роста колонии	1,1 ± 0,4	1,0 ± 0,5	1,2 ± 0,5
2	Усоногие раки <i>Semibalanus balanoides</i>	Выживаемость, (%); без статистики	1,15	1,15	0,90
3	Низшие черви (<i>Gastrotricha</i>)	Численность в пробе	0,9 ± 0,3	1,0 ± 0,4	1,0 ± 0,5
4	Моллюски <i>Mytilus edulis</i>	Скорость роста	1,3 ± 0,4	1,1 ± 0,4	1,1 ± 0,6
5	Морские звёзды <i>Asterias rubens</i>	Скорость роста	1,0 ± 0,3	1,0 ± 0,4	1,1 ± 0,5
6	Рыбки колюшки	Выживаемость, (%); без статистики	1,0	1,1	1,2
7	Бурые водоросли <i>Fucus vesiculosus</i>	Общее состояние водорослей	хор. : хор.	хор. : хор.	уд. : уд.

Обозначения: хор. — хорошее, уд. — удовлетворительное

Abbreviations: хор. – good, уд. – satisfactory

а также другие близкие к ним по природе ионы (железо и марганец) действовали сходным образом, подавляя прикрепление зооспор бурой водоросли ламинарии, личинок и молоди усоногих раков, двусторчатых моллюсков и морских звёзд. Это позволяет с высокой долей вероятности говорить об общем механизме адгезии и его подавления. Такие данные подтверждают ранее полученные результаты: снижение уровня кальция в морской воде ведёт к постепенному подавлению адгезии, что было установлено на зооспорах ламинарии и ряде беспозвоночных животных [13].

Интересно, что характер действия, сходный с таковым ионов-антагонистов кальция, проявляла и бензойная кислота. Объяснить этот факт в рамках кальциевой гипотезы пока затруднительно. При этом следует отметить, что наблюдавшаяся последовательность подавления (и восстановления) разнообразных реакций личинок и молоди беспозвоночных животных свидетельствует о наркотизирующем действии на них всех изученных веществ [10], что прольёт, возможно, в дальнейшем свет на общий механизм биоадгезии.

Морские испытания противообрастающих каучук-эпоксидных покрытий с введёнными в них небиоцидными веществами: оксидами лантана, кобальта, марганца, железа, производными бензойной кислоты (см. «Материал и методы») — показали, что в составе покрытий почти все они, кроме железа, достаточно эффективно защищали от биообрастания. С учётом результатов лабораторных опытов логично считать, что механизм противообрастающего действия указанных небиоцидных веществ в покрытиях был таким же, как в растворах в лабораторных опытах. Поэтому разработанные и испытанные в море покрытия с полным правом можно назвать противoadгезионными. Имеются факты (неопубликованные данные), свидетельствующие, что каучук-эпоксидные покрытия с этими веществами не оказывают биоцидного или какого-либо другого негативного воздействия на обрастателей.

Результаты лабораторных экспериментов с модельными экосистемами, в которых водоросли и беспозвоночные животные были поставлены в достаточно жёсткие условия в связи с испытанием противoadгезионных покрытий, показали: противообрастающие вещества не оказывают на бентосные организмы какого-либо отрицательного воздействия. Это может служить ещё одним аргументом в пользу того, что разработанные и испытанные противообрастающие покрытия экологически безопасны. К сожалению, до настоящего времени не разработано каких-либо тестов на экологическую безопасность

противообрастающих покрытий, поэтому полученные нами результаты на уровне модельных экосистем следует рассматривать пока как предварительные. Однако мы надеемся, что на основе подобных оценок возможно оценить экологический ущерб для водной (морской) среды путём аппроксимации с учётом площадей защищённых от обрастания технических объектов, скоростей выщелачивания из них противoadгезионных веществ, поглощения этих веществ гидробионтами, их накопления в грунте и размеров акватории эксплуатации технических средств в морской среде.

В настоящее время остаётся актуальным вопрос о снижении экологических рисков от биоцидных покрытий. Решение задачи на данном этапе может быть связано с уменьшением содержания меди в противообрастающих покрытиях. Такая попытка была успешно осуществлена за счёт замещения части меди производным бензойной кислоты, не являющимся биоцидом, но обладающим противoadгезионными свойствами. Его применение позволило снизить содержание меди в противообрастающих покрытиях до 30 % и меньшего значения и создать, таким образом, покрытия с пониженной экологической опасностью. Следует напомнить, что в судовых противообрастающих красках содержание меди составляет от 40 до 60 %.

Проведённое исследование показало, что направление разработки небioцидных противoadгезионных покрытий является весьма перспективным. Универсальной моделью для этого могут служить каучук-эпоксидные покрытия на основе КЭЛТ-2 [14], обладающие комплексом высоких физико-химических и других показателей. Об этом свидетельствуют результаты лабораторных и морских испытаний таких покрытий.

В заключение следует акцентировать внимание на необходимости дальнейших исследований механизмов биологической адгезии, проведения более длительных морских испытаний противообрастающих покрытий (желательно в субтропических и тропических водах), прогноза сроков службы защитных покрытий, а также разработки методики оценивания экологической безопасности противообрастающих покрытий.

Выводы:

1. В результате проведения теоретических и экспериментальных исследований обоснована авторская концепция экологически безопасной защиты [7].
2. Каучук-эпоксидное покрытие КЭЛТ-2 может быть использовано в качестве модельного при разработке защиты от биообрастания.
3. На современном этапе необходимо продолжение исследований по разработке противообрастающих медных покрытий с пониженной экологической опасностью.
4. Покрытия на основе КЭЛТ-2, содержащие противoadгезионные добавки, по эффективности соответствуют промышленным судовым краскам или близки к ним.
5. Для создания экологически безопасной защиты от морского обрастания перспективна дальнейшая разработка небioцидных противoadгезионных покрытий.

Благодарность. Исследования выполнены при поддержке Ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности», Морской аквариальной и Морской биологической станции Санкт-Петербургского государственного университета.

Авторы благодарят Южное отделение Института океанологии РАН за всестороннюю помощь и содействие в проведении морских испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Блинова Е.И., Макаров В.Н. *Инструкция по биотехнологии культивирования ламинарии сахаристой в двухгодичном цикле в Баренцевом море*. Москва : ВНИРО, 1987. 35 с. [Blinova E.I., Makarov V.N.

Instruccia po tihnotehnologii kultivirovania laminarii saccharistoy v dvuhgodichnom cycle v Barentsevom more. Moscow: VNIRO, 1987, 35 p. (in Russ.)]

2. Зевина Г.Б. *Биология морского обрастания*. Москва : Изд-во МГУ, 1994. 135 с. [Zevina G.B. *Biologija morskogo obrastaniya*.

- Moscow: Izd-vo MGU, 1994, 135 p. (in Russ.)).
3. Лебедев Е. М. Ущерб от обрастаний и биоповреждений при отсутствии защиты или нарушении ее технологии // *Биологические повреждения промышленных и строительных материалов*. Москва : Изд-во АН СССР, 1973. С. 224-249. [Lebedev E. M. Uscherb ot obrastanij i biopovrezhdenij pri otsutstvii zaschity ili narushenii ee tehnologii // *Biologicheskie biopovrezhdenija promyshlennyh i stroitel'nyh materialov*. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1973, pp. 224–249. (in Russ.)].
4. Отвалко Ж. А., Раилкин А. И., Коротков С. И., Фомин С. Е., Другов М. В., Чикадзе С. З. Технологии разработки, испытания и изготовления инновационных покрытий для защиты гидротехнических сооружений от обрастания и коррозии // *Гидротехника*. 2016. № 2. С. 66-70. [Otvalko Zh. A., Railkin A. I., Korotkov S. I., Fomin S. E., Drugov M. V., Chikadze S. Z. Methods of development, testing and manufacturing of innovative coatings for hydraulic engineering structures protection from fouling and corrosion // *Hydrotekhnika*. 2016, no. 2, pp. 66–70. (in Russ.)].
5. Патент 2441045 RU, МПК C09D 5/16, B82B 1/100 Способ получения супергидрофобной противообрастающей эмали с углеродным нановолокном / Ф. И. Ильдарханова, Г. А. Миронова, К. Г. Богословский, С. В. Кузнецов, О. Л. Большакова, В. В. Коптева; ОАО Научно-исследовательский институт лакокрасочных покрытий с опытным машиностроительным заводом «Виктория» (Россия); заявл. 31.05.2010, опублик. 27.01.2012, Бюл. № 3. [Patent RU, МПК C09D 5/16, B82B 1/100 Sposob poluchenia superhydrofobnoi protivooobraustauchey emaili s uglerodnym nanovoloknom / F. I. Ildarhanova, G. A. Mironova, K. G. Bogoslovsky, S. V. Kuznetsov, O. L. Bolshakova, V. V. Kopteva; ОАО Nauchno-issledovatel'skij institut lakokrasochnyh pokrytij s opytnym mashinostroitel'nyim zavodom "Victoria"; zayavl. 31.05.2010, opubl. 27.01.2012, Bul. № 3].
6. Патент 2588225 RU, МПК C09D 5/16, C09D 163/10, C08K 3/22, B63B 59/04, A01N 25/10 Способ защиты от биообрастания / А. И. Раилкин, Ж. А. Отвалко, А. И. Твердов, С. И. Коротков, С. Е. Фомин; ФГУП «НИИСК» (Россия); заявл. 31.03.2015, опублик. 27.06.2016, Бюл. № 18. [Patent RU, МПК C09D 5/16, C09D 163/10, C08K 3/22, B63B 59/04, A01N 25/10 Sposob zaschity ot bioobrastanija / A. I. Railkin, Zh. A. Otvalko, A. I. Tverdov, S. I. Korotkov, S. E. Fomin; FSUE "NIISK"(Russia); zayavl. 31.03.2015, opubl. 27.06.2016, Bul. № 18].
7. Раилкин А. И. Колонизация твердых тел бентосными организмами. Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2008. 427 с. [Railkin A. I. Colonization of hard bodies of benthic organisms. St-Petersburg: SPb Press, 2008, 427 p. (in Russ.)].
8. Раилкин А. И. Поведенческие и физиологические реакции гидроидных полипов и двустворчатых моллюсков на некоторые противообрастающие вещества // *Зоологический журнал*. 1994. Т. 73, вып. 7–8. С. 22–30. [Railkin A. I. Behavioral and physiological reactions of hydroids and bivalves to some antifouling substances. *Zoologicheskii Zhurnal*. 1994, vol. 73, iss. 7-8, pp. 22–30. (in Russ.)].
9. Раилкин А. И., Бесядовский А. Р., Примаков И. М., Колдунов А. В. Взаимодействие прибрежных бентосных сообществ Белого моря с придонным слоем. – Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2012. 408 с. [Railkin A. I., Besjadovsky A. R., Primakov I. M., Koldunov A. V. Relationship of coastal communities of White Sea with nearbottom layer. St-Petersburg: SPb Press, 2012, 408 p. (in Russ.)].
10. Раилкин А. И., Серавин Л. Н. Обратимое блокирование (наркоз) подвижности и сократимости у многоклеточных беспозвоночных животных ионами-антагонистами кальция // *Зоологический журнал*. 1989. Т. 68, вып. 6. С. 19–29. [Railkin A. I., Seravin L. N. The reversible blocking (narcosis) of mobility and contractility of metazoan invertebrates by ions-antagonists of calcium. *Zoologicheskii Zhurnal*. 1989, vol. 68, iss. 6, pp. 19–29. (in Russ.)].
11. Раилкин А. И., Твердов А. И., Отвалко Ж. А., Коротков С. И., Фомин С. Е. Оценка противообрастающих свойств материалов по показателям обилия многовидовых сообществ

- обрастания // *Вода: химия и экология*. 2015. № 7. С. 52–56. [Railkin A. I., Tverdov A. I., Otvalko Zh. A., Korotkov S. I., Fomin S. E. The assessment of antifouling properties of materials upon indicators of abundance of many species fouling communities. *Voda: Khimiya i Ekologiya*. 2015, no. 7, pp. 52–56. (in Russ.)]
12. Раилкин А. И., Чикадзе С. З., Никитин О. М., Гагаринова Н. Г., Фролов К. Б. Холодноводный морской аквариальный комплекс Биологического института Санкт-Петербургского университета: итоги создания и первого года работы // *Вестник СПбГУ*. Сер. 3. 2006. Вып. 4. С. 3–9. [Railkin A. I., Chikadze S. Z., Nikitin O. M., Gagarinova N. G., Frolov K. B. Cold-water marine aquarium complex of the Biological Institute of the Saint-Peterburg University: results of its functioning in the first year. *Vestnik Saint-Petersburg. Gos. Un-ta*. Ser. 3, 2006, iss. 4, pp. 3–9. (in Russ.)]
 13. Раилкин А. И., Чикадзе С. З., Попов В. А., Сафина Д. А. Прикрепление морских бентосных организмов при пониженном содержании кальция в воде // *Вестник СПбГУ*. Сер. 3. 2010. Вып. 2. С. 39–46. [Railkin A. I., Chikadze S. Z., Popov V. F., Safina D. A. Attachment of marine benthic organisms at decreased calcium quantity in water. *Vestnik Saint-Petersburg. Gos. Un-ta*. Ser. 3, 2010, iss. 2, pp. 39–46. (in Russ.)].
 14. Секрет производства (ноу-хау) «Технология производства и применения каучук-эпоксидного антиобрастающего и защитного покрытия КЭЛТ-2». ФГУП «НИИСК», РФ, 28.10.2013 г. ТУ 2257-198-00151963-2013. [Know-how “Technology of manufacture and application of epoxy-rubber antifouling and defensive coating KELT-2”. FSUE “NIISK”, RF, 28.10.2013. TC 2257-198-00151963-2013 (in Russ.)]
 15. Dobretsov S. V., Dahms H.-U., Qian P.-Y. Inhibition of biofouling by marine microorganisms and their metabolites. *Biofouling*. 2006, vol. 22, no. 1, pp. 43–54.
 16. Railkin A. I. *Marine biofouling: Colonization processes and defenses*. Boca Raton (Florida, USA), London, New York, Washington: CRC Press, 2004, 303 p.
 17. Wahl M. Marine epibiosis. I. Fouling and antifouling: some basic aspects. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 1989, vol. 58, no. 1–2, pp. 175–189.
 18. Wahl M. Living attached: Aufwuchs, fouling, epibiosis. In: *Fouling Organisms in the Indian Ocean: Biology and Control Technology* (Nagabhushanam R., Thompson M. F. (Eds.). New Delhi: Oxford and IBH Publ. Co, 1997, pp. 31–83.

CONCEPT OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY PROTECTION AGAINST SEA FOULING AND ITS DEVELOPMENT USING EPOXY-RUBBER COATS

A. I. Railkin¹, Zh. A. Otvalko², S. I. Korotkov², S. E. Fomin², N. V. Kuleva³

¹Innovation Company «BioMarDefense», St.-Petersburg, Russian Federation

²S. V. Lebedev Synthetic Rubber Research Institute, St.-Petersburg, Russian Federation

³St.-Petersburg State University, St.-Petersburg, Russian Federation

E-mail: railkin@yandex.ru

The authors' concept of environmentally friendly defense against marine biofouling is elaborated. Three ways of its implementation are considered: non-biocidal antiadhesive protection with the use of some metal oxides and organics and also coats with reduced environmental impact due to partial substitution of the DBA antiadhesive component for copper. The basic coat used was KELT-2 developed at S. V. Lebedev Synthetic Rubber Research Institute. The antifouling substances and coats were studied in the laboratory using methods of experimental biology, and the coats were tested in the marine environment using vane-like mobile stands. The results of technical and biological tests of epoxy-rubber coats at the White Sea and the Black Sea demonstrated their high efficiency in comparison with common ship paints. The prospects of further development of ecologically safe antiadhesive coats and copper-based coats with reduced environmental impact are discussed.

Keywords: protection against sea fouling, environmental safety, epoxy-rubber coats, coat testing

УДК 546.56:582.261.1(262.5)

ДЕЙСТВИЕ СУЛЬФАТА МЕДИ НА РОСТ И МОРФОЛОГИЮ КЛЕТОК КЛОНОВЫХ КУЛЬТУР ЧЕТЫРЁХ ВИДОВ БЕНТОСНЫХ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ (BACILLARIOPHYTA) ЧЁРНОГО МОРЕЯ

© 2017 г. **Д. Ю. Романова**, вед. инж., **А. Н. Петров**, канд. биол. наук, зав. отд.,
Е. Л. Неврова, д-р биол. наук, вед. н. с.

Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

E-mail: driaromanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.06.2017 г. Принята к публикации 01.08.2017 г.

Многие виды диатомовых водорослей чувствительны к влиянию экологических стрессоров, поэтому изменения показателей их развития под воздействием различных токсикантов могут быть использованы как биоиндикаторы при оценке качества среды. Целью работы было исследование особенностей роста популяции и изменения морфологии клеток диатомовых водорослей при однократном внесении раствора сульфата меди ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) в пяти последовательно снижающихся концентрациях ионов меди (от 128 до 8 $\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ Cu^{2+}). В эксперименте использованы клонные культуры четырёх видов морских бентосных форм Bacillariophyta, выделенных из Чёрного моря: *Cyclophora tenuis* Castracane 1878, *Psammodictyon panduriforme* var. *continua* (Grunow) Snoeijis 1998, *Entomoneis paludosa* (W. Smith) Reimer in Patrick & Reimer 1975 и *Haslea* sp. Первые два упомянутых вида зарегистрированы нами впервые для черноморской флоры. По результатам 10-суточных токсикологических экспериментов установлено, что по степени резистентности к токсиканту изученные виды подразделяются на две группы. Высокочувствительные виды *P. panduriforme* var. *continua* и *Haslea* sp. прекращают деление клеток уже при минимальных концентрациях токсиканта (8 $\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$). Токсический порог воздействия сульфата меди, вызывающий остановку развития и роста численности клеток, у данных двух видов очень низкий (диапазон между контролем и концентрацией 8 $\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$). В группе среднетолерантных видов для *E. paludosa* пороговой является концентрация ионов меди 16 $\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$: при воздействии такого уровня токсиканта различия средних значений численности клеток всегда статистически достоверны. Для *C. tenuis* пороговая концентрация Cu^{2+} , при которой угнетение роста клеток относительно контроля всегда статистически достоверно, составляет 32 $\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$. При низких концентрациях ионов меди (8 и 16 $\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$) рост численности клеток среднетолерантных видов по мере увеличения периода экспозиции аппроксимируется степенной (для *C. tenuis*) либо затухающей сигмоидной (для *E. paludosa*) моделью. В контроле у каждого из четырёх исследованных видов диатомовых водорослей рост популяции клеток идёт по экспоненциальной модели на протяжении всего эксперимента. Отмечены особенности отклика клеток диатомовых водорослей при высокой концентрации токсиканта, выраженные в нарушении процесса морфогенеза и множественном нерасхождении створок с одной стороны после вегетативной фазы цитокинеза.

Ключевые слова: диатомовые водоросли, биотестирование, цитометрия, сульфат меди, токсикант, новые виды для флоры Bacillariophyta, Чёрное море

Диатомовые водоросли являются одним из основных структурных компонентов трофодинамических цепей морских экосистем, обеспечивая за счёт фотосинтеза до 20 % первичной продукции в Мировом океане [14, 29], поэтому исследование жизнедеятельности Bacillariophyta и их роли в процессах

трансформации вещества и энергии имеет большое значение как для изучения фундаментальных основ формирования морского биоразнообразия, так и для использования полученных данных для целей экологического мониторинга состояния прибрежных акваторий.

В связи со значительной антропогенной нагрузкой на Чёрное море необходимо отслеживать изменения состояния сообществ бентоса, и одними из наиболее подходящих для этих целей являются методы биотестирования и биоиндикации [1, 4, 6]. Многие виды диатомовых водорослей характеризуются пониженной резистентностью к влиянию неблагоприятных факторов среды, поэтому рассматриваются как перспективные тест-объекты, параметры изменения физиологических показателей которых (роста, размножения, количественного развития) под воздействием различных поллютантов (солей тяжёлых металлов, хлорорганических соединений, ПАВ, нефтепродуктов и др.) могут служить удобным инструментом при опосредованной оценке качества среды [3, 9, 13, 21, 22]. Очевидно, что благодаря массовому развитию в шельфовой зоне, малым размерам и высокой скорости внутриклеточных обменных процессов и, вследствие этого, чувствительности к изменениям среды обитания, отклик одноклеточных диатомовых водорослей на изменения гидрохимических условий в биотопе будет более быстрым, чем таковой многоклеточных макрофитов. Кроме того, работа с клоновыми культурами диатомовых водорослей имеет ряд преимуществ (генетическая однородность биоматериала, а также высокая репрезентативность и воспроизводимость результатов), поскольку коллекция штаммов микроводорослей является референтным материалом, с которым можно провести повторные исследования для расширения пула экспериментальных данных. Поэтому использование донных диатомовых для токсикологических экспериментов позволяет обеспечить достоверность результатов [3, 5, 9].

Выбор сульфата меди в качестве модельного токсиканта при проведении наших экспериментов обусловлен, прежде всего, экологической значимостью соединений меди как в метаболизме живых организмов, так и в биогеохимическом цикле [3]. С одной стороны, медь является эссенциальным микроэлементом для различных физиологических процессов, поддерживающих жизнеспособность гидробионтов [27], соединения меди принимают участие в азотном обмене, входят в число ключевых ферментов, обеспечивающих антиоксидантный эффект (Cu/Zn-супероксид дисмутаза) и осуществляющих перенос электронов в дыхательной цепи митохондрий эукариот (цитохром С оксидаза) и др. [25]. С другой стороны, соединения меди относятся к наиболее массовым природным элементам земной коры и наиболее распространённым техногенным поллютантам в водной среде и донных отложениях [3], в том числе в прибрежной части Чёрного моря [6]. Однако в повышенных концентрациях соединения меди становятся остротоксичными для большинства морских и пресноводных гидробионтов и в ряду токсичности относятся к наиболее экологически опасным (после ртути) веществам [3, 9].

По результатам токсикологических экспериментов, в которых сульфат меди использован в качестве общепринятого токсиканта, выявлено, что под воздействием ионов меди увеличивается проницаемость мембран водных растений за счёт перекисного окисления липидов [3]. В исследованиях по воздействию CuSO_4 на планктонные формы Bacillariophyta и низшие водные растения установлено, что при концентрации соединений меди порядка $0,1 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ наблюдается ингибирование их роста [3, 7]. Результаты работ [5, 13, 15, 20, 22, 25, 31] по оценке влияния сульфата меди в различной концентрации на клетки планктонных диатомовых видов, являющихся общепринятыми тест-объектами (*Cylindrotheca closterium* (Ehrenberg) Reimann et Lewin 1964, *Ditylum brightwellii* (West) Grunow ex Van Heurck emend Dzhanfarova 1984, *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin 1897), позволили нам предположить, что пороговая чувствительность к соединениям меди, при которой бентосные диатомовые водоросли жизнеспособны, индивидуальна для вида (группы видов).

Наше исследование сфокусировано на изучении особенностей реакции клеток бентосных диатомовых на соединения меди (CuSO_4) с целью выявления видов с высокой чувствительностью для их потенциального использования в качестве тест-объектов. Задачами настоящей работы были: 1) выделение клоновых культур различных видов Bacillariophyta; 2) выполнение сравнительной оценки влияния различных концентраций ионов меди в культуральной среде на рост и морфологию клеток бентосных

диатомовых водорослей в ходе вегетативной фазы их жизненного цикла; 3) изучение токсикорезистентности штаммов разных видов диатомовых водорослей и статистическая оценка достоверности межвидовых отличий; 4) выявление возможных случаев аномалий онтогенеза клеток диатомовых водорослей под воздействием различных концентраций ионов меди.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Отбор эпипелона рыхлых субстратов произведён в 83-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (январь — февраль 2016 г.). Донные отложения подняты с помощью дночерпателя «Океан-50» ($S = 0,25 \text{ м}^2$) и автоматического коробчатого дночерпателя Vox coher. Материал отобран из поверхностного слоя массива грунта (2–5 см) с помощью пластикового пробоотборника ($d = 4 \text{ см}$), помещён на хранение в холодильник при температуре $+14^\circ\text{C}$ в афотических условиях на период 1–7 суток до завершения экспедиции. Сбор эпилитона твёрдых и эпифитона растительных субстратов осуществлён с мая по август 2016 г. в прибрежной зоне акватории Карадагского горного массива и в акватории Алуштинского района, у пос. Рыбачье (табл. 1); этот материал собран с помощью соскобов и смывов в пробирки Эппендорфа объёмом 10 мл. Дальнейшая обработка и постановка экспериментов осуществлены в лаборатории водорослей и микробиоты Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского — природного заповедника РАН и в отделе экологии бентоса Института морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН (ФГБУН ИМБИ).

1–2 мл собранного материала помещали в чашку Петри ($d = 9 \text{ см}$) с добавлением 40–50 мл искусственной морской среды ESAW с целью получения накопительной культуры микроводорослей [11, 18]. Клоновые линии диатомовых водорослей выделены Д. Ю. Романовой микропипеточным способом под инвертированным микроскопом при увеличении $\times 10$ [2]. Очищение культуры проводили с помощью семикратной промывки и изолирования, для чего одиночную клетку помещали в чашку Петри с питательной средой ESAW с временным промежутком от 3 до 5 дней. Альгологически чистые неаксеничные культуры содержали при постоянной температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и рассеянном естественном освещении. Каждому клону присвоена кодировка по следующей системе: форма хранения + первые буквы вида + номер штамма (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика местообитаний и видов диатомовых водорослей, отобранных для клоновых штаммов и токсикологических экспериментов

Table 1. Characteristics of sampling biotopes and of diatom species selected for clonal strains and toxicological experiments

Вид	Код штамма	Длина клетки, мкм	Ширина клетки, мкм	Дата сбора	Координаты места сбора	Глубина сбора, м	Характер местообитания
<i>Psammodyctyon panduriforme</i> var. <i>continua</i>	1PP60427F	19,4	7,3	02.2016	44°53'07"N, 35°13'09"E	46,0	рыхлый грунт
<i>Entomoneis paludosa</i>	1EP60530P	249,4	101,0	05.2016	44°54'51.9"N, 35°13'52.5"E	5,0	твёрдый субстрат
<i>Haslea</i> sp.	1Ha60530Q	91,0	14,8	05.2016	44°46'08.7"N, 34°35'52.6"E	0,5	растительный субстрат
<i>Cyclophora tenuis</i>	1CT60824A	118,4	89,5	08.2016	44°54'44.9"N, 35°12'15.7"E	10,0	рыхлый грунт

Референтный материал хранится в коллекции Д. Ю. Романовой в отделе экологии бентоса ФГБУН ИМБИ в нескольких вариантах: 1 — постоянно пересеваемые штаммы живых клеток, 2 — очищенные панцири клеток в дистиллированной воде, 3 — прижизненно фиксированные этиловым

спиртом клетки, 4 — постоянные препараты для светового микроскопа (СМ), изготовленные из суспензии очищенных створок, заключённых в среду Naphrax®, 5 — цифровые микрофотографии клеток, полученные с помощью СМ и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). В настоящее время готовится пакет документов для оформления данной коллекции как части Коллекции гидробионтов Мирового океана ФГБУН ИМБИ в соответствии с действующими нормативными и правовыми актами РФ.

Для приготовления постоянных препаратов для микрофотографирования на СМ створки диатомовых трижды промывали в дистиллированной воде в течение 24 ч для снижения солёности, далее для освобождения клеток от органического содержимого добавляли равное количество 30%-ной перекиси водорода, нагревали на песчаной бане в течение 5–6 ч, затем тщательно промывали 8–10 раз дистиллированной водой и заключали в среду Naphrax®. Микрофотографии выполнены при помощи СМ Levenhuk 670T с объективом $\times 40$ и цифровой камеры Canon 700D.

Для приготовления препаратов для микрофотографирования на СЭМ суспензия очищенных створок проведена в растворах этилового спирта возрастающей концентрации (25, 50, 75 и 90°) и нанесена на нуклеопоровый фильтр, затем фильтр подсушен и приклеен двусторонним скотчем к металлическому предметному столику. Сканирующие микрофотографии получены Д. Ю. Романовой на оборудовании в ЦКП ФГБУН ННЦМБ ДВО РАН (г. Владивосток) с помощью ZEISS EVO 40XVP с использованием детектора вторичных электронов при прогрессивной развёртке в 46 сек.·кадр⁻¹.

Для видовой идентификации диатомовых водорослей использованы определители [19, 26, 28, 30]. Названия видов приведены по Catalogue of Diatom Names [16].

Для ввода культуры в экспоненциальную фазу роста перед началом эксперимента культуры пересеивали 1 раз в 7 дней в свежую питательную среду ESAW 18 ‰ [11, 18] в чашки Петри (d = 6 см, объём среды 10 мл). Выбор искусственной морской среды ESAW для проведения экспериментов обусловлен определёнными концентрациями содержащихся в ней химических веществ, что необходимо для воспроизводимости полученных результатов. Протокол приготовления среды ESAW включает разведение в 2 л дистиллированной воды солей NaCl (21,2 г), Na₂SO₄ (3,55 г), KCl (0,6 г), NaHCO₃ (0,175 г), KBr (0,09 г), H₃BO₃ (0,025 г), NaF (0,003 г), MgCl₂·6H₂O (9,6 г), CaCl₂·6H₂O (1,35 г), SrCl₂·6H₂O (0,022 г), NaNO₃ (0,8 мл из р-ра 46,67 г·л⁻¹), NaH₂PO₄ (0,8 мл из р-ра 3,094 г·л⁻¹), Na₂SiO₃ (2 мл из р-ра 15,0 г·л⁻¹), Fe(NH₄)-цитрат (0,5 мл из р-ра 0,72 г·л⁻¹), FeCl₃ (1 мл из р-ра 1,77 г·л⁻¹), растворов микроэлементов (ZnSO₄·7H₂O, CoSO₄·7H₂O, MnSO₄·4H₂O, Na₂MoO₄·2H₂O, Na₂SeO₃, NiCl₂·6H₂O, Na₂ЭДТА·2H₂O) и витаминов B₁ (0,5 мл из р-ра 50 мг·мл⁻¹), B₁₂ (5 мл из р-ра 0,5 мг·мл⁻¹).

Отметим, что в состав среды ESAW не входят соединения меди, что дало нам возможность синхронизировать культуру клеток перед выполнением эксперимента для получения точных данных по динамике роста популяций и для повышения достоверности результатов [12]. Внесение сульфата меди происходило одновременно в пять экспериментальных групп каждого вида, что необходимо для совпадения фазы деления у всех особей популяции по отношению к действию ионов меди. Применена следующая схема эксперимента: в чашку Петри добавляли 1 мл инокулята клоновой культуры, стоковый раствор сульфата меди CuSO₄·5H₂O (ООО «Реактив», х. ч.) и рассчитанный объём питательной среды ESAW, с последующим доведением общего объёма водных компонентов до 10 мл. В контроль с инокулятом клоновой культуры раствор сульфата меди не вносили (табл. 2).

В эксперименте исследовано влияние водного раствора сульфата меди (CuSO₄) в пяти последовательно снижающихся концентрациях ионов меди Cu²⁺ (128 – 64 – 32 – 16 – 8 мкг·л⁻¹) на интенсивность роста популяции и изменение морфологических признаков клеток четырёх видов бентосных диатомовых водорослей. Каждый опыт проведён в трёх повторностях.

Раствор токсиканта вышеуказанных концентраций, полученных путём последовательного двукратного уменьшения исходного объёма (1 мл) стокового раствора, внесённого в чашку Петри вместе с инокулятом (1 мл) и средой ESAW, добавляли в пять соответствующих экспериментальных групп однократно, в первый день эксперимента. Для исключения испарения воды и соответственного увеличе-

Таблица 2. Схема приготовления растворов токсиканта для экспериментального исследования влияния сульфата меди на рост популяции диатомовых водорослей**Table 2.** Scheme of the preparation of toxicant solutions for experimental study of the copper sulfate influence on population growth of diatoms

Экспериментальная группа	Объём инокулята, мл	Объём стокового раствора $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, мл	Объём среды ESAW, мл	Концентрация CuSO_4 ($\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$) в чашке с культурой	Концентрация ионов меди ($\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$) в чашке с культурой
Контроль		0,000	9,000	0,00	0
1	1	1,000	8,000	500,00	128
2		0,500	8,500	250,00	64
3		0,250	8,750	125,00	32
4		0,125	8,875	62,50	16
5		0,064	8,936	31,25	8

ния концентрации токсиканта чашки Петри герметизировали пленкой Parafilm.

Поскольку рост популяции (в экспериментальном растворе объёмом 10 мл) выходит на стационарную фазу на 10-й день, продолжительность каждого эксперимента составляла 10 суток. Подсчёт числа клеток диатомовых водорослей каждого вида и оценку особенностей их морфологии и физиологического состояния проводили на 1, 3, 5, 7 и 10-е сутки эксперимента в одно и то же время, с 8:00 до 10:00. Учёт вели под инвертированным микроскопом при увеличении $\times 20$ для мелкоклеточных видов *P. panduriforme* var. *continua* и *Haslea* sp. и при увеличении $\times 10$ для крупноклеточных видов *E. paludosa* и *C. tenuis*. В качестве тест-параметра показателей роста популяции использовали среднее значение количества живых клеток в 25 полях зрения для каждой экспериментальной группы. Важным условием эксперимента являлось сохранение целостности нарастающей культуры для характеристики действия токсиканта на популяцию клеток в течение 10 суток, поэтому для подсчёта клеток из экспериментальной культуры биоматериал не изымали.

В контроле, как указано выше, вегетативное деление в накопительной культуре каждого тестируемого вида водорослей протекало без добавления токсиканта и без каких-либо иных физико-химических воздействий.

Статистическая обработка результатов токсикологических экспериментов проведена с применением стандартных алгоритмов для параметрического и рангового анализов, входящих в пакет программ Sigmaplot 11.5. Критерий нормальности распределения вариантов (число клеток в каждом из 25 полей просмотра) относительно медианного значения для каждой серии экспериментов оценивали по алгоритму Колмогорова — Смирнова с предварительным тестированием результатов (по методу квантилей) и исключением из расчётов резко выделяющихся значений (агрегаций клеток) в каждой выборке из 25 просмотров. Подобные агрегации с аномально высоким количеством клеток не являются итогом естественного нарастания их количества в ходе эксперимента, но возникают вследствие исходного внесения в чашку Петри инокулята, иногда содержащего соединённые полисахаридами клетки.

Сравнение равенства дисперсий двух нормально распределённых выборок проведено по критерию Фишера (ANOVA) для уровня значимости $P < 0,01$. Последующее сравнение достоверности отличий средних значений признака (изменение числа клеток при разных концентрациях токсиканта и различных периодах экспозиции) выполняли на основе t-критерия Стьюдента (в случае нормальности распределения вариантов в выборке и равенства дисперсий) либо непараметрических критериев Манна — Уитни (при сравнении двух выборок), Крускала — Уоллеса и Данна (Dunn's test) при сравнении более чем двух независимых выборок, в которых распределение вариантов отличается от нормального.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выбор местообитаний для отбора проб и выделение видов диатомовых водорослей для постановки клоновых культур и дальнейшего проведения экспериментов были обусловлены следующими критериями: не должно быть ранее отмечено массового развития вида в биотопах, подверженных интенсивному техногенному загрязнению и иным видам антропогенного воздействия, поскольку это может свидетельствовать о его высокой толерантности к экологическим стрессорам и токсикантам; вид должен быть пригодным для длительного культивирования в условиях лаборатории; вид должен иметь высокий темп деления в культуре. Поскольку постановка клоновых линий бентосных диатомовых водорослей является длительным и трудоёмким процессом, и лишь немногие виды способны выдерживать культивирование, для проведения эксперимента нам удалось выделить четыре вида, отвечающих вышеописанным критериям, из условно чистых местообитаний у восточного побережья Крыма.

Psammodictyon panduriforme var. *continua* (Grunow) Snoeijis 1998 (рис. 1: 1, 2) выделен из эпипелона рыхлого грунта, отобранного у м. Меганом, на глубине 46 м, *Cyclophora tenuis* Castracane 1878 (рис. 1: 7, 8) выделен из эпипелона рыхлого грунта, отобранного у побережья Карадагского горного массива, на глубине 5 м, *Entomoneis paludosa* (W. Smith) Reimer in Patrick & Reimer 1975 (рис. 1: 3, 4) выделен из эпипелона рыхлого грунта, отобранного у побережья Карадагского горного массива, на глубине 10 м, *Haslea* sp. (рис. 1: 5, 6) выделен из эпифитона макрофитов у пос. Рыбачье, на глубине 0,5 м.

Первые два упомянутых таксона — *P. panduriforme* var. *continua* и *C. tenuis* — относятся к числу новых для флоры Bacillariophyta Чёрного моря, обнаруженных нами ранее, причём если *P. panduriforme* var. *continua* уже был отмечен нами неоднократно в северной части черноморского шельфа [6], то *Cyclophora tenuis* в Чёрном море найден лишь второй раз. Впервые *C. tenuis* был обнаружен нами в б. Омега в июле 2004 г., на песчаном субстрате на глубине 1,5 м, но поскольку по единичному экземпляру идентификация не могла быть осуществлена корректно, вид в то время зарегистрирован не был. В настоящей работе на основании полученных данных СЭМ и сравнения с имеющимися данными СМ видовую принадлежность *C. tenuis* удалось верифицировать.

Вид *Entomoneis paludosa* распространён повсеместно в условно чистых местообитаниях, но редок. Не определённый до вида представитель рода *Haslea* является, возможно, новым для науки, но его таксономическое описание требует дальнейших исследований.

По результатам экспериментов установлено, что виды *P. panduriforme* var. *continua* и *Haslea* sp. характеризуются низкой токсикорезистентностью к ионам меди. Отмечено, что для всех концентраций токсиканта, включая минимальную ($8 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1} \text{ Cu}^{2+}$), наблюдается ингибирование или полное прекращение нарастания числа клеток уже при экспозиции 3 суток (рис. 2 А, Б). Соответственно, для всех концентраций токсиканта тесты на достоверность отличий параметров роста числа клеток в течение эксперимента от таковых в его начале (1-е сутки) не были подтверждены несмотря на то, что в контроле рост численности клеток обоих видов по мере увеличения периода экспозиции (1 – 3 – 5 – 7 – 10 суток) шёл очень интенсивно (по экспоненциальной или сигмоидной модели). С учётом результатов реакции диатомовых водорослей на использованный нами токсикант можно утверждать, что критические концентрации ионов меди, при которых наблюдается значительная, но не полная элиминация клеток обоих вышеупомянутых видов, могут находиться в диапазоне от 0 до $8 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$. Более точное определение пороговых концентраций требует проведения дополнительных серий экспериментов с малыми (менее $8 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$) концентрациями токсиканта.

Для *P. panduriforme* var. *continua* отмечено множественное нерасхождение створок в процессе морфогенеза (рис. 3 А), а также единичные случаи сферификации содержимого клеток на 3, 5 и 7-е сутки эксперимента (рис. 3 В). На 10-е сутки данное изменение наблюдали в каждом 4-м поле просмотра.

Виды *E. paludosa* и *C. tenuis* характеризуются более высокой резистентностью к токсическому воздействию ионов меди (рис. 2, С-D). В контроле рост численности клеток этих видов по мере увеличения периода экспозиции шёл по экспоненциальной модели ($R^2 = 0,96 \div 0,98$).

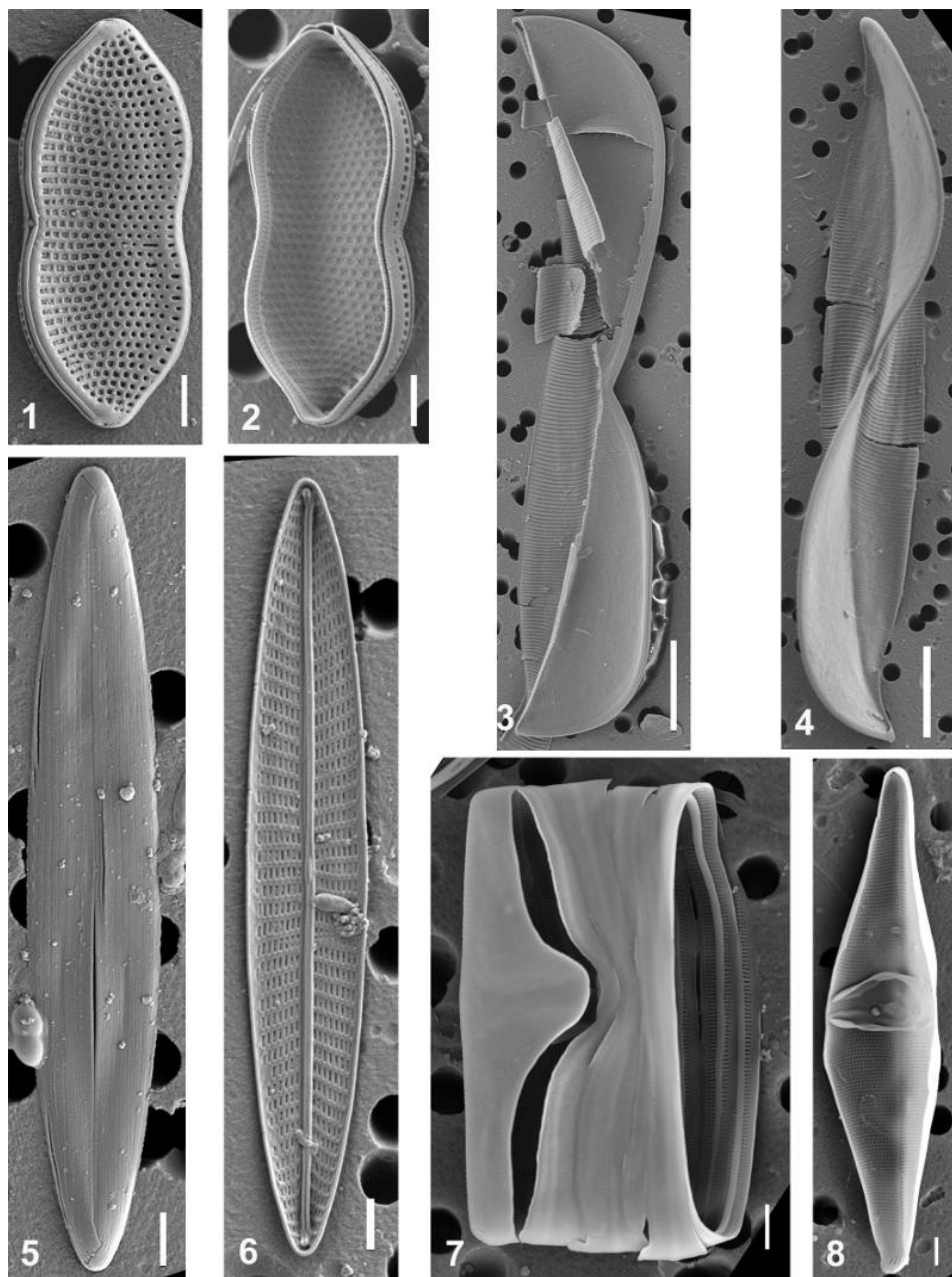


Рис. 1. Виды бентосных диатомовых водорослей, выделенные в клоновые линии и использованные в эксперименте (СЭМ). 1, 2 — *Psammodictyon panduriforme* var. *continua* (вид створки с внешней и внутренней стороны соответственно); 3, 4 — *Entomoneis paludosa* — вид со стороны пояса и киля); 5, 6 — *Haslea* sp. (вид створки с внешней и внутренней стороны соответственно); 7, 8 — *Cyclophora tenuis* (вид створки с внешней и внутренней стороны соответственно). Размерная шкала: 1, 2, 5, 6, 7, 8 — 2 мкм; 3, 4 — 10 мкм

Fig. 1. Clonal lines of benthic diatoms used in the experiments (SEM). 1, 2 – *Psammodictyon panduriforme* var. *continua* (external and internal view, respectively); 3, 4 – *Entomoneis paludosa* (girdle view and keel view, respectively); 5, 6 – *Haslea* sp. (external and internal view, respectively); 7, 8 – *Cyclophora tenuis* (external and internal view, respectively). Scale bar: 1, 2, 5, 6, 7, 8 – 2 mkm; 3, 4 – 10 mkm

При добавлении токсиканта динамика роста численности клеток *C. tenuis* характеризовалась следующими особенностями: после трёх суток экспозиции средняя численность клеток вида недостоверно отличается от таковой в контроле, что справедливо для всех исследованных концентраций ионов меди, за исключением наибольшей ($128 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$). Таким образом, средняя численность клеток в культуре (по результатам подсчёта клеток в 25 полях просмотра) через трое суток становится достоверно ниже, чем в контроле, только при концентрации токсиканта $128 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ и выше (рис. 2, D).

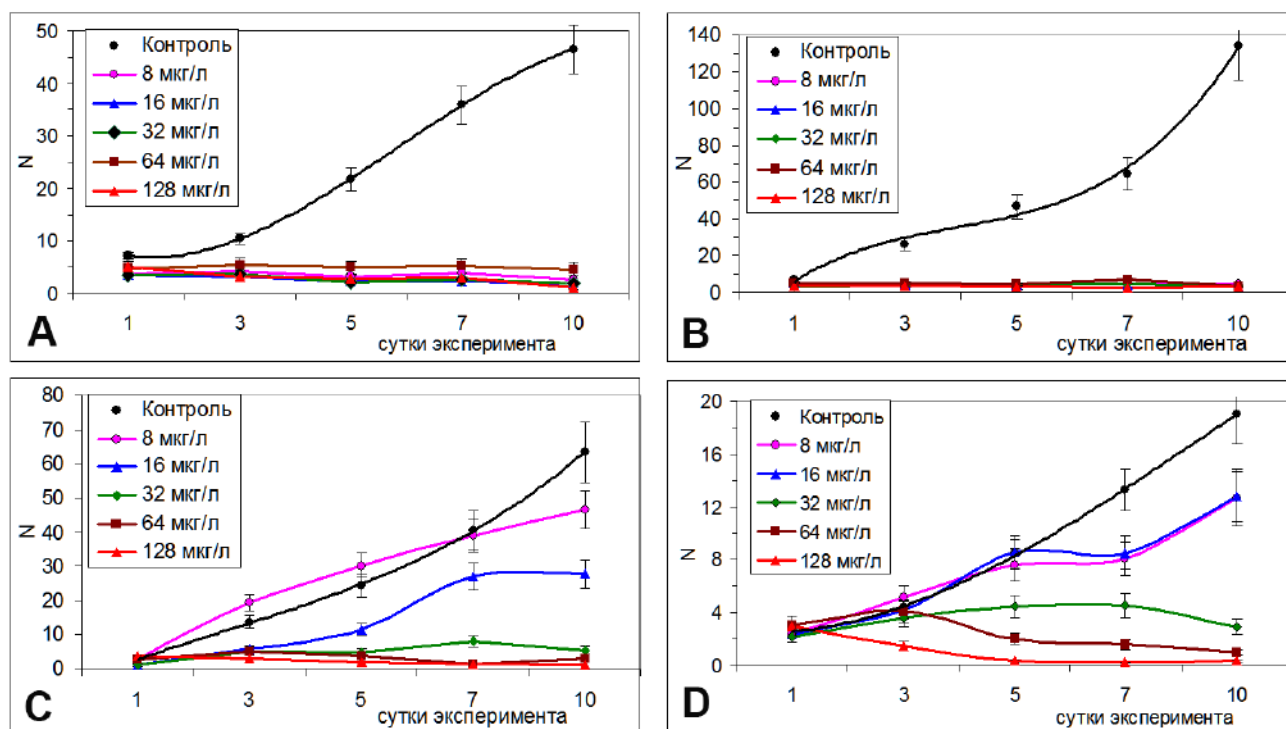


Рис. 2. Изменение численности клеток в эксперименте при разных сроках экспозиции и концентрациях токсиканта: А — *P. panduriforme* var. *continua*, В — *Haslea* sp., С — *E. paludosa*, D — *C. tenuis*. N — среднее число клеток в поле просмотра

Fig. 2. Changes in cells number at different duration of the experiment and toxicant concentrations: А — *P. panduriforme* var. *continua*, В — *Haslea* sp., С — *E. paludosa*, D — *C. tenuis*. N — average number of cells in each microscope viewing field

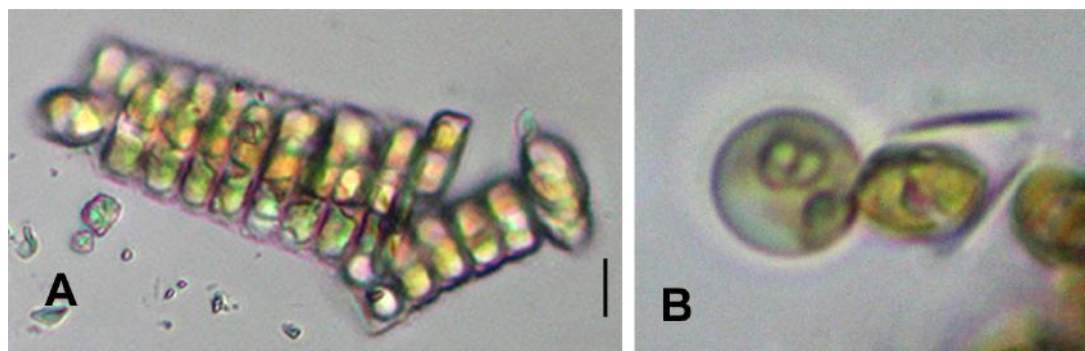


Рис. 3. Морфологические изменения у *P. panduriforme* var. *continua* под воздействием сульфата меди (СМ, $\times 40$): А — множественное нерасхождение створок в процессе морфогенеза; В — сферификация содержимого клеток на 10-е сутки эксперимента. Размерная шкала: А, В — 10 мкм

Fig. 3. Abnormality of morphogenesis of *P. panduriforme* var. *continua* under copper sulphate impact (LM, $\times 40$): А — multiple non-separations of valves; В — spherification of protoplast for 10th day of the experiment. Scale bar: А, В — 10 mkm

После 5 суток эксперимента достоверное снижение роста численности клеток по сравнению с таковым в контроле отмечено при трёх наиболее высоких концентрациях ионов меди: 32, 64 и 128 мкг·л⁻¹, тогда как при двух наименьших концентрациях (16 и 8 мкг·л⁻¹) степень угнетения роста недостоверно отличается как от контрольных значений, так и между собой (табл. 3). Сходные тенденции достоверного угнетения роста числа клеток при концентрациях токсиканта 32–128 мкг·л⁻¹ сохраняются и после 7- и 10-суточной экспозиции (рис. 2 D). В целом можно считать, что для *C. tenuis* пороговой является

ся концентрация ионов меди $32 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$: при её достижении угнетение роста клеток (по отношению к контролю) всегда статистически достоверно.

Для *E. paludosa* динамика численности клеток при сходстве общих тенденций несколько отличается от таковой *C. tenuis*, а именно: для короткого срока экспозиции (1–3 суток) снижение средней численности клеток достоверно отличается от такового в контроле при всех использованных концентрациях ионов меди, за исключением наименьшей ($8 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$) (рис. 2 С). При более длительных периодах экспозиции (5–10 суток) эта тенденция сохраняется, т. е. число клеток в культурах становится достоверно ниже контрольного уровня уже при воздействии токсиканта в концентрации $16 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ и выше (табл. 3).

Таблица 3. Статистическая оценка достоверности отличий средней численности клеток *C. tenuis* и *E. paludosa* при разных сроках экспозиции и концентрациях токсиканта (Cu^{2+})

Table 3. Statistical evaluation of significance of the difference in average cell number of *C. tenuis* and *E. paludosa* under different duration of experiment and toxicant concentrations (Cu^{2+})

Концентрация ионов меди (Cu^{2+}), $\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$	<i>Cyclophora tenuis</i>				<i>Entomoneis paludosa</i>			
	3 сут. (Q)*	5 сут. (Q)	7 сут. (Q)	10 сут. (Q)	3 сут. (Q)	5 сут. (Q)	7 сут. (Q)	10 сут. (Q)
128	4,05 (+)	7,06 (+)	8,61 (+)	8,24 (+)	6,24 (+)	7,59 (+)	7,52 (+)	8,84 (+)
64	0,16 (–)	5,19 (+)	7,09 (+)	7,37 (+)	4,81 (+)	6,05 (+)	7,57 (+)	7,37 (+)
32	1,05 (–)	2,74 (+)	4,69 (+)	5,83 (+)	4,65 (+)	5,52 (+)	4,75 (+)	6,14 (+)
16	0,18 (–)	0,28 (–)	2,21 (–)	1,48 (–)	4,02 (+)	2,69 (+)	1,78 (–)	3,32 (+)
8	0,92 (–)	0,18 (–)	2,43 (–)	2,27 (–)	0,59 (–)	0,48 (–)	0,86 (–)	0,84 (–)

*Q — статистика Данна (Dunn's test) при сравнении ранговых средних (для $P = 0,05$);

(+/-) — достоверные /недостоверные отличия от контроля

*Q – Dunn's test results under comparison of the rank average values ($P = 0.05$)

(+/-) – significant / non significant differences from the control

Отметим, что только для *E. paludosa* наблюдали незначительный рост численности клеток на 3-и – 5-е сутки эксперимента при воздействии минимальной концентрации ионов меди ($8 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$), однако недостоверно отличный от такового в контроле (см. рис. 2 С). Такая реакция в целом может соответствовать первой фазе классической модели отклика тест-объекта на стресс (активации роста), которая при дальнейшей экспозиции сменяется фазой угнетения роста числа клеток. Можно заключить, что для *E. paludosa* пороговой является концентрация ионов меди $16 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$: при достижении данного уровня токсиканта различия средних значений численности клеток (по отношению к контролю) становятся статистически достоверными.

Для обоих рассмотренных видов при наименьших концентрациях токсиканта ($8\text{--}16 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$) в ходе всего периода эксперимента достоверно отмечено увеличение среднего числа клеток популяции по отношению к показателям за предшествующий период экспозиции. Это позволяет говорить о том, что для *C. tenuis* и *E. paludosa* концентрации ионов меди $8\text{--}16 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ хотя и вызывают достоверное ингибирование роста численности клеток относительно контроля (для *C. tenuis* – на 7–10 сутки эксперимента), но не приводят к полному прекращению роста популяции, как это происходит у высокочувствительных видов *P. panduriforme* var. *continua* и *Haslea* sp.

Выявлена характерная морфологическая особенность реакции *C. tenuis* и *E. paludosa* на воздействие субпороговых концентраций ионов меди ($128\text{--}64 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$): в первые дни проведения эксперимента клетки изменяют цвет хлоропластов на более зелёный и плавают в толще культуральной среды, практически не оседая на дно чашки Петри. Для *E. paludosa* также отмечено следующее: начиная с третьих суток экспозиции, после фазы цитокинеза у клетки отсутствует расхождение створок с одной из сторон (рис. 4 А, В). После череды вегетативных делений число неразошедшихся створок может составлять от 2 до 7. Тем не менее, подобная клеточная агрегация продолжает быть достаточно актив-

ной, она способна плавать в толще культуральной среды либо опускаться на дно чашки, хлоропласты в клетке имеют обычный коричневатый или зеленоватый оттенок. Кроме того, отмечены единичные случаи сферификации содержимого клеток (рис. 4 С).

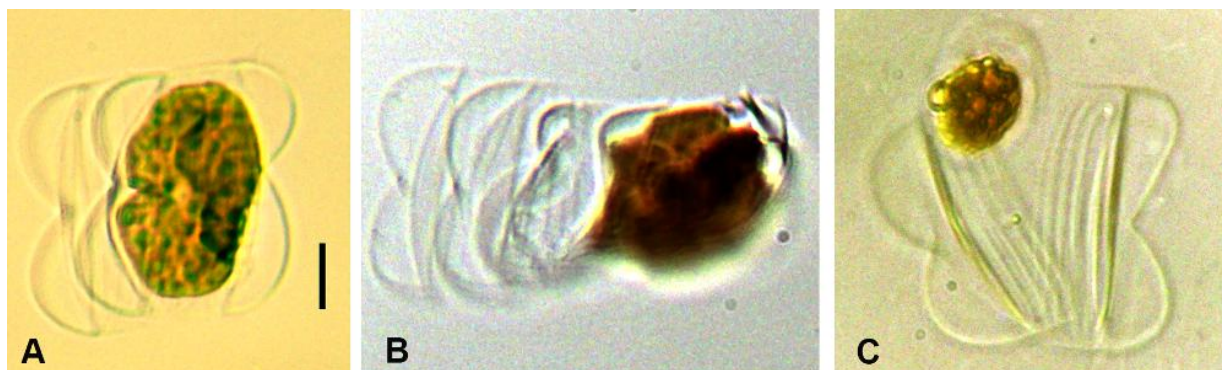


Рис. 4. Морфологические изменения у *E. paludosa* под воздействием сульфата меди (СМ, $\times 40$): А, В — множественное нерасхождение створок в процессе морфогенеза; С — сферификация содержимого клеток. Размерная шкала: А, В, С — 10 мкм

Fig. 4. Abnormality of morphogenesis of *E. paludosa* under the impact of copper sulfate (LM, $\times 40$): А, В — multiple non-separation of valves; С — spherification of protoplast. Scale bar: А, В, С — 10 mkm

Ранее было показано [20], что для вида *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin 1897 при экспозиции эксперимента 14 суток и концентрациях сульфата меди $0,13\text{--}0,25\text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ (или $32\text{--}63\text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ в пересчёте на концентрацию ионов меди) наблюдаются сходные морфологические изменения клеток, остановка работы пигментных систем, а также уменьшение темпа вегетативного деления, что характеризует данный вид как высокочувствительный к действию токсиканта. Эти результаты согласуются с нашими данными. При этом отметим, что длина клеток *P. tricornutum* (в среднем $10\text{--}15\text{ мкм}$) лишь немного меньше длины клеток штаммов, использованных в наших исследованиях. Известно, что одним из факторов, влияющих на чувствительность штаммов, является морфология клеток [7]. По размерным характеристикам (см. табл. 1) *P. panduriforme* var. *continua* и *Haslea* sp. относятся к мелкоклеточным видам (длина створки $19,4$ и $91,4\text{ мкм}$), характеризуются вытянутой гитарообразной и игольчатой формой клеток, соответственно, имеют большую удельную поверхность и вследствие этого могут обладать большей чувствительностью к воздействию токсикантов. По сравнению с ними клетки видов *C. tenuis* и *E. paludosa* характеризуются средними и крупными размерами (длина створки $249,4$ и $118,4\text{ мкм}$), за счёт вставочных ободков образуют больше пространства для протопласта и, соответственно, имеют меньшую удельную поверхность клеток, поэтому их отклик на воздействие сходных концентраций ионов меди выражен слабее.

Для *Ditylum brightwellii* (West) Grunow ex Van Heurck emend Dzhafarova 1984 при тестировании диапазона значений соединений меди $0,2\text{--}11,0\text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ в течение более чем 6 месяцев выявлено, что повышенное содержание ионов меди в среде вызывает увеличение размеров клеток и усиленное выделение слизистого секрета при агрегировании клеток [25]. Увеличение темпа вегетативного деления отмечается при воздействии ионов меди в диапазоне концентраций от $3,0$ до $6,0\text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$, при $8,0\text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ и выше темп деления клеток замедляется [25].

Поскольку медь является эссенциальным элементом, сульфат меди используется для приготовления большинства культуральных сред. К примеру, в протоколе приготовления среды L1, являющейся модификацией наиболее широко употребляемой среды f/2, указаны концентрации CuSO_4 $0,245\text{ мг} \cdot 100\text{ мл}^{-1}$ [18]. Заметим, что эти значения ($2450\text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$) намного выше, чем наибольшие значения концентрации токсиканта, применённые в наших экспериментах ($500\text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$). Отметим также, что в использованной нами среде ESAW соединения меди не содержатся, что позволило нам протестировать именно видоспецифичную чувствительность диатомовых к сульфату меди и сделать вывод

о строго индивидуальном характере воздействия данного токсиканта на клетки разных видов. Вероятнее всего, отклик различных видов диатомей на воздействие ионов меди связан с потенциальными видоспецифическими адаптационными способностями к действию токсиканта. Для подтверждения или опровержения данного предположения очевидна необходимость проведения подобного рода исследований с привлечением большего количества видов бентосных диатомовых водорослей. Полученные в настоящей работе результаты могут быть применимы для оптимизации протокола приготовления искусственной морской среды для культивирования диатомовых в лабораторных условиях.

В заключение отметим: хотя токсикологические эксперименты традиционно проводят с планктонными видами диатомовых водорослей [1, 5, 7, 10, 13, 15, 22], не менее важны немногочисленные пока ещё исследования действия токсикантов на бентосные Bacillariophyta, находящиеся в непосредственном контакте с донными отложениями прибрежных акваторий, где аккумуляция поллютантов различного генезиса идёт наиболее интенсивно [6, 10]. Оценка жизнеспособности и физиологического состояния популяций и отдельных клеток необходима для формирования полной картины воздействия ключевых токсикантов, к которым относится медь, на доминирующие виды и таксоцены бентосных диатомовых водорослей. Такие исследования позволят выделить виды — потенциальные тест-объекты, а также установить видоспецифичные границы их чувствительности и вариативность клеточного ответа, что значительно расширит фундаментальные данные основ биоразнообразия как отдела Bacillariophyta, так и морского микрофитобентоса в целом.

Заключение. По результатам токсикологических экспериментов по влиянию сульфата меди в концентрациях 128, 64, 32, 16 и 8 мкг·л⁻¹ (в пересчёте на ионы меди) на клоновые культуры четырёх видов морских бентосных диатомовых водорослей (*Psammodyctyon panduriforme* var. *continua*, *Haslea* sp., *Cyclophora tenuis* и *Entomoneis paludosa*) установлено, что по степени резистентности к токсиканту изученные виды можно подразделить на две группы.

К высокочувствительным отнесены виды *P. panduriforme* var. *continua* и *Haslea* sp., которые прекращают деление клеток уже при минимальных концентрациях использованных в эксперименте ионов меди (8 мкг·л⁻¹). Токсический порог воздействия токсиканта, вызывающий остановку развития и роста численности клеток у данных двух видов даже после кратковременной экспозиции (3 суток), очень низок и лежит в диапазоне значений 0–8 мкг·л⁻¹.

К группе среднетолерантных отнесены виды *C. tenuis* и *E. paludosa*. Для *E. paludosa* пороговая концентрация ионов меди, при воздействии которой различия в средних значениях численности клеток в полях просмотра по отношению к контролю всегда статистически достоверны, независимо от продолжительности периода экспозиции (от 3 до 10 суток), составляет 16 мкг·л⁻¹. Для *C. tenuis* пороговая концентрация ионов меди, при которой угнетение роста клеток относительно контроля всегда статистически высоко достоверно с 5-х суток эксперимента, составляет 32 мкг·л⁻¹.

При низких (8 и 16 мкг·л⁻¹) концентрациях токсиканта рост численности клеток водорослей двух перечисленных видов по мере увеличения периода экспозиции аппроксимируется степенной (для *C. tenuis*) либо затухающей сигмоидной (для *E. paludosa*) моделью. Средние значения численности клеток в эксперименте были достоверно ниже таковых в контроле, в котором рост численности популяции клеток у всех четырёх исследованных видов диатомовых водорослей на протяжении эксперимента описывался экспоненциальной моделью.

Для *C. tenuis* и *E. paludosa* при концентрациях ионов меди (128–64 мкг·л⁻¹) клетки изменяли цвет хлоропластов на более зелёный и длительно плавали, не оседая на дно чашки Петри. Отмечен эффект нарушения процесса морфогенеза у *P. panduriforme* var. *continua* и *E. paludosa*, выраженный в множественном нерасхождении створок их клеток с одной стороны после вегетативной фазы цитокинеза.

Установлен видоспецифичный характер чувствительности бентосных диатомовых водорослей к сульфату меди. Отклик различных исследованных видов Bacillariophyta зависел от размеров клеток, величины их удельной поверхности и внутренних адаптационных возможностей таксона к воздействию

стрессора.

P. panduriforme var. *continua* и *Haslea* sp. относятся к мелкоклеточным видам, имеют большую удельную поверхность и вследствие этого могут обладать большей чувствительностью к воздействию токсикантов. По сравнению с ними клетки видов *C. tenuis* и *E. paludosa* характеризуются средними и крупными размерами и имеют, соответственно, меньшую удельную поверхность клеток, поэтому их отклик на воздействие сходных концентраций ионов меди выражен слабее.

Полученные данные могут быть применены для усовершенствования состава искусственных морских сред для культивирования диатомовых водорослей. Виды *Psammodyctyon panduriforme* var. *continua*, *Haslea* sp., *Cyclophora tenuis* и *Entomoneis paludosa* могут быть использованы в качестве тест-объектов при опосредованной оценке качества морской среды.

Работа выполнена в рамках госзадания ФГБУН ИМБИ по теме № 0828-2014-0014 «Мониторинг биологического разнообразия гидробионтов Черноморско-Азовского бассейна и разработка эффективных мер по его сохранению» (гос. рег. № 115081110013).

Благодарность: авторы глубоко признательны коллективу лаборатории физиологии за оказанные консультации и начальнику отдела электронной микроскопии Д. В. Фомину за предоставленную возможность работы на СЭМ в ЦКП ФГБУН ННЦМБ ДВО РАН (г. Владивосток).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Барина С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. *Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды*. Тель-Авив : PiliesStudio, 2006. 498 с. [Barinova S. S., Medvedeva L. A., Anissimova O. V. *Diversity of algae indicators in environmental assessment*. Tel Aviv: Pilies Studio, 2006, 498 p. (in Russ.)].
2. Гайсина Л. А., Фазлутдинова А. И., Кабиров Р. Р. *Современные методы выделения и культивирования водорослей* : учебное пособие. Уфа : Изд-во БГПУ, 2008. 152 с. [Gaisina L. A., Fazlutdinova A. I., Kabirov R. R. *Sovremennyye metody vydeleniya i kultivirovaniya vodoroslei: uchebnoe posobie*. Ufa: Izd-vo BGPU, 2008, 152 p. (in Russ.)].
3. Гелашвили Д. Б., Безель В. С., Романова Е. Б., Безруков М. Е., Силкин А. А., Нижегородцев А. А. *Принципы и методы экологической токсикологии*. Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2015. 142 с. [Gelashvili D. B., Bezel V. S., Romanova E. B., Bezrukov M. E., Silkin A. A., Nizhegorodtsev A. A. *Printsipy i metody ekologicheskoi toksikologii*. Nizhnii Novgorod: Nizhnegorodskii gosuniversitet, 2015, 142 p. (in Russ.)].
4. Крайнюкова А. Н. Биотестирование и охрана вод от загрязнения // *Методы биотестирования вод*. Черноголовка, 1988. С. 4–21. [Kraynukova A. N. Biotestirovanie i okhrana vod ot zagrazneniya. In: *Metody biotestirovaniya vod*. Chernogolovka, 1988, pp. 4–21. (in Russ.)].
5. Маркина Ж. В., Айздайчер Н. А. Оценка качества вод Амурского залива Японского моря на основе биотестирования с применением одноклеточной водоросли *Pheodactylum tricornutum* Bohlin // *Сибирский экологический журнал*. 2011. Т. 1. С. 99–105. [Markina Z. V., Aizdaicher N. A. *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin bioassay of water quality of amur bay (the Sea of Japan). *Sibirskii ekologicheskii shurnal*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 99–105. (in Russ.)].
6. Неврова Е. Л., Снигирева А. А., Петров А. Н., Ковалева Г. В. *Руководство по изучению морского микрофитобентоса и его применению для контроля качества среды / под ред. А. В. Гаевской*. Севастополь ; Симферополь : Н. Орианда, 2015. 176 с. [Nevrova E. L., Snigireva A. A., Petrov A. N., Kovaleva G. V. *Guidelines from quality control of the Black Sea. Microphytobenthos*. A V. Gaevskaya (Ed.). Sevastopol; Simferopol: N. Orianda, 2015, 176 p. (in Russ.)].
7. Шилова Е. Л. *Влияние тяжелых металлов на представителей пресноводного фито- и зоопланктона в условиях засоления*: дис. ... канд.

- биол. наук. Саратов, 2014. 133 с. [Shilova E. L. *Vliyanie tyazhelykh metallov na predstavitelei presnovodnogo fito- I zooplanktona v usloviyakh zasoleniya*: dis. ... kand. biol. nauk. Saratov, 2014, 133 p. (in Russ.)].
8. Флеров Б. А. Биотестирование: терминология, задачи, перспективы // *Теоретические вопросы биотестирования*. Волгоград : АН СССР, Ин-т биологии внутренних вод, 1983. С. 13–20. [Flerov B. A. Biotestirovanie: terminologiya, zadachi, perspektivy. In: *Teoreticheskie voprosy biotestirovaniya*. Volgograd: AN SSSR, In-t biologii vnutrennikh vod, 1983, pp. 13–20. (in Russ.)].
 9. *Эколого-токсикологические аспекты загрязнения морской среды* / под ред. С. А. Патина. Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. Т. 5. 116 с. [*Ekologo-toksikologicheskie aspekty zagryazneniya morskoi sredy*. S. A. Patin (Ed.). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, vol. 5, 116 p. (in Russ.)].
 10. Behrenfeld M. J., Boss E., Siegel D. A., Shea D. M. Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, vol. 19, iss. 1, GB1006. doi: [10.1029/2004GB002299](https://doi.org/10.1029/2004GB002299).
 11. Berges J. A., Franklin D. J., Harrison P. J. Evolution of an artificial seawater medium: improvements in enriched seawater, artificial water over the last two decades. *Journal of Phycology*, 2001, vol. 37, iss. 6, pp. 1138–1145. doi: [10.1046/j.1529-8817.2001.01052.x](https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2001.01052.x).
 12. Bishop N. I., Senger H. Preparation and photosynthetic properties of synchronous cultures of *Scenedesmus*. *Methods in Enzymology*, 1971, vol. 23, pp. 53–66. doi: [10.1016/S0076-6879\(71\)23079-2](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(71)23079-2).
 13. Cid A., Herrero C., Torres E., Abalde J. Copper toxicity on the marine microalga *Phaeodactylum tricornutum*: effects on photosynthesis and related parameters. *Aquatic Toxicology*, 1995, vol. 31, iss. 2, pp. 165–174. doi: [10.1016/0166-445X\(94\)00071-W](https://doi.org/10.1016/0166-445X(94)00071-W).
 14. Field C. B., Behrenfeld M. J., Randerson J. T., Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, vol. 281, iss. 5374, pp. 237–240. doi: [10.1126/science.281.5374.237](https://doi.org/10.1126/science.281.5374.237).
 15. Florence T. M., Stauber J. L. Toxicity of copper complexes to the marine diatom *Nitzschia closterium*. *Aquatic Toxicology*, 1986, vol. 8, iss. 1, pp. 11–26. doi: [10.1016/0166-445X\(86\)90069-X](https://doi.org/10.1016/0166-445X(86)90069-X).
 16. Fourtanier E., Kociolek J. P. *Catalogue of Diatom Names*. California Academy of Sciences, 2011. Available at: <http://researcharchive.calacademy.org/research/diatoms/names/index.asp> [accessed 12.07.2017].
 17. Guillard R. R. L., Hargraves P. E. Stichochrysis immobilis is a diatom, not a chrysophyte. *Phycologia*, 1993, vol. 32, no. 3, pp. 234–236. doi: [10.2216/i0031-8884-32-3-234.1](https://doi.org/10.2216/i0031-8884-32-3-234.1).
 18. Harrison P. J., Waters R. E., Taylor F. J. R. A broad spectrum artificial sea water medium for coastal and open ocean phytoplankton. *Journal of Phycology*, 1980, vol. 16, iss. 1, pp. 28–35. doi: [10.1111/j.0022-3646.1980.00028.x](https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1980.00028.x).
 19. Hustedt F. Die Kieselalgen Deutschlands, Osterreichs und der Schweiz. In: *Kryptogamenflora von Deutschland, Osterreichs und der Schweiz*. L. Rabenhorst (Ed.). Leipzig, 1961–1966, bd. 7, teil 3, 816 p.
 20. Markina Zh. V., Aizdaicher N. A. Content of photosynthetic pigments, growth, and cell size of microalga *Phaeodactylum tricornutum* in the copper-polluted environment. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2006, vol. 53, no. 3, pp. 305–309.
 21. Markina Zh. V., Aizdaicher N. A. Influence of the ariel detergent on the growth and physiological state of the unicellular algae *Dunaliella salina* (Chlorophyta) and *Plagioselmis protonga* (Cryptophyta). *Hydrobiological Journal*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 49–56.
 22. Metal ions in Biological systems. Vol. 44: *Biogeochemistry, Availability and Transport of Metals in the Environment*. H. Sigel, A. Sigel, R. K. Sigel (Eds.). New York, 2005, 352 p.
 23. Nelson D. M., Treguer P., Brzezinski M. A., Leynaert A., Queguiner B. Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, vol. 9, iss. 3, pp. 359–372.

- doi: [10.1029/95GB01070](https://doi.org/10.1029/95GB01070).
24. Polyak Y. M., Zaytseva T. V., Petrova V. N., Medvedeva N. G. Development of mass cyanobacteria species under heavy metals pollution. *Hydrobiological Journal*, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 75–90.
 25. Rijstenbil J. W., Gerringa L. J. A. Interactions of algal ligands, metal complexation and availability, and cell responses of the diatom *Ditylum brightwellii* with a gradual increase in copper. *Aquatic Toxicology*, 2002, vol. 56, iss. 2, pp. 115–131. doi: [10.1016/S0166-445X\(01\)00188-6](https://doi.org/10.1016/S0166-445X(01)00188-6).
 26. Round F. E., Crawford R. M., Mann D. G. *The diatoms. Biology and morphology of the genera*. Cambridge : Cambridge University press, 1990, 747 p.
 27. Smolyakov B. S., Ryzhikh A. P., Romanov R. E. The fate of Cu, Zn and Cd in the initial stage of water system contamination: the effect on phytoplankton activity. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, vol. 184, iss. 1–3, pp. 819–825.
 28. Tempère J., Peragallo H., Peragallo M. *Diatomées du Monde Entier* : in 30 fascs. 2nd ed. Arcachon : J. Tempère, 1912, fascs. 20–23, pp. 305–352.
 29. *The Diatom World*. Seckbach, J., Kociolek, J. P. (Eds). Dordrecht ; Heidelberg ; London ; New-York: Springer, 2011, 533 p.
 30. Witkowski A., Lange-Bertalot H., Metzeltin D. *Diatom flora of Marine coast*. Koenigstein: Koeltz Scientific Books, 2000, vol. 1, 926 p. (Iconographia Diatomologica : Annotated Diatom Monographs. H. Lange-Bertalot (Ed.); vol. 7).
 31. Yan J. X., Liu J. L., Yi L., Lang S. S. Effect of water current on the distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons heavy metals and benthic diatom community in sediments of Haihe estuary, China. *Environmental Science & Pollution Research*, 2014, vol. 21, iss. 20, pp. 12050–12061.

COPPER SULPHATE IMPACT ON GROWTH AND CELL MORPHOLOGY OF CLONAL STRAINS OF FOUR BENTHIC DIATOM SPECIES (BACILLARIOPHYTA) FROM THE BLACK SEA

D. Yu. Romanova, A. N. Petrov, E. L. Nevrova

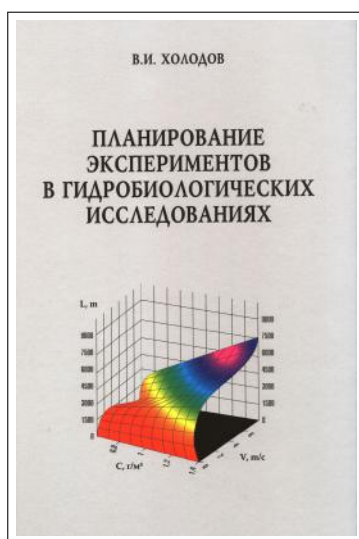
Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS, Sevastopol, Russian Federation

E-mail: diaromanova@yandex.ru

Many species of benthic diatoms (Bacillariophyta) are sensitive to ecological stressors and therefore changes in its parameters of development under various toxicants' impact can be considered as bioindicators on indirect assessment of the environment quality. The study is focused on investigation of the population growth and changes in morphologic features of diatom cells in cloned cultures under single addition of copper sulfate (CuSO_4) in five successively decreasing concentrations ($128 \text{ mkg}\cdot\text{l}^{-1}$ to $8 \text{ mkg}\cdot\text{l}^{-1}$ of copper ions). The cloned cultures of 4 marine benthic species Bacillariophyta: *Cyclophora tenuis* Castracane 1878, *Psammodyctyon panduriforme* var. *continua* (Grunow) Snoeijs 1998, *Entomoneis paludosa* (W. Smith) Reimer in Patrick & Reimer 1975 and *Haslea* sp. were used in experiments. The first two taxa were reported from the Black Sea diatom flora for the first time. By the results of 10-days toxicological experiments was ascertain that according to resistance to the toxicant the considered species are split into two groups. The mostly sensitive species *P. panduriforme* var. *continua* and *Haslea* sp. stopped population growth already at the minimum concentration of toxicant ($8 \text{ mkg}\cdot\text{l}^{-1} \text{ Cu}^{2+}$). Toxic benchmark of the copper sulphate causing to termination of cell development and growth of cell number for these 2 species is very low and falls within range 0 to $8 \text{ mkg}\cdot\text{l}^{-1} \text{ Cu}^{2+}$. Considering moderately tolerant species *E. paludosa*, the threshold concentration of copper ions is $16 \text{ mkg}\cdot\text{l}^{-1}$, when differences in average cell number comparing with the control level are statistically significant under various exposure time of experiments. For tolerant *C. tenuis* the threshold concentration of Cu^{2+} is $32 \text{ mkg}\cdot\text{l}^{-1}$ by which depression of cell growth always significantly differed from the control. By low concentrations of copper ions (8 and $16 \text{ mkg}\cdot\text{l}^{-1}$), increasing the cell number of moderately tolerant species along to extension of experiments can be well extrapolated by power function (for *C. tenuis*) or by sigmoid function (for *E. paludosa*). In the control, population growth of all 4 investigated diatom species can

be approximated by the exponential curve fitting for different duration of experiments (3 to 10 days). The certain peculiarities of diatom cells response under high concentration of toxicant, such as abnormality of morphogenesis and multiple non-separations of valves from any one side of cell after vegetative phase of cytokinesis were marked.

Keywords: diatom algae, biotesting, cytometry, copper sulfate, toxicant, newly-found species for the Bacillariophyta flora, Black Sea



Холодов В. И. Планирование экспериментов в гидробиологических исследованиях. – Симферополь: Н. Орианда, 2016. – 196 с.; 13 ил., 80 табл., библи. 31.

Руководство по организации и проведению экспериментальных и полевых гидробиологических и биологических исследований. Подробно на примерах изложена методика планирования активных экспериментов на основе регрессионного и дисперсионного анализов. Описаны методы пассивного эксперимента (полевых наблюдений). Для научных сотрудников, аспирантов и студентов, специализирующихся в морской биологии, гидробиологии и биологии.

Kholodov V. I. Experimental design techniques in hydrobiology. Simferopol, 2016, 196 p.

Experimental design techniques and the related organizational principles are given for laboratory and researches biology and hydrobiology. Using examples, the Guide offers a detailed methodology of the active experiment design based on regression analysis and the analysis of variance. Methods supporting passive experiment, i. e., field observation, are also described. The Guide is intended for scientists, postgraduates and university students having concern in marine biology, hydrobiology and biology.

УДК 594.124:574.64(262.5)

КОНЦЕНТРАЦИЯ МЫШЬЯКА В ТКАНЯХ КУЛЬТИВИРУЕМОЙ МИДИИ *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* LAM., ВОДЕ И ДОННЫХ ОСАДКАХ (КРЫМ, ЧЁРНОЕ МОРЕ)

© 2017 г. **В. И. Рябушко**, д-р биол. наук, гл. н. с., **А. Ф. Козинцев**, канд. биол. наук, н. с.,
А. М. Тоичкин, вед. инж.

Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия
E-mail: rabushko2006@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.05.2017 г. Принята к публикации 01.08.2017 г.

Мышьяк является одним из токсикантов, для которых разработаны нормативы предельно допустимых концентраций в морских организмах, используемых в пищевых целях. Поэтому необходимы сведения о содержании мышьяка в тканях культивируемых гидробионтов, а также в воде и грунте акваторий расположения морских хозяйств. В качестве модельного объекта выбрана ферма, находящаяся в Карантинной бухте (г. Севастополь, Крым, Чёрное море). Содержание мышьяка в пробах определяли с помощью метода инверсионной вольтамперометрии. Среднегодовая концентрация мышьяка в воде акватории марихозяйства Карантинной бухты оказалась в 1,2 раза ниже рыбохозяйственных нормативов, в донных осадках — в 1,5 раза ниже норм по «голландским листам». Концентрация мышьяка в мидии почти на порядок ниже предельно допустимых концентраций для пищевых продуктов, в частности моллюсков.

Ключевые слова: мышьяк, мидия *Mytilus galloprovincialis*, вода, грунт, Чёрное море

Выращивание морских организмов является в настоящее время одним из важнейших направлений хозяйственной деятельности человека. Однако для её осуществления необходима оценка степени загрязнённости среды опасными для здоровья человека и морских организмов химическими элементами. Одним из таких загрязнителей является широко распространённый в природе микроэлемент мышьяк (As). Загрязнению окружающей среды мышьяком способствуют как природные, так и антропогенные источники. Так, около 60 % атмосферного мышьяка поступает в среду от горнодобывающих предприятий как точечные выбросы, которые транспортируются и диспергируются в виде аэрозольных частиц [13].

Накапливаясь в организме в больших количествах, мышьяк является сильнейшим ядом [11, 15, 16]. Соединения мышьяка классифицируются Международным агентством по изучению рака Всемирной организации здравоохранения как канцерогенные для человека (канцероген группы I) [16]. Долговременное воздействие неорганического мышьяка негативно влияет на здоровье людей, вызывая рак кожи, мочевого пузыря, лёгких, почек, печени и предстательной железы [11, 15]. Известно, что морские пищевые продукты (рыба, ракообразные, морские водоросли и др.) имеют более высокие концентрации мышьяка, чем продукты наземного происхождения. Так, около 90 % потреблённого в США мышьяка поступает в организм человека с пищей из морепродуктов. Однако в них содержатся в основном нетоксичные органические соединения мышьяка [12].

Для морских организмов, в частности двусторчатых моллюсков, которых используют в пищевых целях, разработаны нормативы предельно допустимых концентраций (ПДК) токсикантов, в том числе

мышьяка. По данным Технического регламента Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011), ПДК мышьяка в продовольственном сырье для моллюсков составляет $5,0 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ сырой массы [10]. Изучение содержания токсикантов, в т. ч. мышьяка, в гидробионтах имеет большое значение не только в связи с использованием моллюсков как объектов марикультуры, но и для целей биоиндикации загрязнений морской среды поллютантами [1–3, 5, 6, 13, 18]. В настоящей работе представлены результаты изучения содержания мышьяка в мягких тканях культивируемой на Чёрном море мидии, а также в воде и донных осадках в акватории расположения морского хозяйства по выращиванию двустворчатых моллюсков.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для исследований послужили мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam., собранные на морском хозяйстве по выращиванию двустворчатых моллюсков, расположенном на выходе из Карантинной бухты (г. Севастополь). Известно, что черноморские мидии достигают промысловых размеров (50 мм и более) через 12–18 месяцев после оседания спата на коллектор. Поэтому возраст исследуемых моллюсков находился в пределах от 1,0 до 1,5 года при длине раковины 58–78 мм. Сбор проб мидий двух цветовых морф (чёрные и коричневые) проводили ежемесячно в 2015 г. с глубины 5 м. Одновременно с исследованием содержания мышьяка в моллюсках определяли его концентрацию в морской воде и донных отложениях. Воду отбирали с поверхностного слоя, а также с горизонтов 5 и 16 м. Донные осадки на глубине 18 м отбирали грунтовыми трубками и делили на верхний, средний и нижний слои толщиной около 40 мм.

Мягкие ткани мидий высушивали при 105°C и подвергали минерализации кислотным сжиганием и сжиганием в муфельной печи [4]. Пробы воды объёмом 20 мл выпаривали на водяной бане с добавлением реактивов и выдерживали в течение 1 ч в муфельной печи при температуре 500°C . Пробы грунта массой 1 г подвергали кислотной минерализации в течение 12–14 ч. Полученную вытяжку объёмом 2 мл выпаривали, с добавлением реактивов, при температуре $100\text{--}110^\circ\text{C}$, а также выдерживали в муфельной печи при температуре 430°C в течение 1,5 ч.

Содержание мышьяка в пробах определяли с помощью вольтамперометрического анализатора АВА-3 методом инверсионной вольтамперометрии с линейной развёрткой потенциала на индикаторном золотом электроде [7]. Определение массовой концентрации ионов мышьяка в пробах проводили с использованием метода добавок градуировочных растворов As, полученных из стандартного образца, концентрацией $1,0 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$. Погрешность определения As в воде составляла 40 %, в грунте — 10 %, в мягких тканях — 15 % при доверительной вероятности $P = 0,95$. Пределы воспроизводимости R% (при $P = 0,95$) равны для воды 35 %, для грунта — 25 %, для мягких тканей — 26 %.

Расчёт коэффициента накопления мышьяка (Кн) в мягких тканях мидий проводили по формуле:

$$K_n = C_{As(t.)} / C_{As(b.)},$$

где $C_{As(t.)}$ — концентрация мышьяка в тканях мидий, $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ сухой массы; $C_{As(b.)}$ — концентрация мышьяка в воде, $\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$.

Всего было проанализировано 126 экземпляров мидий и по 36 проб воды и грунта. Концентрацию мышьяка в донных отложениях и мягких тканях мидий выражали в $\text{мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы, воды — $\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$. Полученные данные представлены на графиках в виде средних значений и доверительных интервалов, содержащих ошибку среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В течение 2015 г. концентрация As в воде акватории морского хозяйства изменялась в диапазоне от 0,0043 до $0,0167 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ (рис. 1). В период с мая по сентябрь она была выше в поверхностных слоях,

а в другие месяцы — в нижних, что, вероятно, свидетельствует о разных внешних источниках поступления мышьяка в акваторию марихозяйства с течениями. ПДК мышьяка в морской воде составляет $0,01 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ [9]. Превышение ПДК As отмечено в поверхностном слое воды в мае на $0,007 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, а в июле — сентябре — до $0,003 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ в нижних горизонтах (5 и 16 м). Возможно, что мышьяк в этот период поступил в акваторию вместе с приповерхностными морскими течениями. Среднегодовая концентрация As в воде акватории марихозяйства составила $0,0081 \pm 0,0004 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, что в 1,2 раза ниже рыбохозяйственных нормативов. В целом в исследованном районе содержание As в воде находилось выше фоновых значений для Чёрного моря, где минимальное значение концентрации мышьяка равно $0,0001 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, а максимальное — $0,0025 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$. При этом среднее значение концентрации As в прибрежной акватории Чёрного моря составляло $0,0013 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, а в центральной части моря — $0,00135 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ [8].

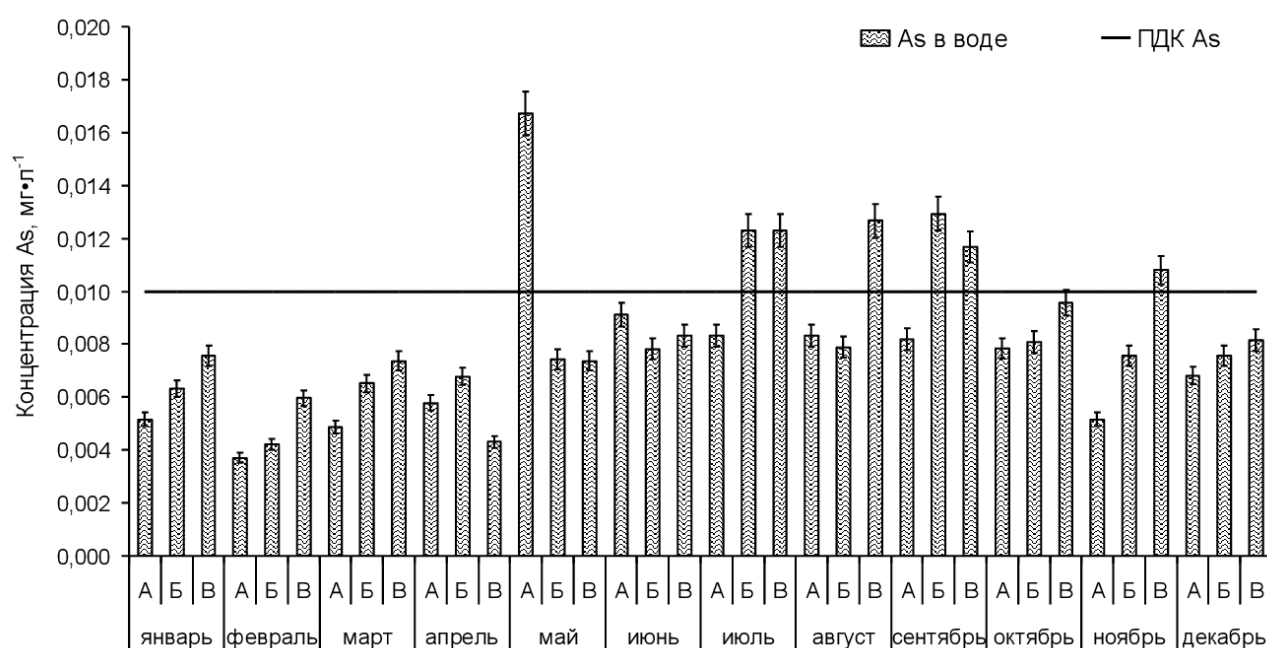


Рис. 1. Концентрация мышьяка в акватории морской фермы. Глубина: А – поверхность, Б – 5 м, В – 16 м

Fig. 1. Concentration of arsenic in the water area of the marine farm at three levels in different months. A: surface, B: 5 m, V: 16 m

В настоящее время в России отсутствуют законодательно закреплённые нормативы концентраций загрязняющих веществ в донных отложениях морских акваторий. Однако оценивать загрязнённость отложений возможно на основе соответствия уровней содержания токсикантов нормам «голландских листов» [17]. По этим критериям, допустимая концентрация (ДК) мышьяка в донных осадках составляет $29,0 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ сухой массы. Среднегодовая концентрация As в донных осадках акватории марихозяйства Карантинной бухты в 2015 г. достигала $19,13 \pm 1,27 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ (рис. 2), что в 1,5 раза ниже ДК по «голландским листам». В целом концентрация As в донных осадках изменялась в диапазоне от $12,00$ до $51,37 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$. Только в июне концентрация As превысила ДК по всей глубине осадков: на $5,0 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ — в поверхностном слое, на $22,0 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ — в среднем и на $7,0 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ — в нижнем слое осадка.

В течение года концентрация мышьяка в мягких тканях мидий варьировала в диапазоне от $1,66$ до $4,38 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ для чёрной морфы и от $1,77$ до $5,07 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ — для коричневой (рис. 3). При этом концентрация As в мягких тканях коричневой мидии была на 6–12 % больше, чем у мидии чёрной морфы. Среднегодовая концентрация мышьяка в моллюсках составила $2,89 \pm 0,12 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$, что почти в 9 раз ниже ПДК для пищевых продуктов, в частности моллюсков [10]. Концентрация As в мягких тканях

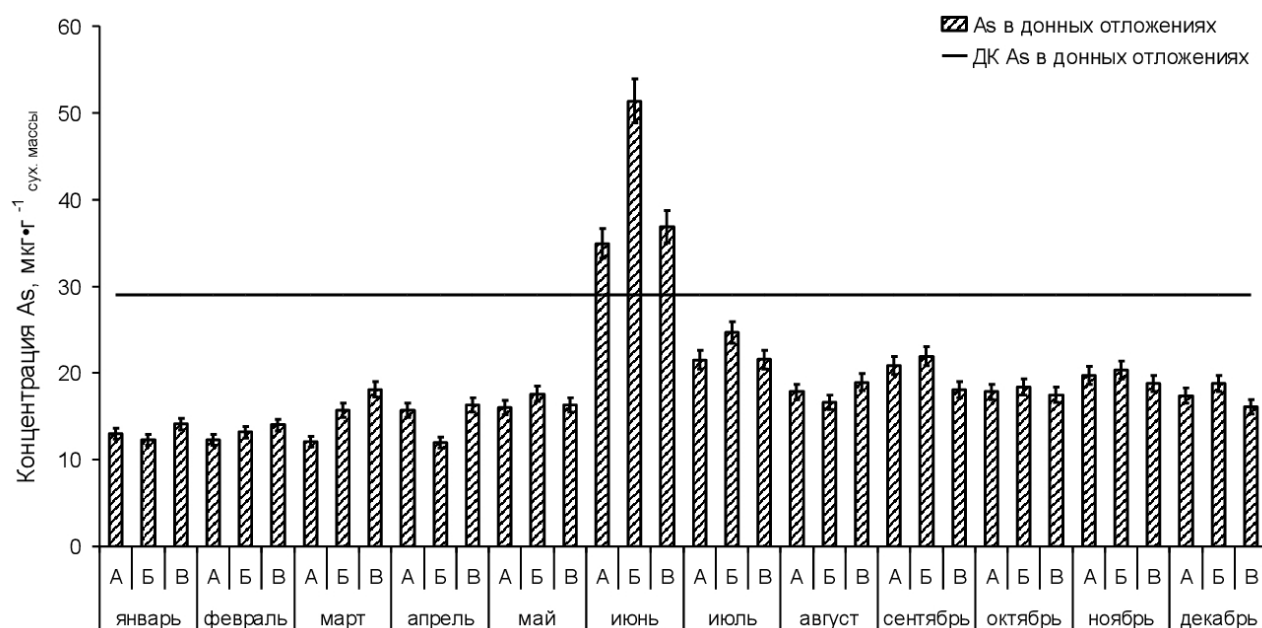


Рис. 2. Концентрация мышьяка в донных осадках акватории морской фермы. Слои донных осадков: А — верхний, Б — средний, В — нижний. ДК — допустимая концентрация

Fig. 2. The concentration of arsenic in the bottom sediments of the marine farm. Layers of bottom sediments: upper (A), medium (B), lower (B). ДК is the permissible concentration

мидий была выше весной и осенью, что, вероятно, связано с репродуктивным циклом моллюсков [5].

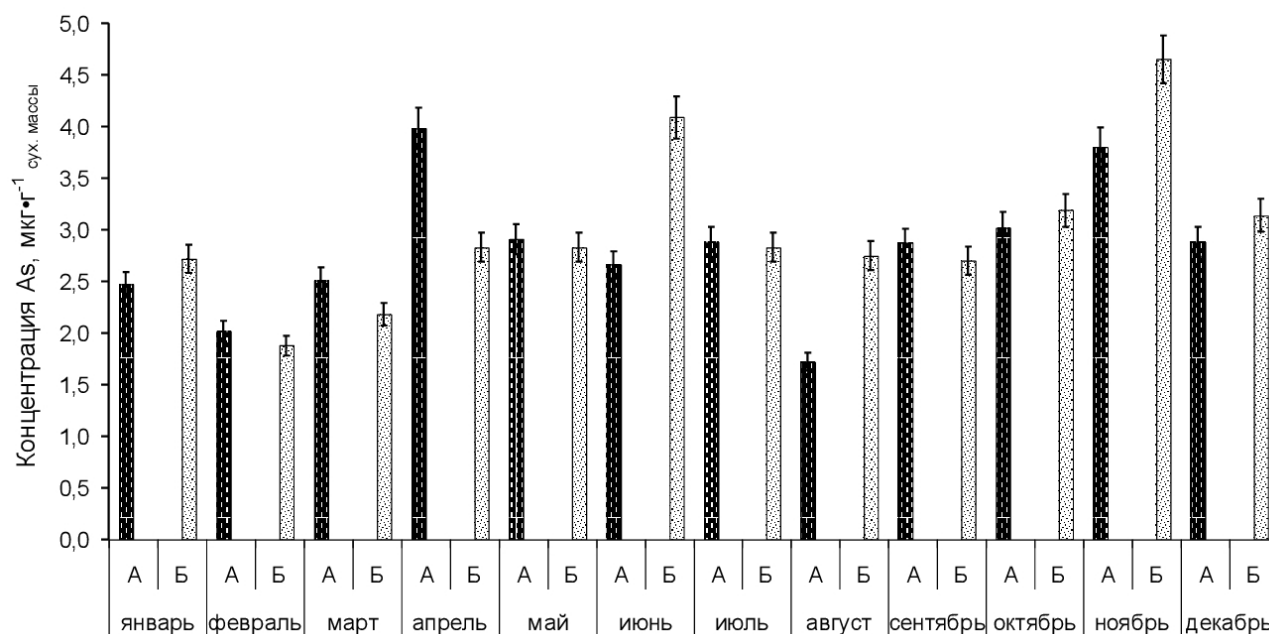


Рис. 3. Концентрация мышьяка в мягких тканях культивируемой мидии *M. galloprovincialis*. А — чёрная морфа, Б — коричневая морфа

Fig. 3. Concentration of arsenic in soft tissues of the cultivated mussel *M. galloprovincialis*. A: black morph; B: brown morph

Для комплексной оценки состояния окружающей среды необходимо иметь представление о содержании токсикантов в гидробионтах, воде и грунте. Важным показателем биоаккумуляции является

коэффициент накопления элементов в организме. Коэффициент накопления As мидией из расчёта на сухую массу тела моллюска в зависимости от сезона года варьировал от 180 до 710 (рис. 4). Это показывает, что моллюски имеют довольно высокую способность к биоаккумуляции мышьяка. Тем не менее для мягких тканей мидии не отмечено превышение ПДК по As в течение годового цикла. Коэффициент накопления имел тенденцию к уменьшению после нереста мидии в период от июня до сентября, т. е. удельное содержание микроэлемента в мягких тканях мидий зависело от стадии зрелости моллюска.

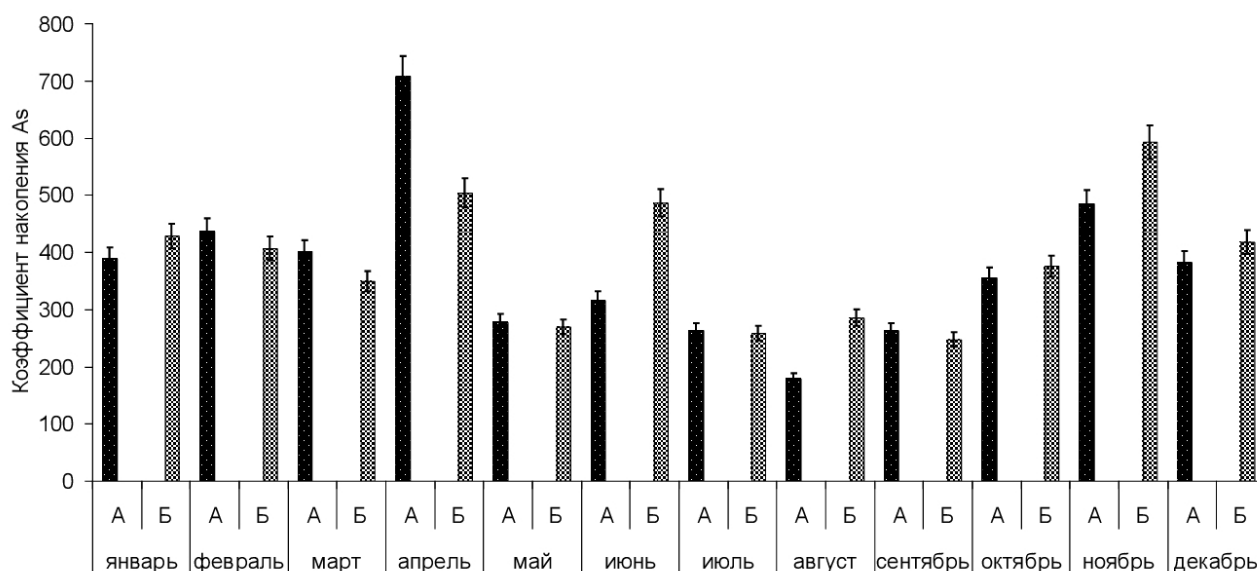


Рис. 4. Коэффициенты накопления мышьяка в мягких тканях культивируемой мидии *M. galloprovincialis*. А — чёрная морфа, Б — коричневая морфа

Fig. 4. Arsenic accumulation coefficients in soft tissues of the cultivated mussels *M. galloprovincialis*. A: black morph; B: brown morph

Выводы. В водах Карантинной бухты (г. Севастополь, Крым) с мая по сентябрь 2015 г. отмечено превышение ПДК по мышьяку на 18–70 %. В донных осадках в июне наблюдали двукратное превышение ПДК. В остальные месяцы уровень ПДК по As находился в пределах нормы. Содержание мышьяка в мягких тканях мидии, выращиваемой в данной акватории, не превышало допустимые значения, определённые Техническим регламентом Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Бурдин К. С., Крупина М. В., Савельев И. Б. Моллюски рода *Mytilus* как возможные показатели содержания тяжелых металлов в морской воде // *Океанология*. 1979. Т. 19, вып. 6. С. 1038–1044. [Burdin K. S., Krupina M. V., Savel'ev I. B. Mollusks of the genus *Mytilus* as

possible indicators of the concentration of heavy and transition metals in the marine environment. *Okeanologiya*, 1979, vol. 19, iss. 6, pp. 1038–1044. (in Russ.).]

- Вязникова К. А., Ковековдова Л. Т. Содержание металлов и мышьяка (Mn, Zn, Cu, Cd, As, Pb) в культивируемом приморском гребешке (*Mizuhopecten yessoensis*) и влияние марикуль-

- турного хозяйства в зал. Петра Великого на содержание тяжелых металлов в донных отложениях // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Рыбное хозяйство*. 2016. № 6. С. 109–114. [Vyaznikova K. A., Kovekovdova L. T. Content of metals and arsenic in cultured scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) and the impact of aquaculture facilities in the Gulf of Peter the Great on the content of heavy metals in bottom sediments. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Rybnoe khozyaistvo*, 2016, no. 6, pp. 109–114. (in Russ.)].
3. Ковековдова Л. Т., Кикю Д. П., Касьяненко И. С. Мониторинг содержания металлов и мышьяка в промысловых рыбах и морской воде дальневосточных морей // *Рыбное хозяйство*. 2015. № 2. С. 18–25. [Kovekovdova L. T., Kiku D. P., Kas'yanenko I. S. Monitoring of metals and arsenic content in commercial fish and sea water of Far East. *Rybnoe khozyaistvo*, 2015, no. 2, pp. 18–25. (in Russ.)].
 4. ГОСТ 26929-94. Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов. [GOST 26929-94. *Syr'e i produkty pishchevye. Podgotovka prob. Mineralizatsiya dlya opredeleniya sodержaniya toksichnykh elementov*. (in Russ.)].
 5. Козинцев А. Ф. Сезонная динамика содержания тяжелых металлов в мидии (*Mytilus galloprovincialis*) из бухты Казачья Чёрного моря // *Морской экологический журнал*. 2006. Т. 5, № 4. С. 41–47. [Kozintsev A. F. Season dynamics of the heavy metals contents in mussel (*Mytilus galloprovincialis*) from the Kazach'ya Bay (the Black Sea). *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2006, vol. 5, no. 4, pp. 41–47. (in Russ.)].
 6. Козинцев А. Ф., Рябушко В. И. Накопление тяжелых металлов в мидиях, культивируемых в бухте Казачья Чёрного моря // *Морські біотехнічні системи : зб. наук. ст.* Севастополь, 2002. Вип. 2. С. 222–230. [Kozintsev A. F., Ryabushko V. I. To content of heavy metals in cultured musels from Kazach'ya Bay (the Black Sea). *Mors'ki biotekhnichni sistemi : zb. nauk. st.* Sevastopol, 2002, iss. 2, pp. 222–230. (in Russ.)].
 7. Методика измерений массовой концентрации ионов мышьяка методом инверсионной вольтамперометрии. М 03-АРВЦ-2017, № 223.0006/RA.RU.311866/2017 от 30.01.2017. [Metodika izmerenii massovoi kontsentratsii ionov mysh'yaka metodom inversionnoi vol'tamperometrii. М 03-ARVC-2017, № 223.0006/RA.RU.311866/2017 от 30.01.2017. (in Russ.)].
 8. Митропольский О. Ю., Наседкин Е. И., Осокіна Н. П. *Екогеохімія Чорного моря*. Киев: Академперіодика, 2006. 279 с. [Mitropol's'kii O. Yu., Nasedkin E. I., Osokina N. P. *Ekogeokhimiya Chornogo morya*. Kiev: Akademperiodika, 2006, 279 p. (in Russ.)].
 9. Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно безопасные уровни воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. Утверждён приказом Госкомрыболовства России от 28.04.99, № 96. [Perechen' rybokhozyaistvennykh normativov: predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) i orientirovochno bezopasnye urovni vozdeystviya (OBUV) vrednykh veshchestv dlya vody vodnykh ob'ektov, imeyushchikh rybokhozyaistvennoe znachenie. Utverzhden prikazom Goskomrybolovstva Rossii ot 28.04.99, no. 96. (in Russ.)].
 10. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011). Утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г., № 880. [Tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza "O bezopasnosti pishchevoi produktsii" (TR TS 021/2011). Utverzhden Resheniem Komissii Tamozhennogo soyuza ot 9 dekabrya 2011 g., no. 880. (in Russ.)].
 11. Akter K. F., Owens G., Davey D. E., Naidu R. Arsenic speciation and toxicity in biological systems. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2005, vol. 184, pp. 97–149. doi: [10.1007/0-387-27565-7_3](https://doi.org/10.1007/0-387-27565-7_3).
 12. Borak J., Hosgood H. D. Seafood arsenic:

- implications for human risk assessment. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2007, vol. 47, no. 2, pp. 204–212. doi: [10.1016/j.yrtph.2006.09.005](https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2006.09.005).
13. Bryan G.W., Langston W.J., Hummerstone L.G., Burt G.R. A Guide to the assessment of heavy metal contamination in estuaries using biological indicators. Occasional Publications. *Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1985, vol. 4, 92 p.
 14. Csavina J., Field J., Taylor M.P., Gao S., Landázuri A., Betterton E.A., Sáez A.E. A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science of the Total Environment*, 2012, vol. 433, pp. 58–73. doi: [10.1016/j.scitotenv.2012.06.013](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.013).
 15. FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. *Evaluation of certain contaminants in food: 72nd report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives*. Geneva: WHO Press, 2011, 106 p. (WHO Technical Report Series ; no. 959).
 16. International Agency for Research on Cancer. *Arsenic, metals, fibres, and dusts. Volume 100C – a review of human carcinogens*. Lyon, France, 2012, 501 p.
 17. *Neue Niederlandische Liste*. Altlasten Spektrum 3/95.
 18. Phillips D.J.H. The use of biological indicator organisms to monitor trace metal pollution in marine and estuarine environments – a review. *Environmental Pollution*, 1977, vol. 13, pp. 281–317.

CONCENTRATION OF ARSENIC IN THE TISSUES OF CULTIVATED MUSSEL *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* LAM., WATER AND BOTTOM SEDIMENTS (CRIMEA, BLACK SEA)

V.I. Ryabushko, A.F. Kozintsev, A.M. Toichkin

Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS, Sevastopol, Russian Federation

E-mail: rabushko2006@yandex.ru

Arsenic is one of the toxicants for which standards for maximum permissible concentrations in edible marine organisms have been developed. In view of this, monitoring of the content of arsenic in cultivated mussels, as well as in water and soil in the aquatic area of the marine farms for the cultivation of bivalve mollusks is important. The content of arsenic in the samples was determined using the method of inversion voltammetry. The average annual concentration of arsenic in the water area of the marine farm in the Karantinnaya Bay was found to be 1.2 times lower than those stipulated by the fishery standards, and in bottom sediments it was 1.5 times lower than those indicated in the “Dutch Lists” standards. The concentration of arsenic in the mussels is almost an order of magnitude lower than its maximum permissible concentrations in food and, in particular, in molluscs.

Keywords: arsenic, mussel *Mytilus galloprovincialis*, water, sediments, Black Sea

УДК 628.193:665.61:551.35(262.5)

ХИМИКО-МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЙ

© 2017 г. **Е. А. Тихонова**, канд. биол. наук, с. н. с., **Н. В. Бурдиян**, канд. биол. наук, с. н. с.,
О. В. Соловьёва, канд. биол. наук, с. н. с.

Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

E-mail: tihonoval@mail.ru

Поступила в редакцию 22.05.2017 г. Принята к публикации 01.08.2017 г.

Представлены результаты исследований уровня загрязнения нефтяными углеводородами и хлороформ-экстрагируемыми веществами донных отложений и морской воды районов черноморского предпроливья и Азовского моря (весна, осень 2016 г.). Выполнено сравнение уровней загрязнения морской среды с результатами предыдущих исследований (2007–2010 гг.). Приведены количественные характеристики гетеротрофной и нефтеокисляющей микробиоты в обозначенных районах. Установлено, что концентрация нефтяных углеводородов в поверхностном слое воды района азовского предпроливья в целом не превышала значения ПДК ($0,05 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$). Исключение составили результаты, полученные осенью 2016 г. Численность гетеротрофных бактерий изменялась в поверхностном слое воды Азовского моря в пределах 10^4 – 10^5 кл.·мл⁻¹, нефтеокисляющие бактерии были выделены в единичных количествах. В акватории причерноморского района пролива число гетеротрофных бактерий составило 10^6 , численность нефтеокисляющих бактерий не превысила 10 кл.·мл⁻¹. При сравнении с данными прошлых лет отмечено увеличение содержания хлороформ-экстрагируемых веществ и нефтяных углеводородов в донных отложениях. Общий уровень загрязнения при этом не превышал средних величин, определённых для данного региона. Численность гетеротрофных бактерий в донных отложениях в приазовской акватории варьировала от $2,5 \cdot 10^4$ до $4,5 \cdot 10^4$ кл.·г⁻¹, а нефтеокисляющих бактерий — от $2,5 \cdot 10$ до $4,5 \cdot 10^2$ кл.·г⁻¹. В донных отложениях черноморского предпроливья число гетеротрофов составляло $4,5 \cdot 10^3$ кл.·г⁻¹, нефтеокисляющих бактерий — 10 кл.·г⁻¹.

Ключевые слова: хлороформ-экстрагируемые вещества, нефтяные углеводороды, гетеротрофные и нефтеокисляющие бактерии, донные отложения, морская вода, Керченский пролив, Чёрное море, Азовское море

Проблема нефтяного загрязнения остаётся актуальной как для Азово-Черноморского региона в целом, так и для Крымского побережья в частности. Как известно, наибольшие объёмы нефти и её производных попадают в море во время транспортировки и перевалки, а также при аварийных разливах. Керченский пролив является акваторией с активным судоходством, сопряжённым с транспортом нефти, и здесь периодически случаются аварии. Так, в результате шторма в Керченском проливе в ноябре 2007 г. произошло крушение судна «Волгонефть-139», а в апреле 2017 г. затонул сухогруз «Герои Арсенала». По предварительной информации [27], сухогруз был заправлен 19 т дизельного топлива, а на борту находилось более $1,5$ т моторного масла. Благодаря развитости системы течений со стороны как Азовского, так и Чёрного моря попавшие в воду поллютанты выносятся за пределы акватории пролива. Многолетние наблюдения [2] показали, что течения со стороны Азовского моря преобладают

над черноморским потоком. Существенной составляющей формирования нагонно-сгонных явлений и важным фактором перепада уровня воды на концах пролива является также речной сток, влияющий на водный баланс Азовского и Чёрного морей [4]. Проведённые исследования [7, 13] показали, что наибольшему антропогенному загрязнению подвергается черноморское предпроливье, а течения со стороны Азовского моря в основном переносят органические вещества аллохтонного и автохтонного происхождения. В настоящее время одним из видов антропогенного воздействия, оказывающим влияние на экосистему пролива, является широкомасштабное строительство моста. Таким образом, на фоне интенсивной техногенной нагрузки в Керченском проливе актуальным остаётся вопрос оценки состояния его экосистемы и прилегающей к нему акватории Чёрного и Азовского морей.

Донные отложения, аккумулируя различные виды загрязнений, включая нефть и нефтепродукты, являются более достоверной индикаторной средой, чем подвижные слои воды. В свою очередь, гетеротрофные бактерии — основные деструкторы органического вещества аллохтонного и автохтонного происхождения — играют важную роль в процессах самоочищения морской среды, а их количественные характеристики позволяют оценивать уровень трофности водоёма [3]. По численности нефтеокисляющих бактерий в известной степени можно судить о степени загрязнения акватории нефтяными углеводородами. Микробная индикация довольно широко используется для оценки экологического состояния водной среды.

Ранее для качественной оценки экологического состояния донных отложений Керченского пролива [20] его акватория была условно поделена на три района: причерноморский (I), собственно пролив (II) и приазовский (III) (рис. 1). В связи с проведением масштабных строительных работ на данный момент акватория пролива закрыта, и наши исследования охватывают только два района: причерноморское и приазовское предпроливье. В работе будут задействованы также полученные нами ранее (2007–2010 гг.) результаты наблюдений.

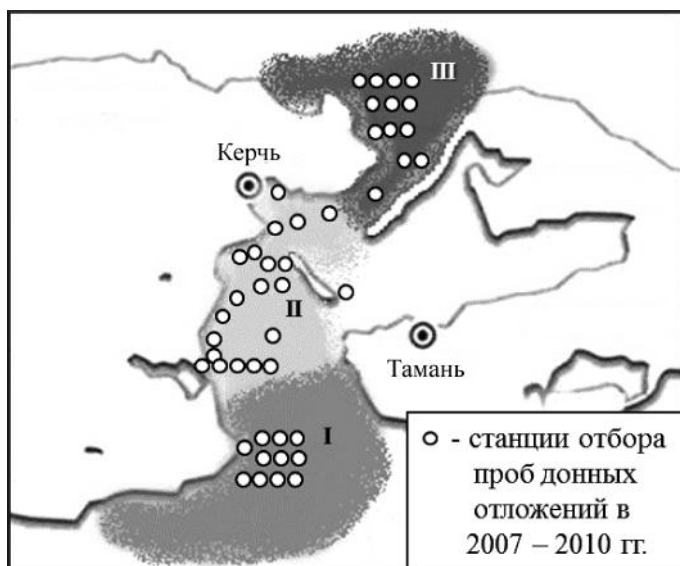


Рис. 1. Схема отбора проб донных отложений и районирование исследуемой акватории в 2007–2010 гг. Обозначения: I — причерноморский район, II — собственно Керченский пролив, III — приазовский район

Fig. 1. The scheme of sampling of the sea bottom sediments and zoning of the study area in 2007–2010. Key: I – the Black Sea part of the Kerch Strait, II – the Kerch Strait itself, III – the Azov Sea part of the Kerch Strait

Цель работы — оценить в акватории обозначенных районов уровень загрязнения воды нефтяными углеводородами, а донных отложений — нефтяными углеводородами и хлороформ-экстрагируемыми веществами, а также выполнить количественный учёт индикаторных групп бактерий в исследуемых средах.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Пробы донных отложений для физико-химического и микробиологического анализов были отобраны в 84-м рейсе (апрель 2016 г.) НИС «Профессор Водяницкий». В 90-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (сентябрь — октябрь 2016 г.) отбирали морскую воду с поверхностного горизонта для микробиологических исследований (рис. 2). Диапазон глубин на станциях, расположенных в акватории Азовского моря, составлял от 9 до 18 м соответственно, глубина на станции в Чёрном море (ст. 1) — 28 м. Всего для химического и микробиологического анализов отобрано 10 проб воды и 5 проб донных отложений.

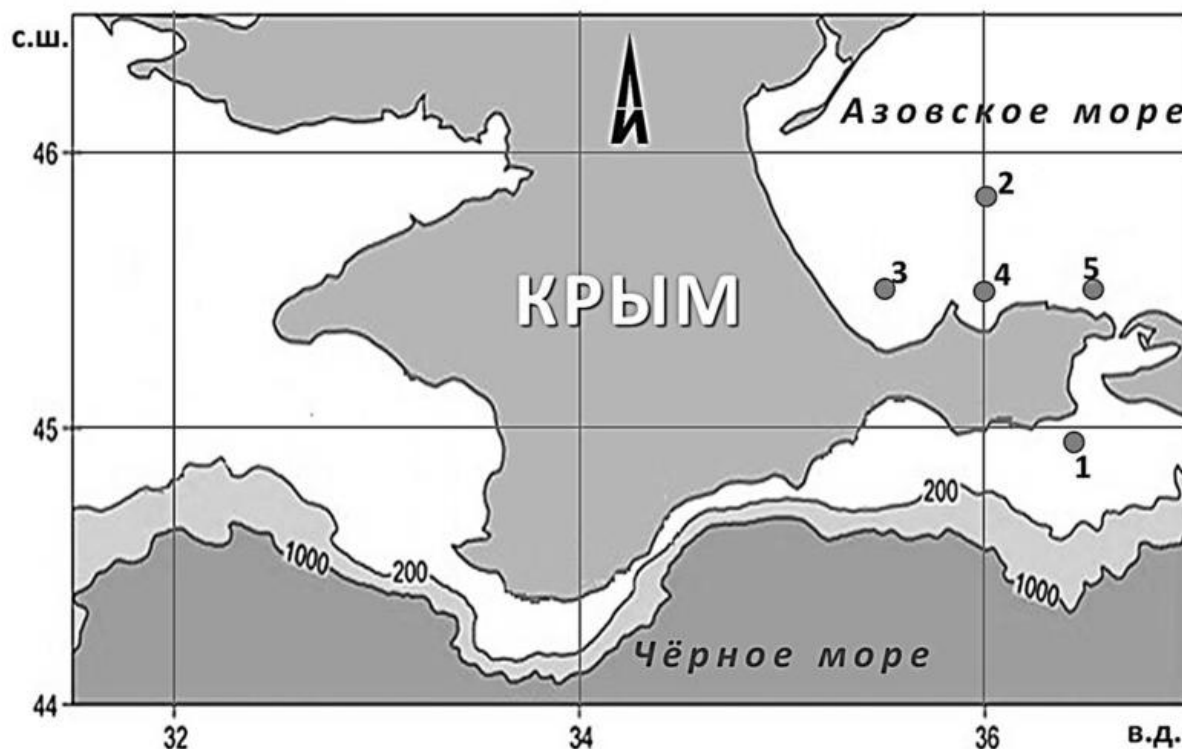


Рис. 2. Схема расположения станций отбора проб в 84-м и 90-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 2. The scheme of sampling stations location in the 84th and 90th cruises of RV “Professor Vodyanitsky”

Донные отложения отбирали с помощью автоматического коробчатого дночерпателя Vox corer и дночерпателя «Океан-50». Для анализа использовали верхний 5-сантиметровый слой. Все пробы маркировали и паковали в специальные контейнеры.

На борту судна в свежесобранных пробах донных отложений при помощи рН-метра-термометра «Нейтрон-рН» проводили измерение величин рН и Eh. В лабораторных условиях осадки высушивали до воздушно-сухого состояния, растирали в ступе и просеивали через сита с диаметром ячеек 0,25 мм для определения концентраций нефтяных углеводородов (НУ) и хлороформ-экстрагируемых веществ (ХЭВ). Общее количество ХЭВ определяли весовым методом, НУ — методом инфракрасной спектроскопии на спектрофотометре ФСМ-1201 [16]. Ошибка метода определения ХЭВ и НУ не превышала 25 %.

Морскую воду для определения нефтяных углеводородов отбирали батометром. Первичную обработку собранного материала проводили непосредственно на судне. Для этого пробы морской воды объёмом 2 л, отобраные с поверхностного и придонного горизонта глубин, заливали четырёххлористым углеродом (CCl₄) из расчёта 20 мл на 2 л для последующей экстракции. Дальнейшую обработку проводили на берегу в лабораторных условиях с использованием общепринятой методики, разработанной в

ГОИН [16].

Для микробиологических анализов стерильно отбирали верхний (0–3 см) слой донных отложений и поверхностный слой морской воды, где определяли численность гетеротрофных и нефтеокисляющих бактерий. Последующая обработка материала велась по ранее описанным методикам [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для вод акватории Азовского моря в 2016 г. характерны уровни НУ, не превышающие ПДК (средняя концентрация — $0,036 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$). Данный показатель на исследованном участке изменялся в пределах $0,004\text{--}0,044 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$. По данным [5], в период с 2004 по 2008 г. средняя концентрация углеводородов в Азовском море составляла $0,040\text{--}0,070 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ при максимальном значении в весенний период $0,090 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$. Данное повышение уровней авторы связывают со смывом талыми водами накопившихся за зиму нефтяных углеводородов.

В поверхностном слое воды в причерноморской акватории количество НУ составило $0,063 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, что превышает ПДК в 1,3 раза (ПДК $0,05 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$), тогда как ранее нами в данном районе нефтяное загрязнение выявлено не было [18, 22]. Отмеченные уровни НУ могут быть связаны с подвижностью водных слоёв. В целом в отношении нефтяного загрязнения вод Керченского пролива в опубликованных источниках содержатся различные данные (есть показатели, как существенно превышающие ПДК [9, 10], так и не достигающие таковых [13]). Результаты проведённых эколого-токсикологических исследований Керченского пролива вдоль трассы строительства моста показывают, что концентрации нефтепродуктов в данной акватории не превышают предельно допустимых. Отмечено лишь некоторое увеличение взвешенных веществ в воде, что связывают с работами подготовительного периода в береговой зоне. Следует отметить, что воды всей исследованной акватории по гидрохимическому индексу загрязнения [28] отнесены ко II классу качества — к «чистым». Такие противоречивые результаты показывают, что поверхностные воды в силу своей подвижности не могут служить надёжным индикатором хронического нефтяного загрязнения, в отличие от донных отложений, которые являются более стабильным субстратом (накопление загрязняющих веществ в них происходит постоянно).

В исследуемом районе изучение нефтеокисляющей микробиоты и наблюдение за 1969 г., продолжено в 1971 г. и в период 2007–2010 гг., после аварии танкера «Волгонефть-139» [1, 17]. Проведённые нами бактериологические исследования морской воды показали, что численность гетеротрофных бактерий в акватории Азовского моря варьировала в пределах $10^4\text{--}10^5$ (рис. 3). Высокая численность гетеротрофов в азовской воде, богатой органическими веществами, отмечалась и ранее [17]. В причерноморской акватории Керченского пролива (ст. 1) число гетеротрофов составило $106 \text{ кл} \cdot \text{мл}^{-1}$, и это количество превышает показатели, полученные в прошлом столетии [17]. Высокая численность гетеротрофных бактерий на ст. 1 может свидетельствовать о прогрессирующем эвтрофировании данного района.

Нефтеокисляющие бактерии в морской воде на станциях, расположенных в Азовском море, высеяны в единичных количествах. В причерноморской акватории Керченского пролива (ст. 1) число бактерий, осуществляющих деструкцию нефтяных углеводородов в ней, составило $10 \text{ кл} \cdot \text{мл}^{-1}$.

По опубликованным данным, донные отложения Керченского пролива по некоторым параметрам имеют следующую характеристику: сероводород не обнаружен, средние значения металлов до и во время строительства моста в среднем находились примерно на одном уровне [6, 7, 21].

Донные отложения в настоящем исследовании были представлены (как и ранее) серыми или тёмно-серыми илами, в большинстве случаев с примесью песка или ракуши, с достаточно чётко выраженным поверхностным окисленным слоем толщиной 3–5 мм. Ил на большинстве станций отбора проб был мелкодисперсным, что, как известно, способствует накоплению органических веществ, в том числе нефтепродуктов.

Важными параметрами, характеризующими качество и сорбционную способность донных отложе-

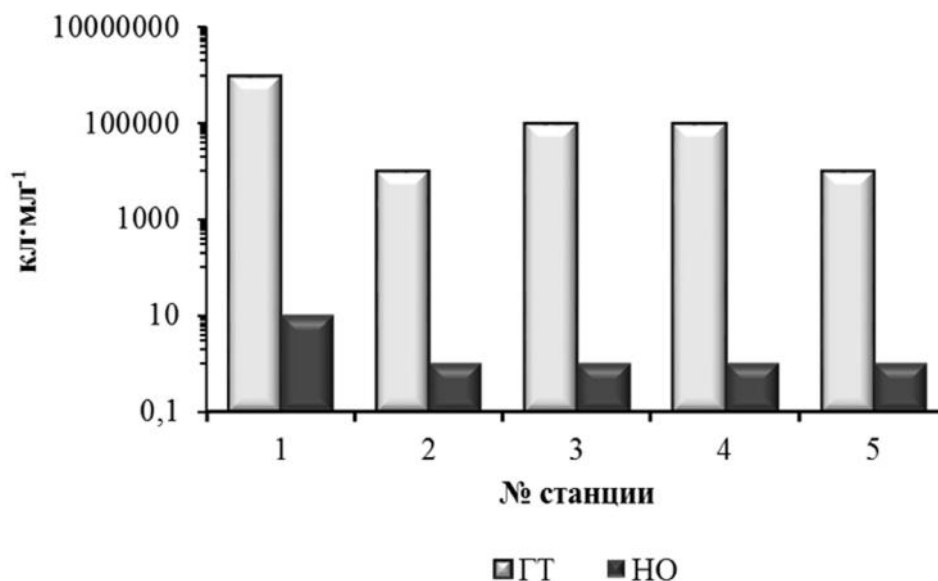


Рис. 3. Численность (кл.·мл⁻¹) гетеротрофных (ГТ) и нефтеокисляющих (НО) бактерий в поверхностном слое морской воды на исследуемых станциях

Fig. 3. The number (cell·ml⁻¹) of heterotrophic (ГТ) and oil-oxidizing (НО) bacteria in the surface layer of the sea water at the investigated stations

ний, являются рН, окислительно-восстановительный потенциал, размеры частиц. По результатам наших исследований [23], в морских грунтах активная реакция среды была слабощелочной (рН 7,54–7,82). Eh донных осадков в причерноморской части акватории Керченского пролива был положительным (+110 мВ), что обеспечило окислительные условия среды. В Азовском же море это были слабовосстановленные (Eh +1...+44 мВ), за исключением мелководной ст. 2 с глубиной 11 м, и восстановительные условия (Eh -165 мВ). Такие условия способствуют накоплению углеводов в донных отложениях, т. к. при низких значениях окислительно-восстановительного потенциала среды замедляются процессы преобразования битумоида [23].

Полученные ранее результаты показали, что в 2009 г. минимальные значения ХЭВ (26 мг · 100 г⁻¹ возд.-сух. д. о.) [19] были отмечены на станции, расположенной у входа в пролив со стороны Чёрного моря. Результаты исследований 2016 г. (рис. 4) указывают на уровень, в 2 раза превышающий отмеченные ранее значения.

Максимальные же величины ХЭВ характерны, как и ранее, для Азовской акватории, в частности для станции на выходе из Керченского пролива, где значения в 2010 и 2016 гг. составляли в илах 187 мг · 100 г⁻¹ [18, 23]. Полученные значения не превышают величин, характерных для данной акватории (для ракушника Азовского моря — 20 мг · 100 г⁻¹, для пелитовых илов — 230 мг · 100 г⁻¹) [12]. Следует отметить, что единых нормативов для определения уровня загрязнённости углеводородами донных отложений до настоящего времени не существует [11, 24], поэтому обычно проводится сравнительный анализ данных показателей до и после каких-либо разливов, в местах слива загрязняющих веществ с условно чистыми участками акваторий и в сравнении с другими регионами [19, 25, 26]. Результаты наших исследований показывают постепенное ежегодное увеличение концентрации ХЭВ в донных отложениях, при этом максимальная величина остаётся постоянной и не превышает региональных значений. Принимая во внимание разработанные Л. Н. Кирюхиной уровни загрязнения по содержанию ХЭВ в донных осадках, можно сказать, что в черноморской акватории они соответствуют II уровню, а в азовской — III (табл. 1).

В наших исследованиях [19] ранее отмечена тенденция к уменьшению количества НУ в донных отложениях Керченского пролива и предпроливья. В настоящее время зафиксированные concentra-

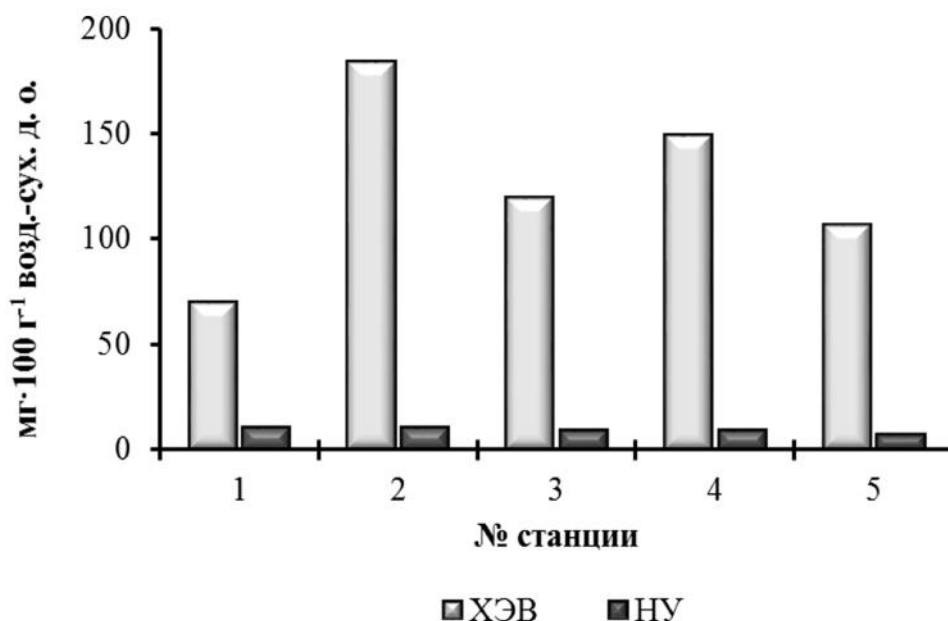


Рис. 4. Концентрации ХЭВ и НУ ($\text{мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. д. о.) в донных отложениях исследуемой акватории в 2016 г.

Fig. 4. The concentrations of chloroform-extractable substances (ХЭВ) and oil hydrocarbons (НУ) ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ air-dry bottom sediments) in the sea bottom sediments of the investigated water area in 2016

ции больше следовых ($5 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$), что в среднем в 3,0 и 1,6 раза выше отмеченных ранее в I и III районах соответственно (табл. 1). Однако данный уровень нефтяного загрязнения, как и таковой в предыдущих исследованиях, не превышает величин, характерных для чистых и слабозагрязнённых акваторий Чёрного моря.

Таблица 1. Средние показатели содержания ХЭВ и НУ в донных отложениях Керченского пролива в 2007–2010 гг. и в 2016 г. по исследуемым районам ($\text{мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. д. о.)

Table 1. The average concentration of chloroform-extractable substances and oil hydrocarbons in the sea bottom sediments of the Kerch Strait in 2007–2010 and in 2016 for the investigated areas ($\text{mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ air-dry bottom sediments)

Наименование вещества	Концентрация, $\text{мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ возд.-сух. д. о.				
	I район (2007–2010 гг.)	II район (2007–2010 гг.)	III район (2007–2010 гг.)	I район (2016 г.)	III район (2016 г.)
ХЭВ	30,2	53,7	74,1	72,0	140,0
НУ	3,4	4,3	5,1	10,3	8,3

Максимальные значения концентрации НУ идентичны в донных отложениях как на ст. 2 в Азовском море, так и в причерноморской части Керченского пролива, но их доля от ХЭВ различна. Так, в азовской акватории она одинакова на всех исследованных станциях и составляет 6 %, тогда как в Чёрном море она в 2,3 раза выше (14 %) [23]. Более высокие показатели содержания ХЭВ и НУ в причерноморской части Керченского пролива могут указывать на современные процессы накопления этих веществ в донных осадках, а более высокое процентное содержание — свидетельствовать об интенсивной антропогенной нагрузке в данной акватории. В пробах донных отложений, отобранных в Азовском море, численность гетеротрофных бактерий (рис. 5) колебалась от $2,5 \cdot 10^4$ до $4,5 \cdot 10^4$ бактериальных клеток на один грамм донных отложений ($\text{кл.} \cdot \text{г}^{-1}$). Количественные показатели нефтеокисляющих бактерий варьировали, соответственно, от $2,5 \cdot 10$ до $4,5 \cdot 10^2$ $\text{кл.} \cdot \text{г}^{-1}$. В районе черноморского предпроливья

(ст. 1) число гетеротрофов в донных отложениях составило $4,5 \cdot 10^3$ кл. $\cdot$ г $^{-1}$, а нефтеокисляющих бактерий — 10 кл. $\cdot$ г $^{-1}$. Эти показатели численности бактериобентоса на ст. 1 близки к таковым, полученным в акватории Керченского пролива в 2007 г. Так, число гетеротрофных бактерий в причерноморской акватории Керченского пролива в 2007 г. варьировало от $9,5 \cdot 10^3$ до $4,5 \cdot 10^5$ кл. $\cdot$ г $^{-1}$, нефтеокисляющих — от 75 до 115 кл. $\cdot$ г $^{-1}$ [1].

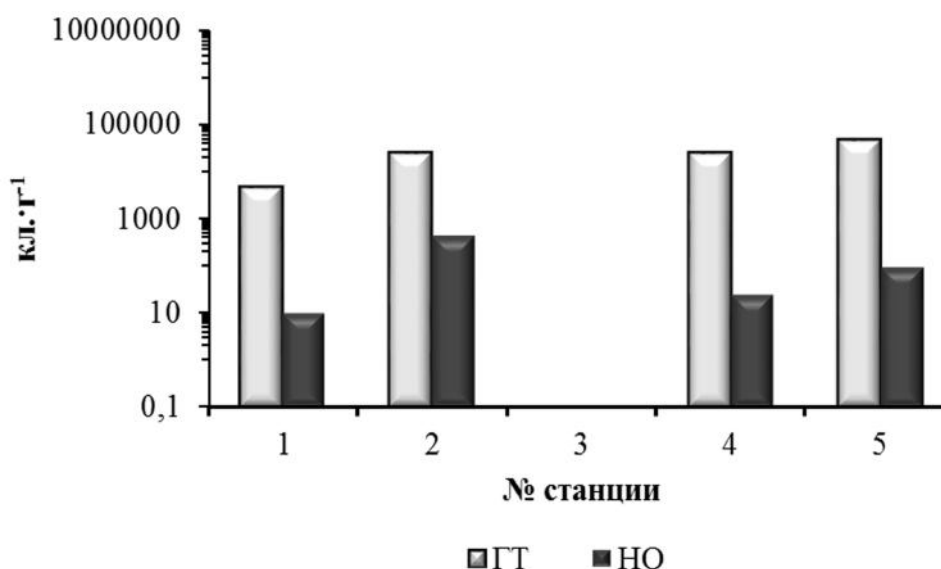


Рис. 5. Численность гетеротрофных (ГТ) и нефтеокисляющих (НО) бактерий (к.л. $\cdot$ мл $^{-1}$) в донных отложениях исследуемого района (на ст. 3 пробы не отобраны по погодным условиям)

Fig. 5. The number of heterotrophic (ГТ) and oil-oxidizing (НО) bacteria (cell $\cdot$ ml $^{-1}$) in the sea bottom sediments of the investigated areas (the samples were not collected at st. 3 because of weather conditions)

Закключение. Таким образом, определён современный уровень загрязнения воды и донных отложений органическими веществами, в том числе нефтяными углеводородами, и проведён количественный учёт индикаторных групп бактерий в них и морской воде обозначенного района, который характеризуется следующим:

1. Количества НУ в морской воде приазовской акватории Керченского пролива не превышали ПДК (0,05 мг $\cdot$ л $^{-1}$), тогда как в черноморской были менее стабильны и зависели от сезона. Отмечено некоторое повышение содержания НУ в донных отложениях (ст. 1) в сравнении с таковым 2016 г.
2. Численность гетеротрофных бактерий в причерноморской акватории Керченского пролива была выше, чем таковая, измеренная ранее, что может свидетельствовать о прогрессирующем эвтрофировании данного региона. В Азовском море она варьировала в широких пределах (10^4 – 10^5 кл. $\cdot$ мл $^{-1}$), но не превышала показателей прошлого столетия. Нефтеокисляющие бактерии, определяющие интенсивность самоочищения морской среды от нефти и нефтепродуктов, высеяны в приазовской акватории в единичных количествах, а в причерноморской их численность не превышала 10 кл. $\cdot$ мл $^{-1}$. В донных отложениях данные группы бактерий высеяны повсеместно, их показатели в причерноморской акватории близки к таковым 2007 г.
3. Количества ХЭВ и НУ в донных отложениях акваторий, прилегающих к Керченскому проливу, были выше по сравнению с таковыми прошлых лет, но при этом в приазовском участке максимальное содержание ХЭВ (187 мг $\cdot$ 100 г $^{-1}$ возд.-сух. д. о.) соответствовало таковому в период 2007–2010 гг. и их уровень не превышал величин, характерных для данного региона. В причерноморском участке показатели концентраций ХЭВ в 2 раза превышают ранее отмеченные значения (2009 г.) и в 2 раза больше средних по черноморскому побережью Крыма (36,7 мг $\cdot$ 100 г $^{-1}$).

4. Полученные результаты показывают стабильность состояния донных отложений исследуемой акватории, однако отмечена тенденция к некоторому увеличению показателей в обозначенном районе, что указывает на необходимость дальнейших мониторинговых исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ИМБИ «Создание методов и технологий оперативного контроля экологического состояния биоты, оценки и прогноза качества морской среды» (гос. рег. № 115081110012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Еремеев В. Н., Миронов О. Г., Алёмов С. В., Бурдиян Н. В., Шадрина Т. В., Тихонова Е. А., Волков Н. Г. Предварительные оценки нефтяного загрязнения Керченского пролива после аварии судов 11 ноября 2007 г. // *Морской экологический журнал*. 2008. Т. 7, № 3. С. 15–24. [Eremeev V. N., Mironov O. G., Alyomov S. V., Burdiyan N. V., Shadrina T. V., Tikhonova E. A., Volkov N. G. The preliminary results of oil contamination evaluation in the Kerch Strait after the failure of ships in November, 11, 2007. *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2008, vol. 7, no. 3, pp. 15–24. (in Russ.)].
2. Жукова С. В., Куропаткин А. П., Шишкин В. М., Фоменко И. Ф., Лутынская Л. А., Стрельченко О. В. *Гидрологическая оценка ситуации в условиях восстановления коренной части косы Тузла у Таманского полуострова. Проблемы гидрометеорологии и геоэкологии*. Ростов н/Д : Изд-во СКНЦ ВШ АПСН, 2005. С. 119–131. [Zhukova S. V., Kuropatkin A. P., Shishkin V. M., Fomenko I. F., Lutynskaya L. A., Strel'chenko O. V. *Gidrologicheskaya otsenka situatsii v usloviyakh vosstanovleniya korennoi chasti kosy Tuzla u Tamanskogo poluostrova. Problemy gidrometeorologii i geoekologii*. Rostov n/D: SKNTs VSh APSN, 2005. pp. 119–131. (in Russ.)].
3. Калитина Е. Г. *Влияние органического загрязнения на структуру и состояние микробных сообществ поверхностных вод бухты Золотой Рог* : дис.... канд. биол. наук : 03.00.16. Владивосток, 2006. 181 с. [Kalitina E. G. *Vliyanie organicheskogo zagryazneniya na strukturu i sostoyanie mikrobnikh soobshchestv poverkhnostnykh vod bukhty Zolotoi Rog*. [dissertation]. Vladivostok, 2006, 181 p. (in Russ.)].
4. *Керченская авария: последствия для водных экосистем* / под ред. И. Г. Корпакова, С. А. Агапова. Ростов н/Д : ФГУП АЗНИИРХ, 2008. 229 с. [*Kerchenskaya aviariya: posledstviya dlya vodnykh ekosistem* / pod red. I. G. Korpakova, S. A. Agapova. Rostov n/D: FGUP AzNIIRKh, 2008, 229 p. (in Russ.)].
5. Клёнкин А. А., Агапов С. А. Динамика распределения нефтепродуктов в воде и донных отложениях Азовского и Чёрного морей после аварии судов в Керченском проливе // *Водные ресурсы*. 2011. Т. 38, № 2. С. 214–222. [Klenkin A. A., Agapov S. A. Dynamics of oil product in water and bottom sediments of the Sea of Azov and the Black Sea after ship accidents in the Kerch Strait. *Vodnye Resursy*, 2011, vol. 38, no. 2, pp. 214–222. (in Russ.)].
6. Котельянец Е. А., Коновалов С. К. Тяжёлые металлы в донных отложениях Керченского пролива // *Морской гидрофизический журнал*. 2012. № 4. С. 50–60. [Kotel'yanets E. A., Konovalov S. K. Tyazhelye metally v donnykh otlozheniyakh Kerchenskogo proлива. *Morskoj gidrofizicheskii zhurnal*, 2012, no. 4, pp. 50–60. (in Russ.)].
7. Крыленко М. В., Крыленко В. В. Научное обеспечение сбалансированного планирования хозяйственной деятельности на уникальных морских береговых ландшафтах и предложения по его использованию на примере Азово-Черноморского побережья // *Азовское море / Южное отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН : отчёт по НИР*. Геленджик, 2013. Т. 7. С. 1157. [Krylenko M. V., Krylenko V. V. Nauchnoe obespechenie sbalansirovannogo planirovaniya khozyaistvennoi deyatelnosti na unikal'nykh morskikh beregovykh landshaftakh

- i predlozheniya po ego ispol'zovaniyu na primere Azovo-Chernomorskogo poberezh'ya. In: *Azovskoe more / Yuzhnoe otделение Instituta okeanologii im. P. P. Shirshova RAN: otchet po NIR*. Gelendzhik, 2013, vol. 7, pp. 1157. (in Russ.).
8. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А. *Комплексный спутниковый мониторинг морей России*. Москва : ИКИ РАН, 2011. 470 с. [Lavrova O. Yu., Kostianov A. G., Lebedev S. A., Mityagina V. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A. *Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas*. Moscow: IKI RAN, 2011, 470 p. (in Russ.).]
9. Ларин А. А., Павленко Л. Ф., Скрыпник Г. В., Корпакова И. Г. Загрязнение прибрежной акватории российского Причерноморья нефтяными компонентами // *Морской экологический журнал*. 2011. № 2 (спец. вып.). С. 49–55. [Larin A. A., Pavlenko L. F., Skrypnik G. V., Korpakova I. G. Oil pollution of the Black Sea coastal environment. *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2011, no. 2 (sp. iss.), pp. 49–55. (in Russ.).]
10. Матишов Г. Г., Инжебейкин Ю. И., Савицкий Р. М. Воздействие на среду и биоту аварийного разлива нефтепродуктов в Керченском проливе в ноябре 2007 г. // *Водные ресурсы*. 2013. Т. 40, № 3. С. 259–273. [Matishov G. G., Inzhebeikin Yu. I., Savitskii R. M. The environmental and biotic impact of the oil spill in Kerch Strait in November 2007. *Vodnye Resursy*, 2013, vol. 40, no. 3, pp. 259–273. (in Russ.).]
11. Михайлова Т. В. Разработка нормативов загрязняющих веществ в донных грунтах (на примере нефти) // *VII Съезд гидробиологического общества РАН : тезисы докладов*. Калининград. 2001. С. 152–153. [Mikhailova T. V. Razrabotka normativov zagryaznyayushchikh veshchestv v donnykh gruntakh (na primere nefi). In: *VII S'ezd gidrobiologicheskogo obshchestva RAN: tezisy dokladov*. Kaliningrad, 2001, pp. 152–153. (in Russ.).]
12. Миронов О. Г. Санитарно-биологическая характеристика Азовского моря // *Гидробиологический журнал*. 1996. Т. 32, № 1. С. 61–67. [Mironov O. G. Sanitary-biological characteristic of the Azovian Sea. *Gidrobiologicheskii zhurnal*, 1996, vol. 32, no. 1, pp. 61–67. (in Russ.).]
13. Немировская И. А. *Нефть в океане (загрязнения и природные потоки)*. Москва : Научный мир, 2013. 432 с. [Nemirovskaya I. A. *Neft' v okeane (zagryazneniya i prirodnye potoki)*. Moscow: Nauchnyi mir, 2013, 432 p. (in Russ.).]
14. Петренко О. А., Жугайло С. С., Авдеева Т. М., Аджиумеров С. Н. Содержание нефтепродуктов в водной среде, донных отложениях и почве рекреационной зоны г. Керчи и о. Коса Тузла // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2014. Т. 10, № 1. С. 818–821. [Petrenko O. A., Zhugailo S. S., Avdeeva T. M., Adzhumerov S. N. Soderzhanie nefteproduktov v vodnoi srede, donnykh otlozheniyakh i pochve rekreatsionnoi zony g. Kerchi i o. Kosa Tuzla. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 2014, vol. 10, no. 1, pp. 818–821. (in Russ.).]
15. *Практикум по микробиологии* / под ред. А. И. Нетрусова. Москва : Издательский центр «Академия», 2005. 608 с. [Praktikum po mikrobiologii / A. I. Netrusov (Ed.). Moscow: Izdatel'skii tsentr "Akademiya", 2005, 608 p. (in Russ.).]
16. *Руководство по методам химического анализа морских вод* / под ред. С. Г. Орадовского. Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. 208 с. [Rukovodstvo po metodam khimicheskogo analiza morskikh vod / S. G. Oradovskii (Ed.). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977, 208 p. (in Russ.).]
17. *Самоочищение в прибрежной акватории Чёрного моря* / под ред. В. Н. Грезе. Киев : Наукова думка, 1975. 142 с. [Samoochishchenie v pribrezhnoi akvatorii Chernogo morya / V. N. Greze (Ed.). Kiev: Naukova dumka, 1975, 142 p. (in Russ.).]
18. Тихонова Е. А. Нефтяное загрязнение донных осадков и прибрежных наносов Керченского пролива в период 2007–2010 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2011. Т. 1, № 25. С. 200–205. [Tikhonova E. A. Oil pollution of bottom

- sediments and coastal alluvium of the Kerch Strait during 2007–2010. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2011, vol. 1, no. 25, pp. 200–205. (in Russ.).
19. Тихонова Е. А., Бурдиян Н. В., Соловьёва О. В., Дорошенко Ю. В. Химические и микробиологические показатели донных отложений Керченского пролива после аварии судна «Волгонефть-139» // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2015. № 4. С. 12–16. [Tikhonova E. A., Burdiyan N. V., Soloveva O. V., Doroshenko Yu. V. Chemical and microbiological parameters of Kerch Strait sea bottom sediments after accident of «Volgoneft-139» ship. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse*, 2015, no. 4, pp. 12–16. (in Russ.).]
 20. Тихонова Е. А., Гусева Е. В. Динамика нефтяного загрязнения донных осадков и прибрежных наносов Керченского пролива после аварийного разлива мазута в ноябре 2007 г. // *Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона* : материалы Междунар. конф. Керчь, 2012. Т. 1. С. 253–255. [Tikhonova E. A., Guseva E. V. Dinamika neftyanogo zagryazneniya donnykh osadkov i pribrezhnykh nanosov Kerchenskogo proliva posle avariinogo razlitiya mazuta v noyabre 2007 g. In: *Sovremennye rybokhozyaistvennye i ekologicheskie problemy Azovo-Chernomorskogo regiona*: materialy Mezhdunar. konf. Kerch, 2012, vol. 1, pp. 253–255. (in Russ.).]
 21. Тихонова Е. А., Котельянец Е. А., Соловьёва О. В. Современные данные по загрязнению донных отложений Крымского побережья Чёрного и Азовского морей // *Морские биологические исследования: достижения и перспективы* : материалы Всеросс. конф. с междунар. участием, приуроч. к 145-летию Севастопольской биологической станции, (Севастополь, 19–24 сентября 2016 г.). Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. Т. 3. С. 256–260. [Tikhonova E. A., Kotel'yanets E. A., Soloveva O. V. Sovremennye dannye po zagryazneniyu donnykh otlozhenii Krymskogo poberezh'ya Chernogo i Azovskogo morei. In: *Morskie biologicheskie issledovaniya: dostizheniya i perspektivy* : materialy Vseross. konf. s mezhdunar. uchastiem, priuroch. k 145-letiyu Sevastopol'skoi biologicheskoi stantsii, (Sevastopol, 19–24 Sept. 2016). Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2016, vol. 3, pp. 256–260. (in Russ.).]
 22. Тихонова Е. А., Соловьёва О. В. *Нефтяное загрязнение в районе Керченского пролива*. [CD-ROM]. Москва : Морские исследования и образование, 2016. С. 453–456. [Tikhonova E. A., Soloveva O. V. *Neftyanoe zagryaznenie v raione Kerchenskogo proliva*. [CD-ROM]. Moscow: Morskie issledovaniya i obrazovanie, 2016, pp. 453–456. (in Russ.).]
 23. Тихонова Е. А., Соловьёва О. В., Котельянец Е. А. Оценка уровня загрязнения донных отложений крымского побережья Чёрного и Азовского морей // *Принципы экологии*. 2016. № 5 (21). С. 56–70. [Tikhonova E. A., Soloveva O. V., Kotel'yanets E. A. Evaluation of the contamination level of sea bottom sediments on the Crimean coast of the Black and Azov seas. *Printsiipy ekologii*, 2016, no. 5 (21), pp. 56–70. (in Russ.).]
 24. Томилина И. И. *Эколого-токсикологическая характеристика донных отложений водоёмов северо-запада России* : автореф. дис. ... канд. биол. наук. : 03.00.18. Борок, 2000. 21 с. [Tomilina I. I. *Ekologo-toksikologicheskaya kharakteristika donnykh otlozhenii vodoemov severo-zapada Rossii* : avtoref. dis. ... kand. biol. nauk.: 03.00.18. Borok, 2000, 21 p. (in Russ.).]
 25. Al-Saad H. T., Al-Taein S. M., Al-Hello M. A. R., DouAbul A. A. Z. Hydrocarbons and trace elements in the waters and sediments of the marshland of southern Iraq. *Mesopotamian Journal Marine Science*, 2009, vol. 24, iss. 2, pp. 126–139.
 26. Veerasingam S., Raja P., Venkatachalapathy R., Mohan R., Sutharsan P. Distribution of petroleum hydrocarbon concentration in coastal sediments along Tamilnadu coast, India. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2010, vol. 5, no. 2, pp. 5–8.
 27. Крушение сухогруза в Черном море: спасатели нашли тела трех погибших

- [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ria.ru/incidents/20170419/1492605203.html> [дата обращения 12.07.2017]. [Krushenie sukhogruza v Chernom more: spasateli nashli tela trekh pogibshikh. Available at: <https://ria.ru/incidents/20170419/1492605203.html> [accessed 12.07.2017] (in Russ.)].
28. Ученые проводят мониторинг водных биоресурсов в районе строительства Крымского моста [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.most.life/novosti/novosti/uchenye-provodyat-monitoring-vodnyh-bioresursov-v-raione-stroitelstva-krymskogo-mosta/> [дата обращения 12.07.2017]. [Uchenye provodyat monitoring vodnykh bioresursov v raione stroitel'syva Krymskogo mosta. Available at: <http://www.most.life/novosti/novosti/uchenye-provodyat-monitoring-vodnyh-bioresursov-v-raione-stroitelstva-krymskogo-mosta/> [accessed 12.07.2017] (in Russ.)].

THE CHEMICAL-MICROBIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SEA WATER AND BOTTOM SEDIMENTS OF THE KERCH STRAIT AND ADJACENT WATER AREAS

E. A. Tikhonova, N. V. Burdiyan, O. V. Soloveva

Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS, Sevastopol, Russian Federation

E-mail: tihonova@mail.ru

This paper presents the results of contamination level of sea bottom sediments and seawater in the water areas by the strait of the Black Sea and the Azov Sea by oil hydrocarbons and chloroform-extractable substances studies (spring, autumn 2016). Comparison of marine environment pollution levels with the results of previous studies (2007–2010) and sanitary norms is given. The quantitative characteristics of heterotrophic and oil-oxidizing microbiota in the designated areas are presented. It was determined that the concentration of oil hydrocarbons in the water surface layer in the water area by the strait of the Azov Sea did not exceed the current norm ($0.05 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$). The single cases of the maximum permissible concentration exceeding were registered in the water area by the strait of the Black Sea (autumn 2016). In the surface layer of Azov Sea water, the number of heterotrophic bacteria ranged from 10^4 to $10^5 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$, and the oil-oxidizing bacteria were isolated in single quantities. In the water area of the Black Sea region of the strait the number of heterotrophic bacteria was 10^6 , the number of oil-oxidizing bacteria did not exceed $10 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$. In comparison with the previous years' data, there was an increase in quantitative indicators of chloroform-extractable substances and oil hydrocarbons in the sea bottom sediments. The overall level of pollution did not exceed the average values determined for the region. The number of heterotrophic bacteria in the sea bottom sediments varied in the Strait of Azov water area from $2.5 \cdot 10^4$ to $4.5 \cdot 10^4 \text{ cells} \cdot \text{g}^{-1}$, while that of oil-oxidizing bacteria varied from $2.5 \cdot 10$ to $4.5 \cdot 10^2 \text{ cells} \cdot \text{g}^{-1}$. In the sea bottom sediments of the Black Sea, the number of heterotrophic bacteria was $4.5 \cdot 10^3 \text{ cells} \cdot \text{g}^{-1}$, the number of oil oxidizing bacteria was $10 \text{ cells} \cdot \text{g}^{-1}$.

Keywords: chloroform-extractable substances, oil hydrocarbons, heterotrophic and oil-oxidizing bacteria, sea bottom sediments, sea water, Kerch Strait, Black Sea, Azov Sea

XV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ДИАТОМОВЫЕ ВОДОРОСЛИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ»

23–27 августа 2017 г. на базе лаборатории систематики и географии водных растений ФГБУН Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН (пос. Борок Ярославской обл.) состоялась XV Международная научная конференция «Диатомовые водоросли: современное состояние и перспективы исследований» (XV Диатомовая школа). Конференция приурочена к 70-летию юбилею всемирно известного диатомолога, доктора биологических наук, главного научного сотрудника ИБВВ РАН Сергея Ивановича Генкала, автора более чем 400 публикаций и множества отечественных и зарубежных монографий, в т. ч. в серии *Iconographia Diatomologica*.

В конференции приняли участие свыше 50 диатомологов из стран СНГ и зарубежья: России, Украины, Казахстана, Беларуси, Израиля. Работали секции по следующим направлениям:

- морфология, систематика и биология диатомовых водорослей;
- биостратиграфия и использование ископаемых водорослей в палеореконструкциях;
- экология и распространение диатомовых водорослей;
- эволюция и молекулярная эволюция и филогения диатомовых водорослей;
- молекулярно-генетические методы изучения диатомовых водорослей и штрихкодирование.

По традиции диатомовых школ живой памятью об истории исследований *Bacillariophyta* и о совместной работе с основоположниками отечественной диатомологии на этот раз поделилась Каган Л. Я. в выступлении «Воспоминания. Уходящее».

Были заслушаны пленарные доклады, освещавшие вопросы эволюции полового воспроизведения диатомовых водорослей (Давидович Н. А.), разнообразия пеннатных диатомовых и биогеографии родовых таксонов (Куликовский М. С.), концепции вида (Котов А. А.), распространения диатомовых водорослей на крайнем севере Западной Сибири (Генкал С. И.), реконструкции экосистемных событий методом графического и диатомового анализа в озёрах Монгольского Алтая (Разумовский Л. В.).

В ходе конференции собравшиеся заслушали информацию о Международном диатомовом симпозиуме (Квебек, Канада), Центральноевропейских диатомовых симпозиумах (Будапешт, Венгрия и Прага, Чехия), Международном фикологическом конгрессе (Щецин, Польша).

Докладчики представили 35 устных сообщений, освещавших результаты исследований по флоре и биогеографии, палеонтологии и биостратиграфии, морфологии, систематике и биологии, репродуктивной биологии диатомовых водорослей, их молекулярно-генетическому анализу, экологии *Bacillariophyta* и биоиндикации. В постерной сессии результаты своих исследований по тем же направлениям представили 28 участников.



Рис. 1. Участники XV Международной научной конференции «Диатомовые водоросли: современное состояние и перспективы исследований» (XV Диатомовой школы), 23–27 августа 2017 г., ФГБУН ИБВВ им. И. Д. Папанина РАН, пос. Борок Ярославской обл., Россия

Fig. 1. The participants of XV International Scientific Physiological Conference “The Diatoms: present and future research” (XV Diatom School), 23–27 August 2017, Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, Borok, Yaroslavl region, Russia

От ФГБУН «Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН» на конференции выступили с докладами: ст. н. с., к. б. н. Лях А. М. «Разнообразие текстур створок центрических диатомовых водорослей», н. с. Ли Р. И. «Диатомовые водоросли фитопланктона Севастопольской бухты», в. н. с., д. б. н. Неврова Е. Л. «Батиметрическое распределение массовых видов донных диатомовых Чёрного моря» и вед. инж. Романова Д. Ю. «*Auricula intermedia* как потенциальный вид-индикатор для оценки качества среды». По итогам конкурса среди молодых учёных призом был отмечен доклад аспирантки ФГБУН ИМБИ Д. Ю. Романовой.

Результатом работы конференции стала публикация сборника материалов.

По традиции в ходе конференции была проведена Школа для молодых исследователей по молекулярно-генетическим методам изучения диатомовых водорослей (на базе молекулярного центра лаборатории систематики и географии водных растений ИБВВ РАН).

Темами лекций и практических занятий были:

- выделение геномной ДНК и ПЦР;
- методы анализа расшифрованных последовательностей и построение филогенетических древ;
- способы анализа филогенетических древ;
- определение диатомовых водорослей и консультации по систематике диатомовых.

По итогам конференции принята резолюция о продолжении традиции проведения Диатомовых школ каждые два года. Следующую, XVI Международную научную конференцию диатомологов запланировано провести в августе 2019 г. на базе Звенигородской биостанции МГУ им. М. В. Ломоносова.

*Неврова Е. Л., д. б. н., в. н. с. отдела
экологии бентоса ФГБУН ИМБИ*

XV INTERNATIONAL SCIENTIFIC PHYCOLOGICAL CONFERENCE “THE DIATOMS: PRESENT AND FUTURE RESEARCH”

XV International Scientific Phycological Conference “The Diatoms: present and future research” (XV Diatom School) was held during 23–27 August 2017, in Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, Borok, Yaroslavl reg., Russia. More than 50 diatomologists from Russia, Kazakhstan, Belarus, Ukraine and Israel attended the Conference. The researchers discussed a lot of issues concerning morphology, taxonomy and biology of diatoms, biostratigraphy and using of diatoms in paleoreconstruction, ecology and biogeography of diatoms, problems of diatom evolution, molecular phylogeny and barcoding. The Volume of Proceeding based on the reports submitted to the Conference was prepared. The conference was dedicated to the 70th anniversary of Sergei Ivanovich Genkal, well-known outstanding diatomologist, author of more than 400 papers and monographs, i. e. “Iconographia Diatomologica”.

Keywords: XV Diatom School, conference, Bacillariophyta, IBIW RAS

*Nevrova E. L., D. Sc., Leading researcher of
Department of Benthos Ecology IMBR RAS*

ПАМЯТИ СЕРГЕЯ МИХАЙЛОВИЧА ИГНАТЬЕВА (04.03.1958–12.08.2017)

12 августа 2017 года ушёл из жизни **Сергей Михайлович Игнатъев** — старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, специалист, проработавший в Институте более 38 лет.



Сергей Михайлович начал свою деятельность в Институте биологии южных морей имени А. О. Ковалевского в 1979 году, поступив в аспирантуру, и уже в 1984-м защитил кандидатскую диссертацию. Сфера его научных интересов лежала в области исследования прибрежных экосистем модельных регионов океана (Севастопольской бухты, архипелага Аргентинские острова). Сергей Михайлович участвовал в изучении структуры, функционирования и динамики отдельных компонентов экосистем в связи с их трансформацией под влиянием факторов различной природы. Полученная информация использовалась, в частности, для формирования целостного представления об особенностях структурной организации морской экосистемы в районе украинской антарктической станции «Академик Вернадский» и о её многолетней динамике.

Сергей Михайлович был участником II и VII Украинских антарктических экспедиций, зимовал на украинской антарктической станции «Академик Вернадский», осуществляя там комплекс биологических исследований. Принял участие в более чем 30 научно-исследовательских экспедициях в различные районы Мирового океана на НИС «Профессор Водяницкий», нередко как начальник отряда или учёный секретарь. Сергей Михайлович большое внимание уделял изучению гребневиков-вселенцев в Чёрном море. Результаты его исследований отражены в более чем 200 публикациях. Он неоднократно участвовал в работе национальных и международных конференций, симпозиумов и совещаний.

Будучи человеком увлечённым, Сергей Михайлович много внимания уделял изучению истории Института и кораблей научно-исследовательского флота. Он находил материалы не только в институтском архиве, но и в других, тщательно анализировал источники, печатал статьи в изданиях Украины и России. Сергей Михайлович подготовил и выпустил книгу «Экспедиционный флот Института биологии

южных морей. Исторический очерк». Большой интерес представляют и его исследования об истории гибели научной библиотеки Севастопольской биологической станции во время войны, а также об отдельных учёных, работавших на СБС и в ИнБЮМ.

Сергею Михайловичу были присущи широта взглядов на исследуемые вопросы и целеустремлённость. Он был ответственным специалистом, требовательным к себе и другим при выполнении поставленных научных задач. Сергей Михайлович был отзывчивым товарищем, равнодушным человеком, хорошим семьянином, воспитавшим двоих детей. Его всегда будут помнить друзья и коллеги.

Коллектив Института морских биологических исследований имени А. О. Ковалевского выражает искренние соболезнованиям родным и близким Сергея Михайловича Игнатъева.

**TO THE MEMORY OF SERGEY MIKHAILOVICH IGNATYEV
(04.03.1958–12.08.2017)**

August 12, 2017 **Sergey Mikhailovich Ignatyev**, Senior Researcher, PhD (Marine biology), a specialist who worked at the Institute for more than 38 years, passed away. The collective of Kovalevsky Institute of Marine Biological Research expresses sincere condolences to the relatives and friends of Sergey Mikhailovich.

Российская академия наук
Зоологический институт
Институт морских биологических исследований
им. А. О. Ковалевского

Морской биологический журнал

Основан в феврале 2016 г.

Научное издание

Издатели журнала:

ФГБУН Зоологический институт РАН,
ФГБУН «Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН»

Печатается по рекомендации Учёного совета
ФГБУН «Институт морских биологических исследований
им. А. О. Ковалевского РАН»
(протокол № 6 от 01.08.2017)

Свидетельство о государственной регистрации

Сер. ПИ № ФС 77-64821 от 02.02.2016

Сер. ЭЛ № ФС 77-64800 от 02.02.2016

ISSN 2499-9768 print

ISSN 2499-9776 online

Выпускающий редактор

А. А. Солдатов

Корректор

О. Ю. Копытова

Технический редактор

Р. Г. Геворгиз

Компьютерная вёрстка

Л. В. Веселовская

Оригинал-макет подготовлен в пакете $\text{\LaTeX}$ (TeX Live 2015 / Debian Linux)
с использованием свободных шрифтов FreeSerif и FreeSans

Подп. к печати 01.08.2017	Формат 60×84/8	Бум. офсетная № 1	Печать офсетная
Усл.-изд. лист. — 12,1	Усл.-печ. лист. — 12	Тираж 150 экз.	Зак. № 59

Отпечатано в ООО «Колорит», ОГРН 1169204061454 от 18.11.2016
299011, г. Севастополь, ул. Ефремова, 26, кв. 38, тел.: (8692) 54-31-46, e-mail: colorit.ooo2016@yandex.ru



Вниманию читателей!

*Зоологический институт РАН,
Институт морских биологических
исследований им. А. О. Ковалевского РАН*

*издают
научный журнал*

МОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

На страницах журнала публикуются обзорные и оригинальные статьи, краткие сообщения и заметки, содержащие новые данные теоретических и экспериментальных исследований в области морской экологии, материалы о закономерностях распределения животных и растительных организмов в Мировом океане, результаты комплексного изучения морских и океанических экосистем, работы в области гидрологии, гидрохимии, молисмологии Мирового океана и др. Публикуются также методические разработки, материалы научных дискуссий, рецензии, исторические хроники, информация о конференциях и т. п.

- Рассчитан на экологов, океанологов, гидробиологов, радиобиологов, географов, научных работников других смежных специальностей, а также аспирантов, студентов соответствующего научного и отраслевого профиля.
- Статьи публикуются на русском и английском языках.
- Периодичность – четыре раза в год.
- Подписной индекс в каталоге «Пресса России» Е38872.

**Заказать
«Морской биологический журнал»**

можно в отделе научно-технической информации ИМБИ им. А. О. Ковалевского.

Адрес: ФГБУН «Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН», пр. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация

Тел.: +7 (8692) 54-56-62

E-mail: mbj@imbr-ras.ru

*Zoological Institute, RAS,
Kovalevsky Institute of Marine
Biological Research, RAS*

*publish
scientific journal*

MARINE BIOLOGICAL JOURNAL

Reviews and original articles, short messages and notes, that contain new data of theoretical and experimental researches in the area of marine biology, materials about the variety of marine organisms, their populations and communities, about the patterns of distribution of animals and plants in the World Ocean, results of the comprehensive study of marine and ocean ecosystems, results of the anthropogenic impact on marine organisms and ecosystems in general are assumed to publish in the Marine Biological Journal.

- The journal is designated for biologists, hydrobiologists, ecologists, radiobiologists, biophysicists, oceanographers, geographers, for scientists of other related specialties, for students of relevant scientific profiles.
- The articles are published in Russian and English.
- The journal is published four times a year.
- The subscription index in the “Russian Press” catalogue is E38872.

**You may order
Marine Biological Journal**

in the Department of Scientific and Technical Information of IMBR.

Address: Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS, Nakhimov avenue, 2, Sevastopol, 299011, Russian Federation

Tel.: +7 (8692) 54-56-62

E-mail: mbj@imbr-ras.ru