



ISSN 2499-9768 print

МОРСКОЙ
БИОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ
MARINE BIOLOGICAL JOURNAL

Том 8 № 2
2023



**МОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
MARINE BIOLOGICAL JOURNAL**

Выпуск посвящён 300-летию Российской академии наук.

Журнал включён в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Российской Федерации, а также в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI).

Журнал реферируется международной библиографической и реферативной базой данных Scopus (Elsevier), международной информационной системой по водным наукам и рыболовству ASFA (ProQuest), Всероссийским институтом научно-технической информации (ВИНИТИ),

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

Все материалы проходят независимое двойное слепое рецензирование.

Редакционная коллегия

Главный редактор

Егоров В. Н., акад. РАН, д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Заместитель главного редактора

Солдатов А. А., д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Ответственный секретарь

Корнийчук Ю. М., к. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

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

Азовский А. И., д. б. н., проф., МГУ

Васильева Е. Д., д. б. н., МГУ

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

Денисенко С. Г., д. б. н., ЗИН РАН

Довгаль И. В., д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Зуев Г. В., д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

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

Мильчакова Н. А., к. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Неврова Е. Л., д. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Празукин А. В., д. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Руднева И. И., д. б. н., проф., ФИЦ МГИ

Рябушко В. И., д. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Самышев Э. З., д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Санжарова Н. И., чл.-корр. РАН, д. б. н., ВНИИРАЭ

Совга Е. Е., д. г. н., проф., ФИЦ МГИ

Стельмах Л. В., д. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

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

Фесенко С. В., д. б. н., проф., ВНИИРАЭ

Arvanitidis Chr., D. Sc., HCMR, Greece

Bat L., D. Sc., Prof., Sinop University, Turkey

Ben Souissi J., D. Sc., Prof., INAT, Tunis

Kociolek J. P., D. Sc., Prof., CU, USA

Magni P., PhD, CNR-IAS, Italy

Moncheva S., D. Sc., Prof., IO BAS, Bulgaria

Pešić V., D. Sc., Prof., University of Montenegro,

Montenegro

Zaharia T., D. Sc., NIMRD, Romania

Адрес учредителя, издателя и редакции:

ФИЦ «Институт биологии южных морей
имени А. О. Ковалевского РАН».

Пр-т Нахимова, 2, Севастополь, 299011, РФ.

Тел.: +7 8692 54-41-10. E-mail: mbj@imbr-ras.ru.

Сайт журнала: <https://marine-biology.ru>.

Адрес соиздателя:

Зоологический институт РАН.

Университетская наб., 1, Санкт-Петербург, 199034, РФ.

Editorial Board

Editor-in-Chief

Egorov V. N., Acad. of RAS, D. Sc., Prof., IBSS, Russia

Assistant Editor

Soldatov A. A., D. Sc., Prof., IBSS, Russia

Managing Editor

Korneychuk Yu. M., PhD, IBSS, Russia

Adrianov A. V., Acad. of RAS, D. Sc., Prof.,
NSCMB FEB RAS, Russia

Arvanitidis Chr., D. Sc., HCMR, Greece

Azovsky A. I., D. Sc., Prof., MSU, Russia

Bat L., D. Sc., Prof., Sinop University, Turkey

Ben Souissi J., D. Sc., Prof., INAT, Tunis

Denisenko S. G., D. Sc., ZIN, Russia

Dovgal I. V., D. Sc., Prof., IBSS, Russia

Fesenko S. V., D. Sc., Prof., RIRAE, Russia

Genkal S. I., D. Sc., Prof., IBIW RAS, Russia

Kociolek J. P., D. Sc., Prof., CU, USA

Konovalev S. K., Corr. Member of RAS, D. Sc., Prof.,

MHI RAS, Russia

Magni P., PhD, CNR-IAS, Italy

Milchakova N. A., PhD, IBSS, Russia

Moncheva S., D. Sc., Prof., IO BAS, Bulgaria

Nevrova E. L., D. Sc., IBSS, Russia

Pešić V., D. Sc., Prof., University of Montenegro, Montenegro

Prazukin A. V., D. Sc., IBSS, Russia

Rudneva I. I., D. Sc., Prof., MHI RAS, Russia

Ryabushko V. I., D. Sc., IBSS, Russia

Samyshev E. Z., D. Sc., Prof., IBSS, Russia

Sanjharova N. I., Corr. Member of RAS, D. Sc., RIRAE, Russia

Sovga E. E., D. Sc., Prof., MHI RAS, Russia

Stelmakh L. V., D. Sc., IBSS, Russia

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

Vasil'eva E. D., D. Sc., MSU, Russia

Zaharia T., D. Sc., NIMRD, Romania

Zuyev G. V., D. Sc., Prof., IBSS, Russia

Founder, Publisher, and Editorial Office address:

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas
of Russian Academy of Sciences.

2 Nakhimov ave., Sevastopol, 299011, Russia.

Тел.: +7 8692 54-41-10. E-mail: mbj@imbr-ras.ru.

Journal website: <https://marine-biology.ru>.

Co-publisher address:

Zoological Institute Russian Academy of Sciences.

1 Universitetskaya emb., Saint Petersburg, 199034, Russia.

МОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

MARINE BIOLOGICAL JOURNAL

2023 Том 8 № 2

Основан в феврале 2016 г.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит 4 раза в год

СОДЕРЖАНИЕ

Научные сообщения

Галаговец Е. А., Прусова И. Ю.

Пространственно-временная динамика структуры сообщества зоопланктона
в прибрежных водах у Севастополя в весенне-осенний период 3–17

Гальшиева Ю. А., Пелех А. Д., Бойченко Т. В., Нестерова О. В., Яковлева А. Н.

Органическое вещество в экосистеме залива Владимира (Японское море):
ресурс питания и возможный фактор экологического риска 18–41

Давидович Н. А., Давидович О. И., Подунай Ю. А.

Биология воспроизведения и жизненный цикл диатомовой водоросли *Nitzschia cf. thermaloides*,
населяющей грязевые вулканы Крыма 42–54

Климова Т. Н., Аннинский Б. Е., Субботин А. А., Вдодович И. В., Подрезова П. С.

Состояние ихтио-, мезо- и макропланктонных комплексов
у Крымского полуострова (Чёрное море)
в связи с особенностями гидрологического режима в октябре 2016 г. 55–73

Серегин С. А., Попова Е. В.

Обилие, видовое разнообразие и структура сообщества метазойного микрозоопланктона
в градиенте бухта — взморье (на примере Севастопольской бухты, Чёрное море) 74–90

Фоменко С. Е., Кушнерова Н. Ф., Спрыгин В. Г., Другова Е. С., Лесникова Л. Н., Мерзляков В. Ю.

Оценка антиоксидантной активности экстрактов из морских водорослей Японского моря
in vitro и *in vivo* 91–103

Заметки

Расчислов О. Д., Довгаль И. В.

Изменчивость морского ерша *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758 (Scorpaenidae)
из двух местообитаний в Чёрном море 104–106

Шаганов В. В., Дончик П. И.

Обнаружение золотистого бычка *Gobius xanthocephalus* (Gobiidae)
в районе юго-восточного побережья Крыма (Чёрное море) 107–110

Хроника и информация

К 90-летию юбилею профессора Олега Глебовича Миронова (1933–2022) 111–112

Памяти учёного: к 80-летию со дня рождения профессора Юрия Николаевича Токарева 113–114

МОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

MARINE BIOLOGICAL JOURNAL

2023 Vol. 8 no. 2

Established in February 2016

SCIENTIFIC JOURNAL

4 issues per year

CONTENTS

Scientific communications

Galagovets E. A. and Prusova I. Yu.

Spatial-temporal dynamics of the zooplankton assemblage structure
in coastal waters near Sevastopol in the spring–autumn period (in Russ.) 3–17

Galysheva Yu. A., Pelekh A. D., Boychenko T. V., Nesterova O. V., and Yakovleva A. N.

Organic matter in the ecosystem of the Vladimir Bay (the Sea of Japan):
Food resource and environmental risk factor (in Russ.) 18–41

Davidovich N. A., Davidovich O. I., and Podunay Yu. A.

Reproductive biology and the life cycle of the diatom *Nitzschia cf. thermaloides*
inhabiting mud volcanoes of Crimea (in Russ.) 42–54

Klimova T. N., Anninsky B. E., Subbotin A. A., Vdodovich I. V., and Podrezova P. S.

State of the ichthyo-, meso-, and macroplankton complexes off the Crimean Peninsula (the Black Sea)
in connection with the hydrobiological regime features in October 2016 (in Russ.) 55–73

Seregin S. A. and Popova E. V.

Abundance, species diversity, and structure of the metazoan microzooplankton community
in the bay–seaside gradient (on the example of the Sevastopol Bay) (in Russ.) 74–90

Fomenko S. E., Kushnerova N. F., Sprygin V. G., Drugova E. S., Lesnikova L. N., and Merzlyakov V. Yu.

Assessment of antioxidant activity of seaweed extracts from the Sea of Japan
in vitro and *in vivo* (in Russ.) 91–103

Notes

Raschyslov O. D. and Dovgal I. V.

Variability of the black scorpionfish, *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758 (Scorpaenidae),
from two Black Sea localities (in Russ.) 104–106

Shaganov V. V. and Donchik P. I.

Finding of the golden goby *Gobius xanthocephalus* (Gobiidae)
off the southeastern coast of Crimea (the Black Sea) (in Russ.) 107–110

Chronicle and information

On the 90th anniversary of Professor Oleg Mironov (1933–2022) (in Russ.) 111–112

On the 80th anniversary of Professor Yuriy Tokarev (in Russ.) 113–114

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 591.524.12-045.52(262.5)

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА
СТРУКТУРЫ СООБЩЕСТВА ЗООПЛАНКТОНА
В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ У СЕВАСТОПОЛЯ
В ВЕСЕННЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД**

© 2023 г. **Е. А. Галаговец, И. Ю. Прусова**

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,

Севастополь, Российская Федерация

E-mail: didobe@mail.ru

Поступила в редакцию 16.12.2020; после доработки 01.04.2021;
принята к публикации 16.02.2023; опубликована онлайн 31.05.2023.

Зоопланктон прибрежной зоны у Севастополя изучен довольно хорошо, однако комплексных работ с характеристикой всех таксонов, формирующих зоопланктонные сообщества данного региона, немного. Кроме того, проведённые ранее исследования в основном базировались на материалах, собранных в Севастопольской бухте на одной или двух станциях (у входа и/или в кутовой части), при этом анализ пространственной изменчивости зоопланктона внутри акватории бухты выполнен не был. Цель настоящей работы — охарактеризовать пространственно-временную динамику сообществ зоопланктона Севастопольской бухты и прилегающих открытых вод в весенне-осенний период 2013 г. Материалом послужили пробы зоопланктона, собранные с апреля по ноябрь 2013 г. в западной, центральной и восточной частях Севастопольской бухты, а также на трёх станциях в открытом побережье — в двух милях от входа в бухту, возле посёлка Учкучевка и у входа в бухту Круглая. Оценку пространственно-временных различий таксономической структуры сообществ зоопланктона проводили с использованием процедур анализа сходства (ANOSIM), непараметрического многомерного шкалирования (MDS) и определения вклада отдельных таксонов в сходство/различие Брея — Кёртиса между группами проб (SIMPER). При анализе бета-разнообразия применяли индекс Шеннона. Исследование показало, что в рассматриваемый период между разными частями акватории Севастопольской бухты и прилегающего открытого побережья имелись пространственно-временные различия в количественных показателях и таксономической структуре зоопланктонных сообществ. Наибольший уровень различий в таксономической структуре зоопланктона отмечен между центрально-восточной частью бухты и открытым побережьем. При сравнении сообществ этих акваторий значения тестовой статистики R (ANOSIM) весной, летом и осенью составили 0,926; 0,572 и 0,761 ($p < 0,03$) соответственно. Средняя численность суммарного зоопланктона во все сезоны в бухте была выше, чем в открытом побережье, — $(5,3 \pm 1,9)$, $(16,3 \pm 2,7)$ и $(8,3 \pm 1,4)$ тыс. экз. \cdot м⁻³ против $(0,8 \pm 0,3)$, $(4,6 \pm 1,2)$ и $(3,4 \pm 1,3)$ тыс. экз. \cdot м⁻³ весной, летом и осенью соответственно (среднее $\pm SE$; $p < 0,006$). Отмечена тенденция к более высоким величинам плотности в срединной части бухты. Выявлено изменение уровня разнообразия и, соответственно, степени сложности сообщества зоопланктона в пространственно-временном аспекте. Наиболее низкий уровень разнообразия зарегистрирован весной при средней ($\pm SE$) величине индекса Шеннона H' $1,09 \pm 0,16$; летом и осенью значения возросли до $1,94 \pm 0,11$ и $1,48 \pm 0,09$ соответственно. В летне-осенний период

величины H' были выше в зоне открытого побережья ($2,07 \pm 0,09$) и ниже в акватории внутри бухты ($1,53 \pm 0,09$). Определено, что различия в таксономической структуре между сообществами сравниваемых акваторий весной обусловлены тремя, летом — девятью, осенью — пятью доминирующими таксонами.

Ключевые слова: зоопланктон, копеподы, таксономическая структура, разнообразие, Севастопольская бухта

Зоопланктон прибрежной зоны у Севастополя изучен довольно хорошо. Так, исследована динамика численности и биомассы кормового зоопланктона до и после вселения гребневиков *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz, 1865 и *Beroe ovata* Bruguère, 1789 [Губарева и др., 2004; Дацк и др., 2012], описаны долговременные изменения в структуре таксоценоза копепод в 1976–1996 гг. [Gubanova et al., 2002]. Большое внимание уделено изучению экологии отдельных таксонов, в частности видов-вселенцев, и их влияния на структуру сообщества зоопланктона [Алтухов, Губанова, 2006; Губанова, 2000, 2003; Губанова и др., 2016; Серёгин, Попова, 2016; Gubanova et al., 2019, 2020]. Комплексные исследования зоопланктонных сообществ прибрежной зоны у Севастополя, включающие характеристику всех формирующих эти сообщества таксонов, не столь многочисленны и были проведены главным образом на основе материалов из Севастопольской бухты и акватории внешнего рейда в 1980-е гг. [Беляева, Загородняя, 1988; Ковалев, 1980] и в начале 2000-х гг. [Губанова, 2003; Дацк и др., 2012; Загородняя и др., 2007; Темных и др., 2008]. Выполненные ранее работы базировались преимущественно на материалах, собранных на одной или двух станциях — у входа в бухту и/или в кустовой (восточной) части; при этом анализ пространственной изменчивости зоопланктона внутри бухты проведён не был. Между тем экологические условия в бухте неоднородны: в западной части происходит более интенсивный водообмен с открытым морем, восточная часть пополняется пресными водами из реки Чёрная, а срединная часть подвержена влиянию большого количества сточных вод, как ливневых, так и промышленно-бытовых [Губанов и др., 2015; Павлова и др., 1999], что, несомненно, отражается на состоянии сообществ этих акваторий.

Цель настоящего исследования — охарактеризовать пространственно-временную динамику сообществ зоопланктона Севастопольской бухты и прилегающих открытых вод в весенне-осенний период 2013 г.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования выполняли в прибрежных акваториях города Севастополя (рис. 1): в Севастопольской бухте (ст. 1–7) и на трёх станциях в открытом побережье — в двух милях от входа в бухту (ст. М), возле посёлка Учкучевка (ст. У) и на выходе из бухты Круглая (ст. К). Работы проводили в период с апреля по ноябрь 2013 г. (табл. 1). Отбор проб зоопланктона производили сетью Джели с площадью входного отверстия $0,1 \text{ м}^2$ и размером ячеей фильтрующего сита 132 мкм. На всех станциях пробы собирали в первой половине дня в слое 10–0 м методом вертикального лова. Температуру поверхности воды измеряли в момент пробоотбора. Пробы фиксировали в 4%-ном растворе нейтрального формалина, идентификацию и измерение организмов проводили под микроскопом МБС-9 при 10–140-кратном увеличении. Массовые виды просчитывали с использованием камеры Богорова в 1/20 или 1/10 части пробы, взятой с помощью штемпель-пипетки объёмом 1 и 5 мл в нескольких повторностях, в зависимости от количества планктонных организмов в пробе. Для подсчёта редких таксонов просматривали весь объём пробы. Взрослых и ювенильных копепод (в том числе науплиальные стадии) определяли до вида, остальных животных — до рода, семейства или отряда (по возможности). Всего проанализировано 45 проб.

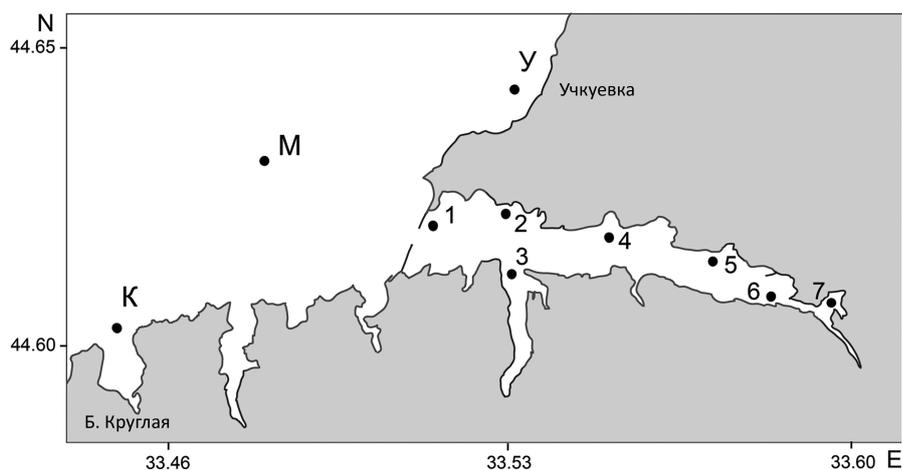


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб: ст. К — у входа в бухту Круглая; ст. М — две мили от входа в Севастопольскую бухту; ст. У — возле посёлка Учкюевка; ст. 1–7 — в Севастопольской бухте

Fig. 1. The map of sampling stations: sta. K, the Kruglaya Bay mouth; sta. M, two miles from the Sevastopol Bay mouth; sta. U, near the Uchkuevka village; sta. 1–7, in the Sevastopol Bay

Таблица 1. Периоды проведения работ, районы наблюдений и объём материала

Table 1. Sampling dates and areas, number of the samples analyzed

Сезон 2013 г.	Температура воды, °С	Местоположение, глубина места отбора проб					
		Бухта Севастопольская, 10–15 м			2 мили от берега, 50 м	Бухта Круглая, 20 м	Учкюевка, 50 м
		ст. 1	ст. 2–4	ст. 5–7	М	К	У
		Б1	Б2	Б3	МКУ	МКУ	МКУ
Количество проб							
Весна (11.04–25.04)	+10,3...+11,9	2	2	1	1	1	2
Лето (11.07–19.09)*	+23,0...+25,4	5	2	3	3	3	3
Осень (11.10–14.11)	+13,7...+15,5	4	6	3	1	–	3

Примечание: Б1 — западная часть Севастопольской бухты (ст. 1); Б2 — центральная часть бухты (ст. 2–4); Б3 — восточная часть бухты (ст. 5–7); МКУ — открытое побережье (ст. М, К, У). * — согласно классификации гидрологических сезонов в неарктической зоне Чёрного моря, предложенной В. Н. Грезе и др. [1971], данные за сентябрь отнесены к данным летнего периода.

Note: Б1, the western Sevastopol Bay (sta. 1); Б2, the central bay (sta. 2–4); Б3, the eastern bay (sta. 5–7); МКУ, the open coastal water area (sta. M, K, U). *, according to the classification of hydrological seasons in the neritic zone of the Black Sea proposed by V. Greze *et al.* [1971], the September data were referred to summer season data.

Графический и статистический анализ проводили с использованием программных пакетов PRIMER v5.2.4 и SigmaPlot 12.5. Оценку пространственно-временных различий таксономической структуры сообществ зоопланктона осуществляли на основе алгоритма сравнения степени вариабельности ранговых сходств (R -статистика) в программе ANOSIM с использованием индекса сходства Брея — Кёртиса S ($S = 100\%$, если сравниваемые пробы полностью сходны; $S = 0$, если сравниваемые пробы полностью различны [Clarke, Warwick, 2001]). Тестовая статистика R характеризует наблюдаемые различия в структуре сообществ между акваториями сбора проб в сравнении с различиями между пробами внутри каждой акватории. Величина R изменяется в пределах от -1 до 1 ; $R = 1$ в случае, если все повторности в месте сбора проб более сходны друг с другом, чем с любой пробой из другого района. Величина R близка к нулю, если сходство между пробами внутри и между акваториями в среднем одинаково [Clarke, Warwick, 2001].

Для анализа бета-разнообразия использовали индекс Шеннона $H' (\log e)$. При ординации методом непараметрического многомерного шкалирования (multi-dimensional scaling, MDS) применяли индексы Брея — Кёртиса с 10 перезапусками для определения наименьшего значения показателя стресса. При выполнении процедур кластерного анализа, MDS, SIMPER (определение вклада отдельных таксонов в сходство/различие между группами проб) матрицу сходства Брея — Кёртиса строили на основе трансформированных в степени 0,5 исходных данных [Clarke, Warwick, 2001]. При построении матрицы для проведения кластерного и MDS-анализа данные по каждому сезону для каждой станции (в том числе для условных ст. Б2 и Б3) предварительно усредняли. Оценку различий между средними значениями индекса Шеннона проводили по критерию Стьюдента (ANOVA) для уровня значимости $p = 0,05$; оценку различий между средними величинами численности выполняли по ранговому критерию Манна — Уитни для уровня значимости $p < 0,01$. При обозначении отдельных районов акватории исследования использованы следующие аббревиатуры: Б1 — западная часть бухты (ст. 1); Б2 — центральная часть бухты (ст. 2–4); Б3 — восточная часть бухты (ст. 5–7); МКУ — открытое побережье (ст. М, К, У).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таксономический состав и средняя численность зоопланктона. В проанализированном материале зарегистрировано 26 таксонов зоопланктона (табл. 2), из которых 16 определены до уровня вида. Были учтены также клетки жгутиконосца *Noctiluca scintillans*. Голопланктон представлен главным образом копеподами, суммарный вклад которых в общую численность составлял 25,5; 74,4 и 87,0 % весной, летом и осенью соответственно (табл. 3). Относительно малая доля копепод в весенний период обусловлена высокой плотностью коловраток (Rotifera) в этот сезон (см. табл. 3). Из организмов меропланктона наиболее обильными были личинки усоногих раков (Cirripedia), полихет (Polychaeta) и моллюсков (Bivalvia и Gastropoda) — с вкладом в общую численность зоопланктона в пределах 2,5–10,1; 0,8–4,2 и 1,4–5,6 % соответственно. Суммарная средняя численность (без учёта ноктилюки) была наибольшей летом и наименьшей — весной (табл. 3).

Таблица 2. Таксономический состав, средняя численность и встречаемость организмов зоопланктона в исследуемой акватории в весенне-осенний период 2013 г.

Table 2. Taxonomic composition, mean abundance, and occurrence of zooplankton taxa in the studied water area in the spring–autumn 2013

Таксон	Средняя численность, экз.·м ⁻³	Стандартная ошибка (SE), экз.·м ⁻³	Встречаемость в пробах, %	Сезон		
				Весна	Лето	Осень
Соперода						
<i>Oithona davisae</i> Ferrari & Orsi, 1984	3488,2	831,7	91	+	+	+
<i>Acartia clausi</i> Giesbrecht, 1889	795,1	120,4	100	+	+	+
<i>Acartia tonsa</i> Dana, 1849	449,4	144,2	38	–	+	+
<i>Paracalanus parvus</i> (Claus, 1863)	379,9	68,7	91	+	+	+
<i>Centropages ponticus</i> Karavaev, 1895	205,2	44,6	82	+	+	+
<i>Pseudocalanus elongatus</i> (Boeck, 1865)	71,3	17,5	56	+	+	+
<i>Oithona similis</i> Claus, 1866	44,9	18,4	36	+	+	+
<i>Calanus euxinus</i> Hulsemann, 1991	36,7	9,8	60	+	+	+
Нарпacticoida	13,2	5,0	49	+	+	+
<i>Cyclopina gracilis</i> Claus, 1863	0,5	0,4	4	+	+	–
<i>Pontella mediterranea</i> (Claus, 1863)	0,3	0,2	13	+	–	–

Продолжение на следующей странице...

Таксон	Средняя численность, экз.·м ⁻³	Стандартная ошибка (SE), экз.·м ⁻³	Встречаемость в пробах, %	Сезон		
				Весна	Лето	Осень
Прочие группы зоопланктона						
Rotifera	422,8	336,9	20	+	+	+
<i>Penilia avirostris</i> Dana, 1852	288,0	130,2	58	–	+	+
Cirripedia (nauplii)	283,0	61,8	91	+	+	+
<i>Oikopleura dioica</i> Fol, 1872	247,4	59,2	73	+	+	+
Bivalvia (larvae)	189,0	63,6	98	+	+	+
Polychaeta (larvae)	177,4	67,0	84	+	+	+
Gastropoda (larvae)	106,3	19,9	84	+	+	+
<i>Evadne spinifera</i> P. E. Müller, 1867	84,2	33,0	31	–	+	–
Hydrozoa (larvae)	55,5	35,1	29	–	+	+
<i>Parasagitta setosa</i> (J. Müller, 1847)	47,6	17,4	67	+	+	+
<i>Pleopis polyphemoides</i> (Leuckart, 1859)	31,1	14,9	38	–	+	+
<i>Pseudevadne tergestina</i> (Claus, 1877)	22,6	12,8	16	–	+	–
Decapoda (larvae)	14,5	4,9	53	–	+	+
Isopoda	10,8	3,8	44	–	+	+
Nematoda	4,1	3,3	16	+	+	+
<i>Noctiluca scintillans</i> (Macartney) Kofoid & Swezy, 1921	242,5	87,1	29	+	+	–

Таблица 3. Среднесезонные показатели абсолютной и относительной численности разных таксономических групп зоопланктона в весенне-осенний период 2013 г.

Table 3. Seasonal mean values of the absolute and relative abundance of different taxonomic groups of zooplankton in the spring–autumn 2013

Таксон	Средняя численность ± SE, экз.·м ⁻³			Доля в общей численности, %		
	Весна	Лето	Осень	Весна	Лето	Осень
Appendicularia	2 ± 1	241 ± 96	384 ± 104	0,1	2,3	5,6
Chaetognatha	0	91 ± 39	24 ± 9	0	0,9	0,4
Cirripedia	352 ± 159	262 ± 106	270 ± 82	10,1	2,5	3,9
Cladocera	0	985 ± 347	27 ± 7	0	9,3	0,4
Copepoda	896 ± 150	7898 ± 1976	6044 ± 998	25,7	74,6	87,3
Hydrozoa	0	123 ± 81	10 ± 6	0	1,2	0,1
Decapoda	0	31 ± 11	4 ± 2	0	0,3	0,1
Isopoda	0	21 ± 8	5 ± 2	0	0,2	0,1
Mollusca	49 ± 18	590 ± 153	96 ± 21	1,4	5,6	1,4
Nematoda	1 ± 0,7	9 ± 8	1 ± 0,5	0,0	0,1	0,0
Polychaeta	146 ± 71	304 ± 151	52 ± 18	4,2	2,9	0,8
Rotifera	2044 ± 1646	30 ± 22	4 ± 3	58,6	0,3	0,1
Итого (без <i>Noctiluca scintillans</i>)	3491 ± 1797	10 583 ± 2467	6922 ± 1143	–	–	–
<i>N. scintillans</i>	974 ± 328	113 ± 58	0	–	–	–

Группирование проб. Проведена оценка степени сходства районов сбора проб (и, соответственно, состава сообществ зоопланктона в этих акваториях) методом MDS-ординации на основе данных по численности организмов в пробах (рис. 2).

Во все сезоны станции, отобранные внутри бухты (группы Б2 и Б3) и у открытого побережья (ст. М, К, У), группировались обособленно в пределах ординационной плоскости, что отражает определённый уровень различий в таксономической структуре между сообществами

зоопланктона в бухте и в районе открытого побережья. Сообщество на станции у выхода из бухты (Б1) было сходным по составу видов с сообществами как внутренней части бухты, так и открытого побережья, что обусловлено промежуточным местоположением ст. Б1. По степени сходства видового состава зоопланктона эта станция объединялась весной и летом в одну группу со станциями открытого побережья, а осенью — со станциями бухты (см. рис. 2).

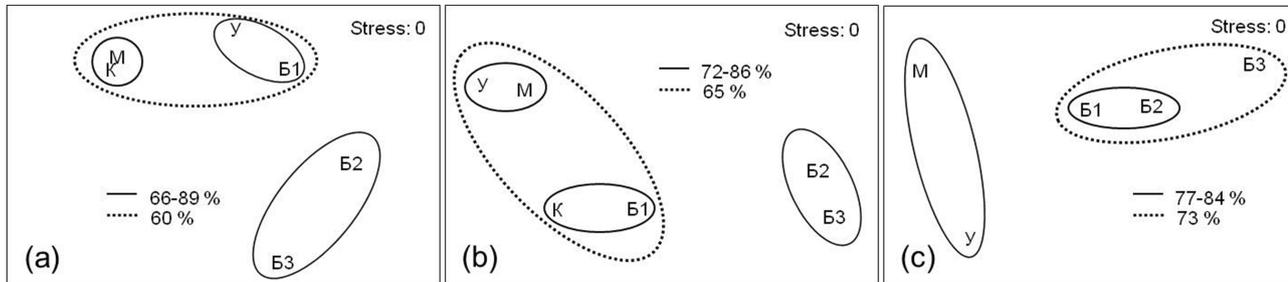


Рис. 2. Результаты ординационного анализа методом MDS; группирование станций на основе таксономической структуры сообществ зоопланктона: а — весна; б — лето; в — осень. Использованы данные по численности организмов зоопланктона, усреднённые для каждого из регионов. Обводка сплошной и пунктирной линиями соответствует уровню (%) группирования районов (станций) по результатам кластерного анализа

Fig. 2. Results of MDS ordination analysis; grouping of stations based on the taxonomic structure of zooplankton assemblages: a, spring; b, summer; c, autumn. Data on the abundance of zooplankton taxa averaged for each area were used. Solid and dashed lines correspond to the level (%) of grouping of areas (stations) by the results of cluster analysis

С учётом результатов ординации проанализирован уровень сходства между выявленными группами проб (табл. 4). Сообщества районов Б2 и Б3 были наиболее сходными: индекс Брея — Кёртиса S в группе Б2 в сравнении с группой Б3 варьировал в пределах 53–67%; у других сопоставляемых групп значение показателя было ниже во все сезоны. Наличие различий между сообществами зоопланктона в акваториях бухты и открытого побережья подтверждено высокими значениями статистики R , оценивающей степень вариабельности средних значений ранговых сходств для комбинаций всех пар станций из разных групп в сравнении с вариабельностью сходств между любой парой станций из одной группы.

Для этих районов значения R весной, летом и осенью составили 0,926; 0,572 и 0,761 соответственно; различия между ними значимы (табл. 4). В сопоставляемых группах (Б1 в сравнении с Б2 + Б3; Б1 в сравнении с МКУ) показатель статистики R был невысоким (от 0,107 до 0,358), что свидетельствует о малой степени различий в пределах этих групп. Обобщающее значение R (global R), характеризующее уровень пространственных различий между группами для каждого из сезонов в целом, весной было значимо выше, чем летом и осенью (см. табл. 4). Значение global R , рассчитанное для каждого из районов (МКУ, Б1, Б2 и Б3), составляло 0,790; 0,814; 0,992 и 0,556 соответственно (при $p < 0,002$), что в целом выше, чем значения показателей пространственных изменений.

Полученные результаты означают, что: 1) таксономическая структура зоопланктона в изученных акваториях неоднородна, между сообществами центральной и восточной частей бухты степень сходства выше по сравнению с таковой для западной части и открытого побережья; 2) наибольшая степень различия отмечена во все сезоны между центрально-восточной частью бухты и открытым побережьем; 3) пространственная изменчивость структуры зоопланктона в весенний период выше, чем летом и осенью; 4) сезонная изменчивость структуры выражена сильнее, чем пространственная.

Таблица 4. Результаты тестирования пространственно-временных различий таксономической структуры сообществ зоопланктона при сравнении групп проб на основе численности таксонов в весенне-осенний период 2013 г.

Table 4. Results of the test for spatial-temporal differences in the taxonomic structure of zooplankton assemblages when comparing groups of samples based on the abundance of taxa in the spring–autumn 2013

Районы	Весна			Лето			Осень		
	<i>S</i> , %	<i>R</i>	<i>p</i>	<i>S</i> , %	<i>R</i>	<i>p</i>	<i>S</i> , %	<i>R</i>	<i>p</i>
Б2 в сравнении с Б3	63,4	1,000	0,333	53,2	−0,083	0,400	67,5	0,243	0,143
Б2 + Б3 в сравнении с МКУ	35,9	0,926	0,029	42,6	0,572	0,003	47,2	0,761	0,001
Б1 в сравнении с Б2 + Б3	53,2	0,333	0,200	51,8	0,336	0,008	65,3	0,181	0,134
Б1 в сравнении с МКУ	59,7	0,107	0,400	50,7	0,358	0,011	55,1	0,145	0,257
	Global <i>R</i>		<i>p</i>	Global <i>R</i>		<i>p</i>	Global <i>R</i>		<i>p</i>
Вся акватория исследования	0,608		0,022	0,425		0,001	0,427		0,005

Примечание: *S* — индекс сходства Брея — Кёртиса; *R* — тестовая статистика (см. раздел «Материал и методы»); *p* — вероятность справедливости гипотезы об отсутствии различий между сравниваемыми средними значениями ($p_0 = 0,05$). Статистически достоверно различающиеся результаты выделены жирным шрифтом.

Note: *S*, the Bray–Curtis similarity index; *R*, the test statistic (see “Material and Methods” section); *p*, the probability of acceptance of the hypothesis that there are no differences between the compared mean values ($p_0 = 0.05$). Statistically significantly different results are highlighted in bold.

Индекс разнообразия. Чёткие сезонные различия значений индекса Шеннона отмечены для сообществ зоопланктона открытого побережья (МКУ): среднее значение H' летом было достоверно выше, чем весной и осенью ($p < 0,001$) (рис. 3). На ст. Б1 летом значение H' выше, чем весной ($p = 0,016$); на станциях внутри бухты (Б2 + Б3) сезонных различий для средних значений H' не выявлено. Для всей акватории исследования средняя величина индекса H' летом ($1,94 \pm 0,11$) была достоверно выше, чем весной и осенью ($1,09 \pm 0,16$ и $1,48 \pm 0,09$ соответственно) ($p < 0,0041$).

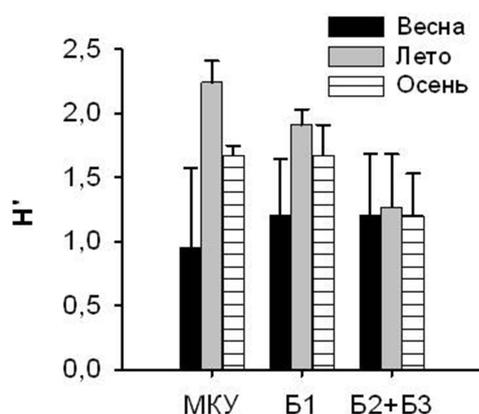


Рис. 3. Вариабельность средних значений (среднее $\pm SE$) индекса разнообразия Шеннона в Севастопольской бухте (Б1, Б2 + Б3) и в открытом побережье (МКУ) в весенне-осенний период 2013 г.

Fig. 3. Variability of mean values (mean $\pm SE$) of the Shannon diversity index in the Sevastopol Bay (Б1, Б2 + Б3) and the open coastal water area (МКУ) in the spring–autumn 2013

Пространственная динамика значений индекса Шеннона такова: в летне-осенний период величины H' были выше в зоне открытого побережья ($2,07 \pm 0,09$) и ниже в акватории внутри бухты ($1,53 \pm 0,09$). Летом значение H' для каждой из трёх выделенных акваторий (МКУ, Б1 и Б2 + Б3) достоверно различалось ($p < 0,001$), будучи наибольшим для района открытого побережья ($2,26 \pm 0,06$) и наименьшим для акватории внутри бухты ($1,66 \pm 0,15$). Осенью на станциях внутри бухты (Б2 + Б3) значение H' ($1,28 \pm 0,11$) было существенно ниже, чем у входа в бухту ($1,78 \pm 0,15$) и в открытом побережье ($1,64 \pm 0,04$) ($p = 0,041$ и $p = 0,048$ соответственно). Весной различия недостоверны.

Таким образом, более низкие значения индекса Шеннона и, соответственно, более низкое таксономическое разнообразие сообщества зарегистрированы весной во всей акватории. Отмечена тенденция повышения степени сложности сообщества по направлению к открытому побережью летом и осенью. Устойчивость данного тренда подтверждается тем, что аналогичный характер изменчивости разнообразия в акватории бухты был зафиксирован ранее по материалам 1981–1983 гг. на основе анализа пространственно-временной динамики количества видов зоопланктона [Беляева, Загородняя, 1988].

Таксоны, определяющие различия между сообществами. С помощью процедуры SIMPER установлены дискриминирующие таксоны, вклад которых в различия между сообществами зоопланктона открытого побережья (ст. МКУ), внутри бухты (ст. Б2 + Б3) и у входа в бухту (ст. Б1) был наиболее весомым и обуславливал около 50 % различий между сравниваемыми группами проб (табл. 5). Весной основной вклад в несходство между группами проб вносили 2–3 доминирующих в сообществе таксона, осенью дискриминирующих таксонов было больше, а летом отмечено их максимальное число. Полученные результаты подтверждают выводы о характере доминирования и степени сложности сообществ, сделанные на основе анализа пространственно-временной изменчивости индекса разнообразия.

Таблица 5. Таксоны, вносящие наибольший вклад в различие между сообществами зоопланктона разных частей акватории Севастопольской бухты и открытого побережья в весенне-осенний период 2013 г.

Table 5. Taxa with the largest contribution to the dissimilarity between zooplankton assemblages of different sites of the Sevastopol Bay and the open coastal water area in the spring–autumn 2013

Районы	Весна		Лето		Осень	
	Таксон	Вклад в различие, %	Таксон	Вклад в различие, %	Таксон	Вклад в различие, %
Б2 + Б3 в сравнении с МКУ	Rotifera	34,0	<i>O. davisae</i>	25,5	<i>O. davisae</i>	28,2
	<i>N. scintillans</i>	21,4	<i>P. avirostris</i>	8,2	<i>A. clausi</i>	9,9
			<i>A. tonsa</i>	8,0	Cirripedia	9,5
			<i>P. parvus</i>	5,5	<i>P. parvus</i>	8,5
			<i>O. dioica</i>	5,4		
Б1 в сравнении с МКУ	Cirripedia	20,6	<i>O. davisae</i>	18,2	<i>O. davisae</i>	16,0
	<i>N. scintillans</i>	19,0	<i>A. tonsa</i>	9,7	<i>A. clausi</i>	15,7
	Rotifera	10,3	Cirripedia	8,4	<i>O. dioica</i>	13,0
			<i>C. ponticus</i>	6,3		
			<i>O. dioica</i>	5,1		
Bivalvia			4,4			
Б1 в сравнении с Б2 + Б3	Rotifera	35,8	<i>O. davisae</i>	17,5	<i>O. davisae</i>	22,2
	<i>N. scintillans</i>	18,3	<i>A. tonsa</i>	8,3	<i>A. clausi</i>	12,2
			<i>P. avirostris</i>	7,5	<i>O. dioica</i>	9,7
			Cirripedia	6,7		
			<i>P. parvus</i>	6,4		
			<i>C. ponticus</i>	5,7		
				Cirripedia	7,1	

В течение всего периода исследований таксонами, обуславливавшими различия между сообществами, являлись пять видов копепод (*Acartia clausi*, *Acartia tonsa*, *Centropages ponticus*, *Oithona davisae* и *Paracalanus parvus*), кладоцера *Penilia avirostris*, аппендикулярия *Oikopleura dioica*, личинки двустворчатых моллюсков (Bivalvia) и усоногих раков (Cirripedia), а также коловратки (Rotifera) и жгутиконосец *N. scintillans* (табл. 5). Именно эти таксоны демонстрировали

самые высокие величины средней численности (см. табл. 3). Состав групп дискриминирующих таксонов в различные сезоны был разным (табл. 5), что свидетельствует о сезонных различиях в структуре сообществ зоопланктона (рис. 4).

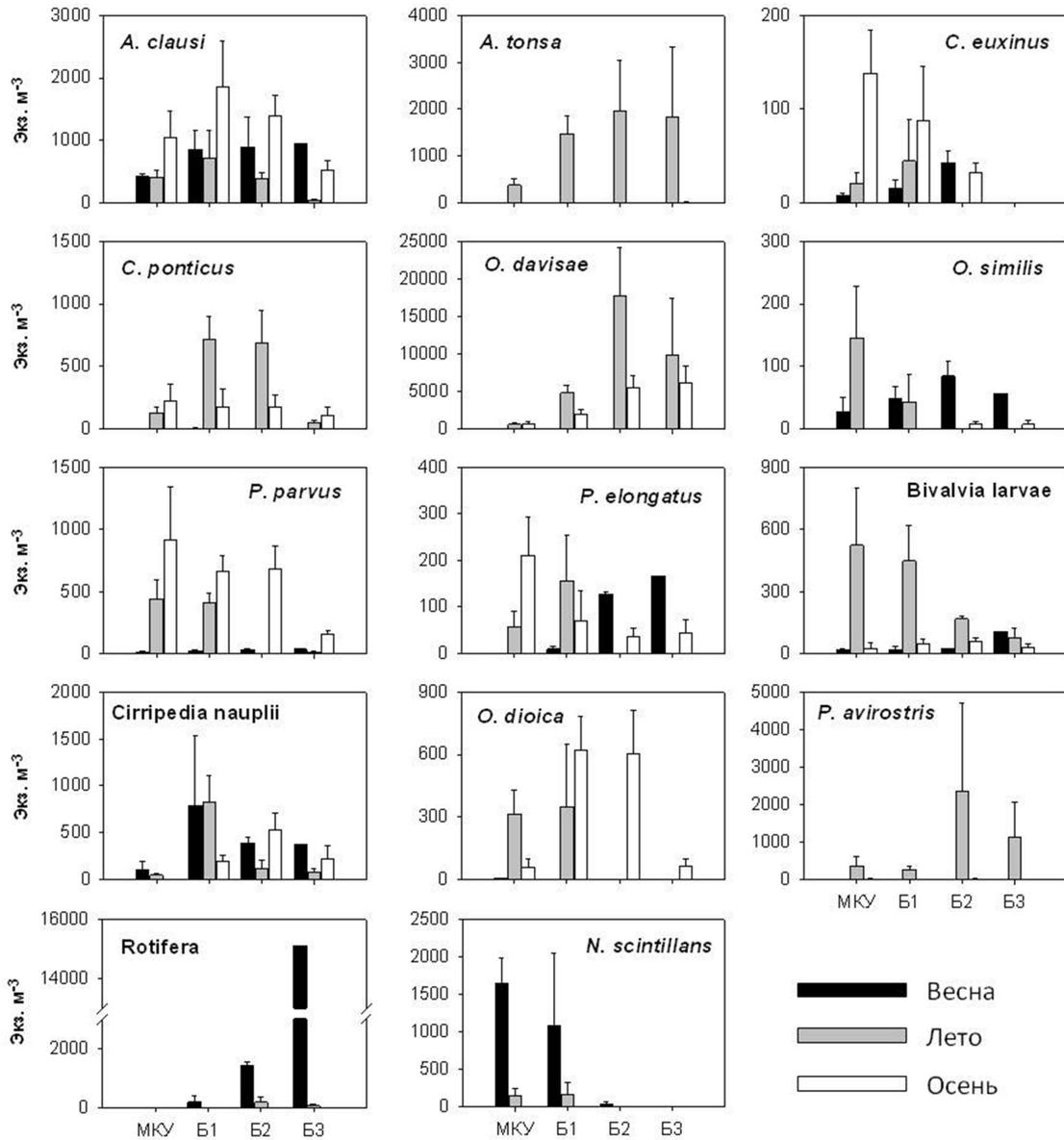


Рис. 4. Пространственно-временная динамика средней плотности (среднее \pm SE) основных видов копепоид и других наиболее массовых таксонов в Севастопольской бухте (Б1, Б2, Б3) и открытом прибрежье (МКУ) в весенне-осенний период 2013 г.

Fig. 4. Spatial-temporal dynamics of the mean abundance (mean \pm SE) of the main Copepoda species and other most abundant taxa in the Sevastopol Bay (B1, B2, B3) and the open coastal water area (MKU) in the spring–autumn 2013

Динамика структуры сообщества зоопланктона. Сообщества копепоид весеннего периода характеризовались ярко выраженным доминированием *A. clausi* (74,8–89,3 % от суммарной численности копепоид весной по сравнению с 0,3–38,9 % летом и осенью), практически полным отсутствием *C. ponticus* (0–0,4 % весной в сравнении с 1,6–6,9 % летом) и малым вкладом остальных видов (рис. 5b). В летне-осенний период доминировала *O. davisae* (21,6–88,1 % летом и осенью в сравнении с 0,3–4,8 % весной) — самый массовый вид в исследованном материале (табл. 2), достигавший наибольших значений плотности летом (до 24 950 экз.·м⁻³ в августе на ст. 6).

Важным элементом в сообществах летнего периода была *A. tonsa* (9,4–17,6 % от суммарной численности копепод), отсутствовавшая в планктоне весной и зарегистрированная в единичных экземплярах на двух из семи станций осенью. *Calanus euxinus*, *Oithona similis* и *Pseudocalanus elongatus* присутствовали в планктоне в течение всего периода исследований при невысокой плотности (рис. 4), с вариабельностью их вклада в пределах 0,4–4,3; 0,1–7,1 и 0,1–13,1 % соответственно; роль этих видов в пространственно-временной динамике структуры зоопланктона несущественна.

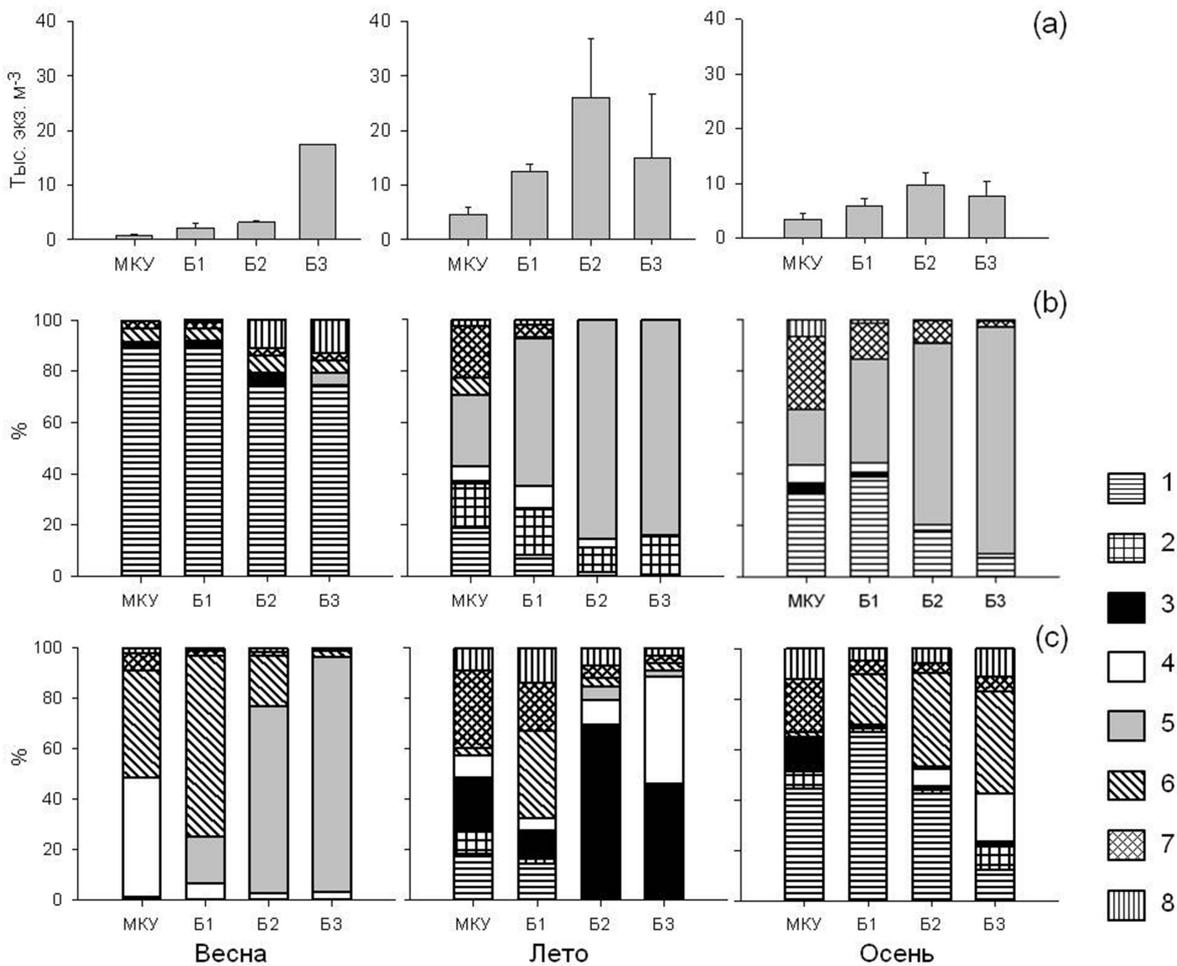


Рис. 5. Пространственно-временная динамика общей плотности (среднее \pm SE) зоопланктона (а), а также таксономической структуры сообществ Copepoda (б) и других таксонов кормового зоопланктона (с) в Севастопольской бухте (Б1, Б2, Б3) и открытом побережье (МКУ) в весенне-осенний период 2013 г. Для (б): 1 — *Acartia clausi*; 2 — *Acartia tonsa*; 3 — *Calanus euxinus*; 4 — *Centropages ponticus*; 5 — *Oithona davisae*; 6 — *Oithona similis*; 7 — *Paracalanus parvus*; 8 — *Pseudocalanus elongatus*. Для (с): 1 — *Oikopleura dioica*; 2 — *Parasagitta setosa*; 3 — *Penilia avirostris*; 4 — Polychaeta larvae; 5 — Rotifera; 6 — Cirripedia nauplii; 7 — Bivalvia larvae; 8 — Gastropoda larvae

Fig. 5. Spatial-temporal dynamics of the total abundance (mean \pm SE) of zooplankton (a) and taxonomic structure of Copepoda (b) and other taxa of forage zooplankton (c) in the Sevastopol Bay (B1, B2, B3) and the open coastal water area (MKU) in the spring–autumn 2013. For (b): 1, *Acartia clausi*; 2, *Acartia tonsa*; 3, *Calanus euxinus*; 4, *Centropages ponticus*; 5, *Oithona davisae*; 6, *Oithona similis*; 7, *Paracalanus parvus*; 8, *Pseudocalanus elongatus*. For (c): 1, *Oikopleura dioica*; 2, *Parasagitta setosa*; 3, *Penilia avirostris*; 4, Polychaeta larvae; 5, Rotatoria; 6, Cirripedia nauplii; 7, Bivalvia larvae; 8, Gastropoda larvae

Среди групп других организмов наибольший размах сезонных колебаний плотности выявлен у Rotifera — от средних значений в тысячи экз. \cdot м⁻³ весной до минимальных величин летом и осенью (см. табл. 3). Коловратки отмечены исключительно в акватории бухты (Б1, Б2 и Б3); в районе открытого побережья они не найдены. Весенний пик их обилия, 15 110 экз. \cdot м⁻³, зарегистрирован в районе Б3 (рис. 4), это 86,2 % от общей численности зоопланктона в данной акватории. Сообщества весеннего периода отличались от сообществ лета значимо ($p = 0,0034$) более высокой плотностью популяции *N. scintillans* — (974 ± 328) экз. \cdot м⁻³ по сравнению с (113 ± 58) экз. \cdot м⁻³ летом; осенью ноктилюка в планктоне отсутствовала.

Пространственная неоднородность таксономической структуры сообщества копепод определялась в основном изменчивостью соотношения долей *A. clausi*, *A. tonsa*, *C. ponticus*, *O. davisae* и *P. parvus*. Летом и осенью степень пространственных различий структуры была выражена сильнее, чем весной (рис. 5b). В группе прочих организмов пространственные изменения весной были обусловлены главным образом вариабельностью величин вклада коловраток и личинок циррипедий, летом — *P. avirostris*, личинок полихет и двустворчатых моллюсков, осенью — *O. dioica* и личинок двустворчатых моллюсков (рис. 5c).

Средняя численность суммарного зоопланктона во все сезоны в бухте (Б1 + Б2 + Б3) была достоверно выше, чем в открытом побережье, — $(5,3 \pm 1,9)$, $(16,3 \pm 2,7)$ и $(8,3 \pm 1,4)$ тыс. экз. \cdot м⁻³ против $(0,8 \pm 0,3)$, $(4,6 \pm 1,2)$ и $(3,4 \pm 1,3)$ тыс. экз. \cdot м⁻³ весной, летом и осенью соответственно (среднее \pm SE; $p < 0,006$). Аналогичное соотношение отмечено и по отдельности для сообществ копепод и прочих организмов, а также для *A. tonsa* ($p = 0,0080$), *O. davisae* ($p = 0,0004$) и Cirripedia ($p = 0,0003$). Средняя плотность *A. clausi*, *C. ponticus*, *O. dioica* и *P. avirostris* тоже была выше в бухте (рис. 4), но различия недостоверны. Средняя плотность популяций *C. euxinus*, *O. similis*, *P. parvus*, *P. elongatus*, *N. scintillans* и личинок *Vivalvia* была несколько выше в открытом побережье (рис. 4), однако различия недостоверны. Оценивая пространственную вариабельность показателей обилия внутри акватории бухты, следует отметить, что летом и осенью суммарная средняя плотность зоопланктона в центральной части (Б2) была выше, чем в восточной (Б3) и западной (Б1) (рис. 5a), но с учётом разброса значений эти различия недостоверны.

Выявленная тенденция повышения показателей обилия сообществ в срединной части Севастопольской бухты, по сравнению с показателями в восточной и западной частях, согласуется с результатами, полученными ранее: по материалам 1981–1983 гг. максимумы плотности и биомассы зоопланктона были зарегистрированы в центре бухты [Беляева, Загородняя, 1988]. Пространственные различия показателей обилия зоопланктона могут быть связаны с разными экологическими условиями в различных частях бухты, а именно с уровнем эвтрофикации, обусловленным антропогенным загрязнением. На основе изучения распределения фосфатов, силикатов, нитратов, нитритов, ионов аммония и количества взвешенного вещества в поверхностном слое в 1998–2000 гг. западная часть бухты была ранее отнесена к районам со слабым уровнем загрязнения, восточная — с умеренным, центральная — с сильным [Лопухин и др., 2007]. Центральная часть акватории бухты может отличаться более высоким уровнем трофности вод и, как следствие, более высокими величинами обилия планктона. В относительно чистых водах открытого побережья отмечены более низкие показатели плотности зоопланктона. Низкая плотность зоопланктона в открытом побережье может быть обусловлена и тем фактом, что пробоотбор осуществлён только в слое 10–0 м, а не во всём обитаемом столбе водных масс.

Дальнейшие исследования в акваториях Севастопольской бухты и открытого побережья в сочетании с анализом данных по гидрохимии позволят дополнить полученные результаты и выявить пространственные закономерности формирования сообществ зоопланктона в пределах данного региона.

Заключение. Между разными частями акваторий Севастопольской бухты и прилегающего открытого побережья выявлены пространственно-временные различия в количественных показателях и таксономической структуре зоопланктонных сообществ в рассмотренный весенне-осенний период 2013 г. Суммарная средняя плотность зоопланктона во все сезоны была выше в бухте, чем в открытом побережье. Отмечена тенденция к более высоким величинам плотности в срединной части бухты. Наибольший уровень различий таксономической структуры зоопланктона зарегистрирован между центрально-восточной частью бухты и открытым побережьем. Для летне-осеннего периода выявлено повышение разнообразия и, соответственно, степени сложности сообщества по направлению от восточной части бухты к открытому побережью. Наиболее низкий уровень разнообразия сообществ зафиксирован весной. Определено, что различия в таксономической структуре между сообществами сравниваемых акваторий весной обусловлены тремя, летом — девятью, осенью — пятью доминирующими таксонами, среди которых пять видов копепод (*Acartia clausi*, *Acartia tonsa*, *Centropages ponticus*, *Oithona davisae* и *Paracalanus parvus*), кладоцера *Penilia avirostris*, аппендикулярия *Oikopleura dioica*, личинки *Bivalvia* и *Cirripedia*, а также коловратки и жгутиконосец *Noctiluca scintillans*.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Структурно-функциональная организация, продуктивность и устойчивость морских пелагических экосистем» (№ гос. регистрации 121040600178-6).

Благодарность. Авторы выражают благодарность С. М. Игнатьеву и Д. А. Алтухову за помощь в сборе проб зоопланктона, а также анонимным рецензентам — за ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Алтухов Д. А., Губанова А. Д. *Oithona brevicornis* Giesbrecht в Севастопольской бухте в октябре 2005 – марте 2006 гг. // *Морской экологический журнал*. 2006. Т. 5, № 2. С. 32. [Altukhov D. A., Gubanova A. D. *Oithona brevicornis* Giesbrecht in the Sevastopol Bay in October, 2005 – March, 2006. *Morskoy ekologicheskij zhurnal*, 2006, vol. 5, no. 2, pp. 32. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/865>
- Беляева Н. В., Загородняя Ю. А. Зоопланктон Севастопольской бухты в 1981–1983 гг. // *Экология моря*. 1988. Вып. 29. С. 77–84. [Belyaeva N. V., Zagorodnyaya Yu. A. Zooplankton of the Sevastopol Bay in 1981–1983. *Ekologiya morya*, 1988, iss. 29, pp. 77–84. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/3844>
- Грезе В. Н., Балдина Э. П., Билева О. К. Динамика численности и продукции основных компонентов зоопланктона в неритической зоне Чёрного моря // *Биология моря*. 1971. Вып. 24. С. 12–49. [Greze V. N., Baldina E. P., Bileva O. K. Dinamika chislennosti i produktsii osnovnykh komponentov zooplanktona v neriticheskoi zone Chernogo morya. *Biologiya morya*, 1971, iss. 24, pp. 12–49. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1592>
- Губанов В. В., Губанова А. Д., Родионова Н. Ю. Диагноз трофности вод Севастопольской бухты и взморья г. Севастополя // *Актуальные проблемы аквакультуры в современный период*: материалы Международной научной конференции, Ростов-на-Дону, 28 сентября – 02 октября 2015 г. Ростов-на-Дону: ФГБНУ «АзНИИРХ», 2015. С. 64–66. [Gubanov V. V., Gubanova A. D., Rodionova N. Yu. Diagnosis of water trophicity in the Sevastopol Bay and its offshore. In: *Current Issues in Aquaculture*: proceedings of the International Scientific Conference, Rostov-on-Don, 28 September – 02 October, 2015. Rostov-on-Don: FGBNU “AzNIIRKh”, 2015, pp. 64–66. (in Russ.)]
- Губанова А. Д. *Acartia tonsa* Dana в Севастопольской бухте: появление, сезонная динамика, размерная структура // *Экология моря*. 2000. Вып. 51. С. 55–58. [Gubanova A. D. *Acartia tonsa* Dana in the Sevastopol Bay: Appearance, seasonal dynamic, size structure. *Ekologiya morya*, 2000, iss. 51, pp. 55–58. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/4299>

6. Губанова А. Д. Долговременные изменения видового состава и численности копепод рода *Acartia* Dana в Севастопольской бухте // *Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма (черноморский сектор)* / под ред. В. Н. Еремеева, А. В. Гаевской ; НАН Украины, Институт биологии южных морей. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. С. 94–104. [Gubanova A. D. Long-term changes in the specific composition and abundance of genera *Acartia* Dana copepod in the Sevastopol Bay. In: *Modern Condition of Biological Diversity in Near-shore Zone of Crimea (the Black Sea Sector)* / V. N. Eremeev, A. V. Gaevskaya (Eds) ; NAS Ukraine, Institute of Biology of the Southern Seas. Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2003, pp. 94–104. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1467>
7. Губанова А. Д., Алтухов Д. А., Попова Е. В., Гарбазей О. А. *Oithona davisae* – новый вид копепод в Чёрном море: многолетняя динамика, пространственное распространение, влияние на сообщество зоопланктона // *Морские биологические исследования: достижения и перспективы* : в 3 т. : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, приуроч. к 145-летию Севастопольской биологической станции, Севастополь, 19–24 сентября 2016 г. Севастополь, 2016. Т. 1. С. 154–157. [Gubanova A. D., Altukhov D. A., Popova E. V., Garbazey O. A. *Oithona davisae*, the new species of copepods in the Black Sea: Long-term dynamics, spatial distribution and impact on zooplankton community. In: *Morskie biologicheskie issledovaniya: dostizheniya i perspektivy* : v 3 t. : sb. materialov Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, priuroch. k 145-letiyu Sevastopol'skoi biologicheskoi stantsii, Sevastopol, 19–24 Sept., 2016. Sevastopol, 2016, vol. 1, pp. 154–157. (in Russ.)]
8. Губарева Е. С., Светличный Л. С., Романова З. А., Аболмасова Г. И., Аннинский Б. Е., Финенко Г. А., Бат Л., Кидейс А. Состояние зоопланктонного сообщества Севастопольской бухты после вселения гребневика *Beroe ovata* в Чёрном море (1999–2003 гг.) // *Морской экологический журнал*. 2004. Т. 3, № 1. С. 39–46. [Hubareva E. S., Svetlichny L. S., Romanova Z. A., Abolmasova G. I., Anninsky B. E., Finenko G. A., Bat L., Kideys A. Zooplankton community state in the Sevastopol Bay after the invasion of ctenophore *Beroe ovata* in the Black Sea (1999–2003). *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2004, vol. 3, no. 1, pp. 39–46. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/732>
9. Дацьк Н. А., Романова З. А., Финенко Г. А., Аболмасова Г. И., Аннинский Б. Е. Структура зоопланктонного сообщества в прибрежных водах Крыма (район Севастополя) и трофические отношения в пищевой цепи зоопланктон – мнемипсис в 2004–2008 гг. // *Морской экологический журнал*. 2012. Т. 11, № 2. С. 28–38. [Datsyk N. A., Romanova Z. A., Finenko G. A., Abolmasova G. I., Anninsky B. E. Zooplankton community structure in the inshore waters of the Crimean coasts (Sevastopol area) and trophic relations in the food chain zooplankton–*Mnemiopsis* in 2004–2008. *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2012, vol. 11, no. 2, pp. 28–38. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1210>
10. Загородняя Ю. А., Темных А. В., Морякова В. К. Сезонные изменения голопланктона в прибрежной зоне Чёрного моря в 2002 г. // *Морской экологический журнал*. 2007. Т. 6, № 1. С. 31–43. [Zagorodnyaya Yu. A., Temnykh A. V., Moryakova V. K. Holoplankton seasonal dynamics in inshore waters of the Black Sea in 2002. *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2007, vol. 6, no. 1, pp. 31–43. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/894>
11. Ковалев А. В. Сезонные изменения зоопланктона в Севастопольской бухте // *Гидробиологический журнал*. 1980. Т. 16, № 6. С. 9–14. [Kovalev A. V. Sezonnnye izmeneniya zooplanktona v Sevastopol'skoi bukhte. *Gidrobiologicheskii zhurnal*, 1980, vol. 16, no. 6, pp. 9–14. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/2866>
12. Лопухин А. С., Овсяный Е. И., Романов А. С., Ковардаков С. А., Сысоева И. В., Брянцева Ю. В., Рылькова О. А., Гаврилова Н. А., Губанов В. В., Лопухин С. А., Каменир Ю. Г., Гомис К., Вильсон Д. Г., Кемп Р. Б. Сезонные особенности гидролого-гидрохимической структуры вод Севастопольской бухты, микропланктон и распределение его биохимических компонент (Чёрное море, наблюдения

- 2004–2005 гг.) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2007. № 15. С. 74–109. [Lopukhin A. S., Ovsyany E. I., Romanov A. S., Kovardakov S. A., Sysyeva I. V., Bryantseva Yu. V., Ryl'kova O. A., Gavrilova N. A., Gubanov V. V., Lopukhin S. A., Kamenir Yu. G., Gomis C., Wilson J. G., Kemp R. B. Seasonal peculiarities of hydrologic-hydrochemical structure of Sevastopol Bay water, microplankton and distribution of its biochemical components (the Black Sea, observations of 2004–2005). *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zoni i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2007, no. 15, pp. 74–109. (in Russ.)]
13. Павлова Е. В., Овсяный Е. И., Гордина А. Д., Романов А. С., Кемп Р. Б. Современное состояние и тенденции изменения экосистемы Севастопольской бухты // *Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу* / под ред. Е. В. Павловой, Н. В. Шадрина. Севастополь : Аквавита, 1999. Гл. 2. С. 70–95. [Pavlova E. V., Ovsyany E. I., Gordina A. D., Romanov A. S., Kemp R. B. Modern state and tendencies of change in Sevastopol Bay ecosystem. In: *Akvatoriya i berega Sevastopolya: ekosistemnye protsessy i uslugi obshchestvu* / E. V. Pavlova, N. V. Shadrin (Eds). Sevastopol : Akvavita, 1999, chap. 2, pp. 70–95. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5248>
 14. Серёгин С. А., Попова Е. В. Многолетняя динамика численности копеподы-вселенца, *Oithona davisae*, в прибрежных водах Чёрного моря // *Российский журнал биологических инвазий*. 2016. Т. 9, № 3. С. 90–100. [Seregin S. A., Popova E. V. Long-term dynamics of abundance of the copepod-invader, *Oithona davisae*, in the coastal waters of the Black Sea. *Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii*, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 90–100. (in Russ.)]
 15. Темных А. В., Загородняя Ю. А., Морякова В. К. Пространственная изменчивость сезонной динамики зоопланктона в прибрежных водах Юго-Западного Крыма (по материалам 2002–2003 гг.) // *Экология моря*. 2008. Вып. 75. С. 23–30. [Temnykh A. V., Zagorodnyaya Yu. A., Moryakova V. K. Spatial variability of seasonal dynamics of zooplankton in coastal waters of southwestern Crimea in 2002 and 2003. *Ekologiya morya*, 2008, iss. 75, pp. 23–30. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/4795>
 16. Clarke K. R., Warwick R. M. *Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation*. 2nd ed. Plymouth : PRIMER-E Ltd., 2001, 171 p.
 17. Gubanov A. D., Polikarpov I. G., Saburova M. A., Prusova I. Yu. Long-term dynamics of mesozooplankton by the example of the Copepoda community in Sevastopol Bay (1976–1996). *Oceanology*, 2002, vol. 42, no. 4, pp. 512–520.
 18. Gubanov A. D., Garbazev O. A., Popova E. V., Altukhov D. A., Mukhanov V. S. *Oithona davisae*: Naturalization in the Black Sea, interannual and seasonal dynamics, and effect on the structure of the planktonic copepod community. *Oceanology*, 2019, vol. 59, no. 6, pp. 912–919. <https://doi.org/10.1134/S0001437019060079>
 19. Gubanov A., Drapun I., Garbazev O., Krivenko O., Vodiasova E. *Pseudodiaptomus marinus* Sato, 1913 in the Black Sea: Morphology, genetic analysis, and variability in seasonal and interannual abundance. *PeerJ*, 2020, vol. 8, art. no. e10153 (26 p.). <https://doi.org/10.7717/peerj.10153>

SPATIAL-TEMPORAL DYNAMICS OF THE ZOOPLANKTON ASSEMBLAGE STRUCTURE IN COASTAL WATERS NEAR SEVASTOPOL IN THE SPRING–AUTUMN PERIOD

E. A. Galagovets and I. Yu. Prusova

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: didobe@mail.ru

Zooplankton of the coastal water area near Sevastopol are quite well studied. However, there are few comprehensive investigations of local zooplankton assemblages involving the characterization of all the taxa forming them. Moreover, previous research was mainly based on material sampled in the Sevastopol Bay at only one or two stations – at the bay mouth and/or in its apex, and there was

no analysis of zooplankton spatial variability within the bay. The aim of this work is to characterize the spatial-temporal dynamics of zooplankton communities in the Sevastopol Bay and the adjacent open coastal waters in the spring–autumn 2013. We analyzed zooplankton sampled in April–November 2013 in the western, central, and eastern Sevastopol Bay, as well as at three stations in the adjacent open coastal area: two miles from the Sevastopol Bay mouth, near the Uchkuevka village, and at the Kruglaya Bay mouth. To assess spatial-temporal differences in the taxonomic structure of zooplankton assemblages, we applied analysis of similarities (ANOSIM), used nonparametric multidimensional scaling (MDS), and determined the contribution of individual taxa to the Bray–Curtis dissimilarity between sample groups (SIMPER). When analyzing beta diversity, the Shannon index was applied. As revealed, during the study period, there were spatial-temporal differences in the abundance and taxonomic structure of zooplankton communities between various areas of the Sevastopol Bay and the adjacent open coastal waters. The highest degree of dissimilarity in the taxonomic structure of zooplankton was recorded between the central–eastern bay and the open coastal area. When comparing assemblages of these water areas, R values (ANOSIM) were 0.926, 0.572, and 0.761 ($p < 0.03$) in spring, summer, and autumn, respectively. The mean total abundance of zooplankton in the bay in all seasons was higher than in the open coastal water area: (5.3 ± 1.9) , (16.3 ± 2.7) , and (8.3 ± 1.4) thousand ind. $\cdot\text{m}^{-3}$ vs. (0.8 ± 0.3) , (4.6 ± 1.2) , and (3.4 ± 1.3) thousand ind. $\cdot\text{m}^{-3}$ in spring, summer, and autumn, respectively (mean \pm SE; $p < 0.006$). There was a tendency towards higher density values in the central Sevastopol Bay. A change in the level of diversity and, accordingly, in the degree of complexity of zooplankton assemblage was revealed in the spatial-temporal aspect. In spring, the lowest level of diversity was registered, with a mean (\pm SE) value of the Shannon index H' of 1.09 ± 0.16 . In summer and autumn, the values increased to 1.94 ± 0.11 and 1.48 ± 0.09 , respectively. In summer–autumn period, the values of H' were higher in the open coastal area (2.07 ± 0.09) and lower in the inner water area (1.53 ± 0.09). As determined, the differences in the taxonomic structure between the communities of the compared water areas were driven by three dominant taxa in spring, nine in summer, and five in autumn.

Keywords: zooplankton, copepods, taxonomic structure, diversity, Sevastopol Bay

УДК [502.175:504.5](265.54.04)

**ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО
В ЭКОСИСТЕМЕ ЗАЛИВА ВЛАДИМИРА (ЯПОНСКОЕ МОРЕ):
РЕСУРС ПИТАНИЯ И ВОЗМОЖНЫЙ ФАКТОР ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА**

© 2023 г. Ю. А. Гальшева, А. Д. Пелех, Т. В. Бойченко, О. В. Нестерова, А. Н. Яковлева

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация
E-mail: galysheva.yua@dvfu.ru

Поступила в редакцию 09.12.2021; после доработки 06.04.2022;
принята к публикации 16.02.2023; опубликована онлайн 31.05.2023.

Исследование содержания органического вещества в водной среде и донных отложениях крайне важно для понимания аккумуляционного процесса в отношении поступающих в среду акватории токсических веществ и элементов, а также выявления негативных изменений в экосистеме и потенциальных экологических рисков при осуществлении природопользования. Цель работы — проанализировать значение органического вещества как фактора контаминации среды залива Владимира (Японское море) и оценить токсичность гидробионтов и экологический риск для экосистемы и здоровья человека. Комплексная работа выполнена с применением химико-аналитических, микробиологических и гидробиологических методов; она включает математическую и картографическую обработку данных и расчёт коэффициентов загрязнения и экологического риска. Проведён анализ проб морской воды, донных отложений и макробентоса, отобранных в заливе Владимира в июле 2014 г. Определены химико-экологические и микробиологические параметры вод залива, позволяющие оценить процессы накопления органического вещества в водной среде и донных отложениях и установить трофический статус экосистемы в летний период. Выявлены массовые виды и группы макробентоса, определены показатели обилия донного населения, свидетельствующие о высоких уровнях биомассы. Установлена численность металлрезистентных групп бактерий в поверхностных водах. Оценено содержание и пространственное распределение тяжёлых металлов (ТМ) в донных отложениях. Установлены концентрации ТМ в гонадах морских ежей. Результаты микробиологической оценки соотнесены с ПДК; они выявляют значительное загрязнение вод залива (более 3 ПДК) в отношении Cd. Для Ni, Cu, Zn и Cd в донных отложениях обнаружено превышение фоновых концентраций, для Cd и Zn — превышение кларковых значений. Проверена корреляционная связь концентраций органического вещества в донных отложениях с содержанием в них ТМ, а также связь концентраций ТМ в грунтах и гонадах морских ежей (значимая корреляция выявлена в отношении Zn). Для донных отложений определены фактор загрязнения C_f , характеризующий их загрязнение в заливе цинком как высокое, а кадмием и медью — как очень высокое, а также степень загрязнения C_d , свидетельствующая о среднем уровне загрязнения донных осадков в целом. Проведён расчёт индексов экологического риска. По величине SQG-Q грунты залива отнесены к категории умеренно токсичных. Установлено: согласно нормативам Технического регламента Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» 021/2011, содержание Cd и Pb в гонадах морских ежей из залива Владимира не превышает допустимых уровней, однако по значению ILCR (индекс нарастающего пожизненного риска) можно сделать прогноз об опасности возникновения онкологических заболеваний при употреблении гонад в пищу.

Ключевые слова: залив Владимира, Японское море, органическое вещество, трофность, донные отложения, макробентос, тяжёлые металлы, коэффициенты накопления, экологический риск, риск здоровью человека

Высокие концентрации органического вещества (далее — ОВ) в морских экосистемах нередко являются результатом действия природных процессов. В частности, ОВ аккумулируются в «бухтах-ловушках» — глубоко врезаемых в побережье акваториях с относительно узким входом и ограниченным или специфическим водообменом. Подобные акватории являются накопителями ОВ — пищевого ресурса, определяющего в целом трофический статус среды в экосистеме. Морские экосистемы, имеющие высокий трофический статус и характеризующиеся обилием различных экотопов, — это важнейшие районы для развития марикультуры и рационального использования природных популяций, а также зоны естественного формирования и сохранения биоразнообразия.

Накопление органики в морской экосистеме оказывает выраженный положительный эффект до определённого уровня значений растворённого в воде и аккумулированного в донных отложениях ОВ, после которого возникают отрицательные последствия. Кроме более выраженного и краткосрочно проявляющегося эвтрофирования, происходит менее заметная и более растянутая во времени аккумуляция поступающих в бухту или залив токсических веществ и элементов. Особенно значим этот эффект для донных отложений. Процессы преобразования и деструкции ОВ на границе донных отложений и водной толщи и в осадках являются основной причиной как мобилизации тяжёлых металлов (далее — ТМ) в поровые и придонные воды, так и связывания элементов [Шулькин, 2004; Zhang et al., 2014]. Попадая в толщу воды, ТМ вызывают её вторичное загрязнение и далее накапливаются по пищевым цепям в организмах. Изучение миграции элементов в различных компонентах экосистемы занимает важное место в токсикологических исследованиях, позволяя оценить токсические эффекты для организмов разных трофических уровней [Ващенко и др., 2010; Saroop, Tamchos, 2021] и риски для здоровья человека [Донец и др., 2020; Birch, 2011].

Залив Владимира расположен на восточном побережье Приморского края и является собой глубоко врезаемую в берег акваторию с относительно узким входом. Глубина в центральных частях бухт превышает 20 м, а на входе в залив составляет 40 м. Течения в заливе обусловлены главным образом ветро-волновыми процессами. Влияние Приморского течения несущественно вследствие закрытости акватории залива. Течения, формируемые речным потоком, не образуются по причине отсутствия полноводных рек, впадающих в залив. Антропогенное влияние на данную акваторию началось в 1907 г. с появлением первого населённого пункта — Весёлый Яр. Позднее, в связи с размещением на побережье залива военных объектов, возникли посёлки Тимофеевка (1932 г.), Норд-Ост и Ракушка (1934 г.). В акватории залива с 1934 по 1999 г. располагалась Владимиро-Ольгинская военно-морская база Тихоокеанского флота (ныне она расформирована).

Немногочисленные морские биологические исследования залива Владимира касаются отдельных промысловых видов макробентоса [Гаврилова и др., 2006; Кулепанов, Иванова, 2006] и некоторых инвазивных видов [Лутаенко, Колпаков, 2016]. Состав, обилие и распределение макробентоса описаны авторами [Гальшева и др., 2018]. Выпущены работы по анализу неогеновых отложений [Ващенко, Цой, 2014] и по перспективе развития марикультуры [Гаврилова и др., 2019]. Материалы о гидрохимических и микробиологических исследованиях другими коллективами не опубликованы. Работы комплексного характера выполнены не были.

Цель данной работы — проанализировать уровень органического вещества как возможного фактора формирования токсичности среды залива Владимира, оценить контаминацию гидробионтов и экологический риск для экосистемы и здоровья человека.

Задачи исследования: 1) проанализировать содержание ОВ в водной среде по химическим и микробиологическим показателям и оценить трофический статус акватории; 2) определить гранулометрический состав донных отложений и содержание в них ОВ; 3) оценить состав и обилие

организмов макробентоса; 4) оценить содержание тяжёлых металлов в компонентах среды и организмах макробентоса; 5) проанализировать взаимосвязь ОБ с накоплением ТМ в донных отложениях залива, а также оценить экологический риск для обитающих в нём организмов и токсикологический риск при употреблении их в пищу человеком.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Отбор проб. Материалом для работы послужили данные анализа проб морской воды, донных отложений и макробентоса, отобранных в заливе Владимира (Японское море) (рис. 1) в июле 2014 г., а также авторские сведения о других акваториях Приморского края [Галышева, 2010]. Всего выполнено 17 комплексных станций, охватывающих разные районы залива до глубины 25 м (ограничение по глубине связано с водолазными спусками). Гидрохимические пробы, донные отложения и макробентос отобраны на всей сетке станций. Пробы воды на микробиологический анализ (в связи с ограниченной возможностью обеспечения стерильности проведения посевов в полевых условиях) отобраны на выборочных станциях (ст. 2, 4, 5, 8, 11–14), охватывающих все бухты залива, и на контрольной станции (К) за его пределами. Морской ёж *Strongylocentrotus intermedius* (A. Agassiz, 1864) выбран в качестве биоиндикатора по следующим критериям: высокая биомасса и частота встречаемости этого вида в заливе, чувствительность к воздействию различных токсикантов, в том числе ТМ, на всех этапах жизненного цикла, употребление гонад в пищу человеком [Ващенко и др., 2005]. Особи морских ежей отобраны на ст. 2, 7, 10–12 и 14 из общих количественных проб макробентоса. Всего проанализировано 26 проб поверхностной воды (17 — на гидрохимические показатели; 9 — на микробиологические параметры), 17 проб донных отложений, 102 количественных пробы макробентоса и 18 проб гонад морских ежей. При проведении химико-экологического и микробиологического анализа для каждой пробы соблюдена трёхкратность повтора измерения каждого показателя (табл. 1). Макробентос отобран по шесть проб с каждой станции. Первичный анализ произведён в условиях полевой лаборатории; конечный — в лабораториях международной кафедры ЮНЕСКО «Морская экология» и кафедры почвоведения Института Мирового океана (Школы) Дальневосточного федерального университета (ИМО ДВФУ).

Гидрохимический анализ. Пробы морской воды отобраны из поверхностного 50-см слоя согласно «Руководству по химическому анализу морских и пресных вод» [2003]. Определение растворённого в воде кислорода и величины БПК₅ осуществляли по методу Винклера. Перманганатную окисляемость определяли методом Скопинцева. Для определения двух форм фосфора (органического и минерального) применяли метод Морфи — Райли [Руководство по химическому анализу, 2003]. Анализ выполнен в день отбора в трёх повторностях для каждого показателя.



Рис. 1. Карта-схема отбора проб в заливе Владимира

Fig. 1. The map of sampling in the Vladimir Bay

Таблица 1. Объём фактического материала при проведении химико-экологической и микробиологической оценки**Table 1.** Amount of factual material for chemical, ecological, and microbiological assessment

Характер пробы	Поверхностные воды для гидрохимического анализа	Поверхностные воды для микробиологического анализа	Донные отложения	Морские ежи
Количество проб	17	9	17	18
Параметры оценки	РК, БПК ₅ , ПО, Р _{общ} , Р _{мин} , Р _{орг} (6 параметров)	КГМ, группы бактерий, резистентные к ионам тяжёлых металлов — Cu, Cd, Ni, Co, Zn, Pb (7 параметров)	Грансостав, ОВ, Cu, Cd, Ni, Zn, Pb, Fe, Cr (9 параметров)	Cu, Cd, Ni, Zn, Pb, Cr (6 параметров)
Количество определенных параметров	306	189	459	324

Примечание: сокращения в названиях параметров приведены ниже по тексту — в разделах, описывающих разные виды анализа.

Note: abbreviations for the parameter names are given below in the text – in the sections describing different types of analysis.

Микробиологический анализ. Отбор проб производили из поверхностного слоя воды в стерильные пластиковые ёмкости. Пробы перевозили в полевую лабораторию и анализировали в день отбора, с соблюдением сроков хранения и транспортировки по ГОСТ 31861-2012 и ГОСТ 31942-2012. Численность колоний гетеротрофных микроорганизмов (далее — КГМ) в 1 мл воды определяли на основе чашечного метода Коха на среде для морских микроорганизмов (СММ) с добавлением 1,5 % агара [Yoshimizu, Kimura, 1976]. Количество металлрезистентных форм в сообществе КГМ определяли чашечным методом, используя СММ с добавками солей металлов в концентрациях, ингибирующих рост чувствительных форм бактерий. В качестве добавок применяли хлориды металлов (Zn, Cu, Cd, Ni и Co) и нитрат свинца [Безвербная и др., 2003]. Проверку на резистентность осуществляли для каждой токсичной добавки (поэлементно) для всех отобранных проб (в трёх повторностях).

Гранулометрический анализ донных отложений. Размер частиц поверхностных донных осадков определяли механически (ГОСТ 12536-79), количество наиболее тонких фракций в пробах с преобладанием ила — пипеточным методом [Качинский, 1958]. Тип осадков определяли по доминирующей фракции.

Анализ содержания органического вещества в донных отложениях. Общее содержание органического углерода (С_{орг}) определено по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91).

Оценка состава и количественных показателей макробентоса. Отбор производили с привлечением легководолазов, с борта моторного катера в горизонте верхней сублиторали (3–27 м). На каждой станции собирали эпибентос (применяли гидробиологическую рамку площадью 1 м²) и инфауну (использовали водолазный зубчатый дночерпатель с площадью захвата 0,025 м²). Соблюдали трёхкратную повторность отбора проб каждым орудием сбора. Всего отобрано 102 пробы. Первичную обработку производили в условиях полевой лаборатории. Неидентифицированные виды животных фиксировали 4%-ным раствором формальдегида, растения закладывали в гербарий, каждому виду присваивали шифр. Дальнейшую идентификацию проводили в лабораториях ИМО ДВФУ, дополняли данные первичной обработки. Все показатели приведены к 1 м².

Анализ содержания тяжёлых металлов в донных отложениях и гидробионтах.

В донных отложениях определяли валовое содержание Fe, Cd, Ni, Cr, Cu, Zn и Pb. Донные осадки из пробы обрабатывали смесью хлористоводородной, фтористоводородной, хлорной и азотной кислот с последующим определением валового содержания элементов методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) (ПНД Ф 16.1:2.2:2.3.36-02) на атомно-адсорбционном спектрофотометре Shimadzu AA-6800 (Япония).

Морского ежа *S. intermedius* в количестве не менее трёх особей со станции отбирали из каждой пробы макробентоса, в которой он встречался. Всего отобрано 18 экземпляров. Гонады предварительно сушили в сушильном шкафу при температуре +85 °С, измельчали; далее отбирали навески массой 0,40–0,50 г, высушивали до постоянной массы и подвергали кислотному разложению концентрированной азотной кислотой ОСЧ, затем переводили в 2%-ный азотнокислый раствор. Содержание ТМ (Zn, Cu, Pb, Cr, Cd и Ni) определяли методом ААС на приборе Shimadzu AA-6800. Точность определения концентраций металлов контролировали, анализируя стандартные образцы (NIST 2976). Ошибка определения не превышала 15 %.

Расчёт индексов загрязнения и индексов экологического риска. Индексы загрязнения донных осадков тяжёлыми металлами (фактор загрязнения C_f и степень загрязнения C_d) рассчитывали в соответствии с алгоритмом, предложенным Хакансоном [Hakanson, 1980] и успешно опробованным в разных акваториях [Ващенко и др., 2010; Chakraborty et al., 2014; Liang et al., 2018; Saroop, Tamchos, 2021 и др.]:

$$C_f = C/C_{\phi}, \quad (1)$$

$$C_d = \sum C_f, \quad (2)$$

где C — средняя концентрация вещества в донных отложениях;

C_{ϕ} — фоновая концентрация этого вещества в донных отложениях [Шулькин, 2004].

Интегральная оценка потенциальной токсичности донных осадков залива Владимира проведена с помощью индекса экологического риска (sediment quality guideline quotient, SQG-Q) [Ващенко и др., 2010; Birch, 2011; MacDonald et al., 1996 и др.]. Индекс позволяет охарактеризовать токсичность накопленных загрязняющих веществ для морских организмов в абиотических компонентах исследуемого биотопа и определяется по формуле:

$$SQG - Q = \sum PEL - Q/n, \quad (3)$$

где $\sum PEL - Q$ — отношение средней концентрации токсиканта в осадках к величине уровня вероятного воздействия PEL (probable effect level) для этого же токсиканта [MacDonald et al., 1996];

n — количество токсикантов.

Для определения величины индивидуального канцерогенного риска при воздействии беспороговых токсикантов применяли калькулятор, рассчитывающий ILCR (incremental lifetime cancer risk) (<http://www.popstoolkit.com/tools/HHRA/Carcinogen.aspx>). Этот коэффициент, широко используемый в Канаде и США, оценивает нарастающий пожизненный риск возникновения рака при потреблении продукции в течение определённого периода времени.

Картографическая и статистическая обработка данных. Построение карт распределения содержания ОБ и ТМ в донных отложениях осуществляли методом интерполяции kriging (кригинг) в пакете компьютерных программ Surfer (Golden Software). Окончательное оформление картографического материала выполнено в программе QGIS на основе оцифровки растровых топографических карт исследуемой территории, которые находятся в свободном доступе.

Для определения тесноты связи между исследуемыми параметрами использовали коэффициент корреляции Пирсона, оценку трендов линейной аппроксимации и величину достоверности аппроксимации R^2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экологическая оценка водной среды. О благополучии природных вод и о количестве в них ОВ позволяют судить показатели содержания растворённого в воде кислорода (далее — РК), а также величины БПК₅, перманганатной окисляемости (далее — ПО) и концентрации $P_{орг}$. Содержание РК зависит от двух групп процессов: одни увеличивают его концентрацию (выделение в процессе фотосинтеза и адсорбция из атмосферы), другие — уменьшают (потребление на окисление органических веществ). По количеству РК делают выводы об интенсивности протекания процессов самоочищения в водоёмах и окисления растворённого ОВ [Христофорова и др., 2015]. Химико-экологический контроль состояния залива Владимира показал достаточное содержание РК в его поверхностных водах и отсутствие районов, имеющих значение ниже летней нормы, 6 мг $O_2 \cdot л^{-1}$ [Приказ Минсельхоза России № 552, 2016]. Среднее значение составило 8,79 мг $O_2 \cdot л^{-1}$, минимальное — 7,22 мг $O_2 \cdot л^{-1}$ (табл. 2).

Таблица 2. Гидрохимические показатели и трофический статус поверхностных вод залива Владимира (среднее $\pm SD$)

Table 2. Hydrochemical parameters and trophic status of the Vladimir Bay surface waters (mean $\pm SD$)

Ст.	Температура, °С	РК, мг $O_2 \cdot л^{-1}$	БПК ₅ , мг $O_2 \cdot л^{-1}$	ПО, мг $O \cdot л^{-1}$	$P_{мин}$, мкг $\cdot л^{-1}$	$P_{орг}$, мкг $\cdot л^{-1}$	$P_{общ}$, мкг $\cdot л^{-1}$	Троф. статус
1	+21,4	9,06 \pm 0,04	1,04 \pm 0,05	1,12 \pm 0,02	27,78 \pm 0,36	256,69 \pm 6,72	284,47 \pm 1,89	О
2	+20,5	8,42 \pm 0,07	1,13 \pm 0,05	1,12 \pm 0,07	109,12 \pm 8,64	44,34 \pm 1,16	153,46 \pm 10,03	М
3	+20,7	8,69 \pm 0,22	1,46 \pm 0,05	1,44 \pm 0,28	13,89 \pm 1,44	809,57 \pm 67,76	823,46 \pm 67,76	О
4	+22,2	9,10 \pm 0,18	1,80 \pm 0,11	1,60 \pm 0,07	75,39 \pm 0,19	516,00 \pm 32,89	591,39 \pm 12,05	М
5	+22,3	8,90 \pm 0,07	1,43 \pm 0,06	2,08 \pm 0,04	61,50 \pm 1,49	230,45 \pm 12,81	291,95 \pm 16,30	М
6	+22,1	8,54 \pm 0,28	0,81 \pm 0,29	1,36 \pm 0,18	93,25 \pm 3,80	22,13 \pm 9,52	115,38 \pm 2,50	М
7	+21,2	8,93 \pm 0,11	1,37 \pm 0,16	1,76 \pm 0,09	23,81 \pm 6,46	5,09 \pm 0,06	28,09 \pm 1,09	О
8	+21,0	8,98 \pm 0,08	1,51 \pm 0,23	3,52 \pm 0,22	43,65 \pm 6,08	87,36 \pm 14,81	131,01 \pm 5,95	О
9	+21,4	9,23 \pm 0,12	1,27 \pm 0,12	1,92 \pm 0,10	53,57 \pm 9,94	489,17 \pm 21,27	542,74 \pm 22,76	М
10	+20,8	8,84 \pm 0,14	1,46 \pm 0,10	0,16 \pm 0,10	51,58 \pm 8,56	71,94 \pm 10,24	123,52 \pm 10,19	М
11	+19,0	9,19 \pm 0,16	2,24 \pm 0,11	3,36 \pm 0,15	69,44 \pm 13,25	42,85 \pm 7,63	112,29 \pm 5,62	М
12	+19,0	9,26 \pm 0,35	1,38 \pm 0,2	1,36 \pm 0,14	71,42 \pm 5,53	190,59 \pm 12,6	262,01 \pm 12,24	М
13	+21,0	8,77 \pm 0,40	1,32 \pm 0,11	3,60 \pm 0,51	39,68 \pm 5,01	8,98 \pm 0,11	48,66 \pm 5,12	О

Продолжение на следующей странице...

Ст.	Температура, °С	РК, мг О ₂ ·л ⁻¹	БПК ₅ , мг О ₂ ·л ⁻¹	ПО, мг О·л ⁻¹	Р _{мин} , мкг·л ⁻¹	Р _{орг} , мкг·л ⁻¹	Р _{общ} , мкг·л ⁻¹	Троф. статус
14	+19,9	7,22 ± 0,26	0,34 ± 0,02	2,24 ± 0,09	41,66 ± 4,01	194,15 ± 13,44	235,81 ± 17,65	О
15	+19,8	8,82 ± 0,15	1,02 ± 0,19	1,28 ± 0,26	63,49 ± 11,13	45,06 ± 16,96	108,55 ± 23,11	М
16	+20,2	8,48 ± 0,44	2,71 ± 0,20	2,88 ± 0,15	21,82 ± 2,01	15,61 ± 3,18	36,98 ± 4,80	О
17	+19,1	8,50 ± 0,34	3,90 ± 0,43	2,56 ± 0,08	31,74 ± 5,37	192,84 ± 17,95	224,58 ± 14,82	О

Примечание: М — мезотрофный; О — олиготрофный. Жирным выделены значения концентрации минеральных соединений фосфора для станций мезотрофного статуса.

Note: M, mesotrophic; O, oligotrophic. The values of the concentration of mineral phosphorus compounds for the stations with mesotrophic status are highlighted in bold.

БПК₅ свидетельствует о наличии в воде легкоокисляемой органики, чаще всего являющейся продуктами жизнедеятельности гидробионтов либо поступающей с коммунально-бытовыми стоками. Уровни БПК₅ на большинстве станций соответствовали норме, 2,1 мг О₂·л⁻¹ [Приказ Минсельхоза России № 552, 2016], изменяясь в диапазоне от 0,34 до 1,80 мг О₂·л⁻¹. Лишь на трёх станциях (ст. 11, 16 и 17) значения биохимического потребления кислорода превышали норматив и составляли 2,24; 2,71 и 3,90 мг О₂·л⁻¹ соответственно.

ПО отражает содержание в воде трудноокисляемых веществ (продукты распада отмерших организмов, а также поступающие с поверхностным смывом и со стоками масла, мазут и другие углеводороды). Для наиболее чистых вод значения ПО, как правило, не превышают 3–5 мг О·л⁻¹ и могут варьировать в зависимости от сезона [Христофорова и др., 2015]. ПО изменялась в диапазоне от 0,16 до 3,60 мг О·л⁻¹, достигая максимума на ст. 13. Для рыбохозяйственных водоёмов в настоящее время величина ПО не нормирована.

Фосфор является одним из элементов, определяющих продуктивность природных вод. Концентрация его органических (Р_{орг}) и минеральных (Р_{мин}) соединений — важная составляющая баланса ОВ в водной среде. Летние значения суммарных концентраций соединений фосфора (Р_{общ}) в период исследований были высокими. На 50 % обследованных станций они превышали 200 мкг·л⁻¹. Вклад органических и минеральных форм фосфора в суммарное его содержание различен: для 8 станций, на которых выявлены значения Р_{общ}, превышающие 200 мкг·л⁻¹, характерно преобладание его органических соединений с концентрациями свыше 100 мкг·л⁻¹. Максимум в 809,57 мкг·л⁻¹ зарегистрирован в бухте Южная, на ст. 6. Согласно нормативам качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения [Приказ Минсельхоза России № 552, 2016], по концентрации фосфат-ионов (Р_{мин}) можно судить о трофическом статусе: до 50 мкг·л⁻¹ фосфатов содержится в олиготрофных водах; 50–150 мкг·л⁻¹ — в мезотрофных (в табл. 2 выделены жирным); свыше 200 мкг·л⁻¹ — в эвтрофных. Эвтрофных значений не обнаружено; соотношение станций олиготрофного и мезотрофного статуса — приблизительно 1 : 1 (см. табл. 2).

КГМ — микробиологический показатель общего уровня ОВ в водной среде, который свидетельствует о качестве вод морской экосистемы, позволяет ранжировать уровень содержания органики в среде и классифицировать загрязнение. Согласно шкале сапробности, воды с численностью КГМ до 10³ кл·мл⁻¹ относятся к олигосапробным; до 10⁵ кл·мл⁻¹ — к мезосапробным (с подразделением на категории более мелкого ранга); с численностью 10⁶ кл·мл⁻¹ и выше — к полисапробным [Общая и санитарная микробиология, 2004]. Эколого-бактериологическая оценка поверхностных вод выявила равномерное распределение численности КГМ на уровне 10³ КОЕ·мл⁻¹

в поверхностном слое (табл. 3), что позволяет характеризовать воды как α -мезосапробные, то есть обогащённые ОВ. Контрольная точка за пределами залива показала такой же уровень гетеротрофных бактерий.

Таблица 3. Распределение численности колониеобразующих гетеротрофных организмов (КГМ) в поверхностных водах залива Владимира

Table 3. Abundance of colony-forming heterotrophic microorganisms (КГМ) in the Vladimir Bay surface waters

Станция	2	4	5	8	11	12	13	14	Контроль (К)
КГМ ($\times 10^3$ КОЕ.мл ⁻¹)	1,5	5,3	7,2	1,2	1,5	5,2	3,8	7,3	4,5

Органическое вещество в донных отложениях. Содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в мягких грунтах варьировало от 0,11 до 3,64 % на 100 г сухой массы пробы. Минимальные значения отмечены в галечниках (псефит мелкогалечный) и песках (псаммит мелкий) наиболее мелководных станций (глубина 3–5 м), максимальные — в илах (алевролиты) на глубине 10, 15, 20, 25 м (рис. 2, табл. 4, 5).

Пространственное распределение значений $C_{\text{орг}}$ в поверхностном слое донных осадков залива имеет характерное проявление и обусловлено совокупностью факторов: удалённостью от береговой линии, рельефом дна, интенсивностью гидродинамики и седиментогенеза, гранулометрическим составом донных осадков. Максимумы приурочены к центральным частям бухт Северная и Южная и к кутовой части бухты Средняя, то есть к зонам аккумуляции с преобладанием алевроитовых фракций и с наименьшей динамикой воды, в которых происходит активная седиментация как мелких остатков организмов, так и взвешенного и растворённого в воде ОВ.

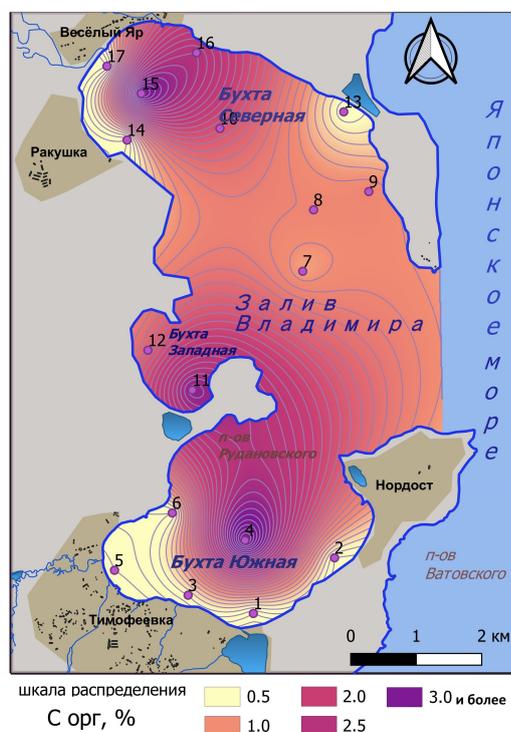


Рис. 2. Карта распределения содержания органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в донных отложениях залива Владимира

Fig. 2. Map of organic carbon ($C_{\text{орг}}$) distribution in the Vladimir Bay bottom sediments

Таблица 4. Гранулометрический состав донных отложений залива Владимира (исключая илистые фракции)**Table 4.** Granulometric composition of the Vladimir Bay bottom sediments (excluding silt fractions)

Ст.	Глубина, м	Содержание фракций грунта (мм), %								Тип грунта
		> 10	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	< 0,1	
1	3	0	0,5	0,5	0,3	0,6	21	67,3	8,9	Псаммит мелкий
2	3	0	0	0,7	0,7	0,5	38,3	59,7	0,1	Псаммит мелкий
3	3	0	0	2,1	2,8	3,3	24,1	50,8	16,1	Псаммит мелкий
5	4	0	0	3,7	5,7	5,7	26,5	55,5	2,9	Псаммит мелкий
6	6	0	0	2,5	12,3	17,3	39,5	26,6	1,8	Псаммит крупный
8	27	0	0	0,9	0,6	1,3	17,8	75	3,7	Псаммит мелкий
9	5	0	0	0,8	1,2	3	24,7	66,5	3	Псаммит мелкий
10	20	39,8	2,1	4,4	5,9	5,1	14,3	26,1	2,3	Псефит мелкогалечный
13	5	0	0	1,6	1,8	1,6	4	83,3	6,8	Псаммит мелкий
14	5	68,5	0	4,6	8	6,5	8,1	2,8	1,5	Псефит мелкогалечный
17	5	0	0	0,6	4,3	8,8	23,8	56,9	4,8	Псаммит мелкий

Таблица 5. Гранулометрический состав илистых фракций донных отложений залива Владимира**Table 5.** Granulometric composition of silt fractions of the Vladimir Bay bottom sediments

Ст.	Глубина, м	Содержание фракций грунта (мм), %						Сумма частиц		Тип грунта
		1,00–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	< 0,01	> 0,01	
4	21	1	36	30	18	4	11	33	67	Алеврит пелитовый
7	24	30	43	11	4	7	5	16	84	Псаммит мелкий
11	5	1	12	50	18	10	9	37	63	Алеврит псаммитовый
12	10	1	66	20	7	2	4	13	87	Алеврит псаммитовый
15	18	1	15	59	13	7	5	25	75	Алеврит пелитовый
16	7	1	28	61	3	2	5	10	90	Алеврит псаммитовый

Характеристики макробентоса. Идентифицированы 15 таксонов макробентоса наивысшего ранга — 11 типов морских животных (Porifera, Cnidaria, Nemertea, Annelida, Sipuncula, Arthropoda, Mollusca, Brachiopoda, Bryozoa, Echinodermata и Chordata) и 4 отдела растений (Rhodophyta, Ochrophyta, Chlorophyta и Tracheophyta). Общее видовое богатство макробентоса сублиторали залива Владимира — не менее 63 видов (45 видов беспозвоночных и 18 видов растений). Наибольшее видовое богатство отмечено в классах Florideophyceae, Gastropoda, Bivalvia, Malacostraca, Polychaeta, Phaeophyceae и Asteroidea.

Средняя биомасса макробентоса на станциях варьировала от 40,7 до 2442,3 г·м⁻². Минимальное значение выявлено на ст. 4, в центральной части бухты Южная, где обнаружены один вид двустворчатых моллюсков и один вид полихет. На 30 % станций средняя биомасса достигала 500 г·м⁻², остальные характеризовались высокими значениями (от 500 г·м⁻² до максимальных). Таким образом, общий фон значений биомассы можно назвать выравненно высоким. Средние значения биомассы для залива Владимира сходны с таковыми залива Восток (табл. 6).

К доминирующим видам макрозообентоса со средней биомассой на станции более 100 г·м⁻² относятся типичные виды Японского моря: морской ёж *S. intermedius* (частота встречаемости — 44 %); морская звезда *Asterina pectinifera* (Muller & Troschel, 1842) (36 %);

двустворчатые моллюски *Mizuhopecten yessoensis* (Jay, 1857) (12 %), *Crenomytilus grayanus* (Dunker, 1853) (8 %) и *Pododesmus macrochisma* (Deshayes, 1839) (4 %); голотурия *Cicutaria japonica* Semper, 1868 (4 %). В макрофитобентосе доминируют бурые водоросли *Desmarestia viridis* (O. F. Müller) J. V. Lamouroux, 1813 (24 %), *Costaria costata* (C. Agardh) De A. Saunders, 1895 (16 %) и *Saccharina japonica* (Areschoug) C. E. Lane, C. Mayes, L. D. Druehl & G. W. Saunders, 2006 (12 %), а также морские травы *Zostera marina* Linnaeus, 1753 (16 %) и *Phyllospadix iwatensis* Makino, 1931 (12 %).

Таблица 6. Значения средней биомассы и плотности поселения макробентоса в разных акваториях морского побережья Приморского края

Table 6. The values of mean biomass and abundance of macrobenthos in different water areas off the Primorsky Krai marine coast

Район	Средняя биомасса \pm SD, г·м ⁻²	Средняя плотность поселения \pm SD, экз·м ⁻²
Бухта Удобная	4523,9 \pm 9324,2	108,5 \pm 90,3
Бухта Киевка	1634,9 \pm 954,5	159,1 \pm 124,6
Бухта Рудная	1173,5 \pm 1268,6	77,0 \pm 54,4
Залив Находка (исключая бухту Находка)	1014,9 \pm 825,2	250,6 \pm 365,4
Залив Восток	864,5 \pm 662,0	170,2 \pm 762,0
Залив Владимира	841,2 \pm 583,0	57,4 \pm 12,3
Бухта Троицы	473,7 \pm 627,1	93,7 \pm 80,4
Бухта Золотой Рог	204,2 \pm 50,1	115,0 \pm 4,9

Примечание: SD — среднее отклонение. Данные по всем акваториям, кроме залива Владимира, приведены по [Гальшева и др., 2018].

Note: SD is standard deviation. The data on all the water areas, except for the Vladimir Bay, are given according to [Galysheva et al., 2018].

Тяжёлые металлы в среде. Уровень содержания ТМ в поверхностных водах определён по численности металлрезистентных микроорганизмов, которые в силу своей исключительной специфичности позволяют довольно точно оценить загрязнение среды этими элементами [Безвербная и др., 2003; Калитина и др., 2015]. В целом наименее распространённой группой оказались свинецрезистентные бактерии (выявлены всего на двух станциях); наиболее распространённой эколого-трофической группой, присутствовавшей на всех станциях в высокой концентрации (от 10² до 10³ КОЕ·мл⁻¹), были бактерии, устойчивые к Cd (табл. 7).

Интересно, что Cu- и Zn-резистентные микроорганизмы также были обнаружены почти на всех станциях и формировали общий фон с более низкой концентрацией клеток. Однако на контрольной станции за пределами залива численность Zn-резистентных бактерий была на два порядка выше. В целом в микробных сообществах поверхностных вод залива Владимира на большинстве станций одновременно обнаружены бактерии, резистентные к нескольким металлам. Менее всего распространены Pb-, Ni- и Co-резистентные бактерии.

При оценке экологического состояния донных отложений рекомендовано изучать общее валовое содержание, а также концентрацию кислоторастворимых (условно валовых) и подвижных форм ТМ. В зависимости от определяемой формы ТМ для оценки загрязнения используют сравнение с кларковым содержанием элемента в земной коре, либо с ПДК и ОДК (ориентировочно допустимая концентрация), принятыми для почв, либо с фоном. Нами установлены валовые концентрации, соотнесённые с кларковым содержанием элемента в земной коре [Виноградов, 1962] и с фоновыми концентрациями для залива Петра Великого [Шулькин, 2004].

Таблица 7. Распределение численности металлрезистентных микроорганизмов (КОЕ·мл⁻¹) в поверхностных водах залива Владимира (среднее \pm SD)

Table 7. Distribution of the abundance of heavy metal resistant microorganisms (CFU·mL⁻¹) in the Vladimir Bay surface waters (mean \pm SD)

Ст.	Эколого-трофические группы микроорганизмов					
	Cu	Cd	Ni	Co	Zn	Pb
2	(7,0 \pm 0,09) $\times 10^2$	(1,8 \pm 0,1) $\times 10^2$	(1,2 \pm 0,28) $\times 10^2$	0	(2,0 \pm 0,12) $\times 10$	(5,0 \pm 0,1) $\times 10^2$
4	(2,4 \pm 0,09) $\times 10^3$	(1,8 \pm 0,17) $\times 10^3$	(2,0 \pm 0,1) $\times 10^2$	0	(5,0 \pm 0,2) $\times 10$	(2,0 \pm 0,02) $\times 10$
5	(1,02 \pm 0,12) $\times 10^3$	(2,08 \pm 0,1) $\times 10^3$	0	(8,2 \pm 0,06) $\times 10^2$	(2,0 \pm 0,02) $\times 10$	0
8	(1,08 \pm 0,08) $\times 10$	(1,0 \pm 0,03) $\times 10^2$	0	0	0	0
11	(1,0 \pm 0,28) $\times 10^2$	(1,7 \pm 0,02) $\times 10^2$	(2,3 \pm 0,1) $\times 10^2$	(4,0 \pm 0,2) $\times 10^2$	(2,0 \pm 0,04) $\times 10$	0
12	(1,1 \pm 0,1) $\times 10^2$	(9,0 \pm 0,1) $\times 10^2$	(2,0 \pm 0,1) $\times 10^2$	(1,0 \pm 0,31) $\times 10^3$	(1,2 \pm 0,05) $\times 10$	0
13	0	(1,0 \pm 0,2) $\times 10^2$	(6,0 \pm 0,3) $\times 10$	0	(2,0 \pm 0,02) $\times 10$	0
14	(3,5 \pm 0,3) $\times 10^2$	(1,8 \pm 0,12) $\times 10^3$	0	(1,8 \pm 0,2) $\times 10^2$	0	0
К	(1,6 \pm 0,3) $\times 10^2$	(9,0 \pm 0,2) $\times 10^2$	0	(2,0 \pm 0,08) $\times 10$	(1,1 \pm 0,3) $\times 10^2$	0

Концентрации рассматриваемых соединений (Cd, Ni, Pb, Cu, Zn, Fe и Cr) варьировали в неодинаковых диапазонах. Так, кратность разницы между максимальным и минимальным значением составила от 1,9 до 70,3, что свидетельствовало о наиболее выравненном фоне донных концентраций Cr и о максимально изменяющемся фоне для Cu (табл. 8). Для Pb, Fe и Zn отношение max/min составило 3,6; 4,6 и 6,7 раза. Более чем 13-кратно варьирует ряд значений содержания в донных осадках Ni. Максимальные концентрации соединений ТМ в донных отложениях были следующими: Cd — 0,75 мкг·г⁻¹; Ni — 33,0; Pb — 10,9; Cu — 21,1; Zn — 115,3; Fe — 17 437; Cr — 16,26 мкг·г⁻¹.

Практически для всех элементов валовое содержание ТМ в донных отложениях было ниже кларкового значения. Исключением стал Cd: для него превышение кларковых значений отмечено на многих станциях. Максимальные концентрации Cd пришлось на станции с наибольшими значениями $S_{орг}$. Для некоторых станций отмечено превышение кларкового значения Zn, при этом максимумы также связаны с повышенными концентрациями ОВ в донных осадках и с преобладанием тонкоилистой фракции, что, вероятно, способствует накоплению этих элементов из водной среды и сосредоточению в аккумулятивных зонах залива. Для всех обследованных станций в ряду концентраций доминируют железо и цинк, а содержание кадмия минимально всегда (по отношению к концентрации других металлов). Общий ряд убывания значений концентраций ТМ в донных осадках выглядит следующим образом: Fe > Zn > Cu > Cr > Pb > Ni > Cd. На нескольких станциях в этом ряду Cr и Pb «менялись местами», в остальном картина ряда убывания повторялась. При сравнении полученных нами данных с рядом убывания кларков этих элементов, Fe > Zn > Cr > Ni > Cu > Pb > Cd [Виноградов, 1962], видно, что позиции железа, цинка и кадмия совпадают в двух рядах.

Пространственное распределение ТМ по поверхности дна залива Владимира характеризуется четырьмя типами. «Однополярное» выявлено для Ni и имеет одну область максимальных значений — на выходе из бухты Северная, на глубине 25 м (рис. 3). «Двуполярное» распределение имеет два поля максимальных концентраций и определено для Pb, Cr и Cu. «Триполярное» характерно для наиболее распространённых металлов — Zn и Fe; их содержание максимально в зонах наиболее выраженного седиментогенеза. «Векторное» распределение выявлено для Cd, оно характеризуется явным градиентом уменьшения его концентрации в донных осадках в направлении от берега вглубь практически во всех районах залива.

Таблица 8. Концентрации тяжёлых металлов ($\text{мкг}\cdot\text{г}^{-1}$) в донных отложениях залива Владимира (среднее \pm SD)

Table 8. Concentrations of heavy metals ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) in the Vladimir Bay bottom sediments (mean \pm SD)

Станция	Cd	Ni	Pb	Cu	Zn	Fe	Cr
1	0,75 \pm 0,08	2,5 \pm 0,1	3,0 \pm 0,2	10,9 \pm 0,1	26,7 \pm 0,5	4681 \pm 154	7,45 \pm 0,11
2	0,00	2,5 \pm 0,2	3,4 \pm 0,2	10,2 \pm 4,0	34,9 \pm 1,0	6893 \pm 2579	7,80 \pm 0,04
3	0,45 \pm 0,03	3,8 \pm 0,2	7,5 \pm 0,2	10,3 \pm 0,1	74,5 \pm 0,4	13 168 \pm 151	4,43 \pm 0,38
4	0,69 \pm 0,03	3,7 \pm 0,4	8,3 \pm 0,1	9,4 \pm 0,1	115,3 \pm 8,7	17 437 \pm 169	16,26 \pm 0,11
5	0,35 \pm 0,01	3,8 \pm 0,2	7,4 \pm 0,1	10,1 \pm 0,2	61,6 \pm 0,4	14 952 \pm 138	2,74 \pm 0,67
6	0,19 \pm 0,01	3,2 \pm 0,1	4,5 \pm 0,1	12,7 \pm 1,4	45,6 \pm 0,8	6721 \pm 19	2,04 \pm 0,13
7	0,00	2,9 \pm 0,1	4,1 \pm 0,1	2,0 \pm 0,1	30,3 \pm 0,1	10 571 \pm 165	12,00 \pm 0,27
8	0,42 \pm 0,03	33,0 \pm 0,7	9,2 \pm 0,1	16,2 \pm 0,1	97,4 \pm 0,2	14 708 \pm 77	9,00 \pm 0,44
9	0,26 \pm 0,01	2,8 \pm 0,1	6,3 \pm 0,1	5,8 \pm 0,1	35,8 \pm 0,2	7085 \pm 34	3,32 \pm 0,20
10	0,11 \pm 0,01	4,6 \pm 0,1	8,5 \pm 0,1	1,6 \pm 0,1	17,3 \pm 0,1	4289 \pm 4	11,19 \pm 0,07
11	0,73 \pm 0,01	2,6 \pm 0,1	3,2 \pm 0,1	10,8 \pm 0,1	35,7 \pm 0,1	5533 \pm 19	5,59 \pm 0,11
12	0,72 \pm 0,01	2,7 \pm 0,2	3,3 \pm 0,1	11,2 \pm 0,1	36,3 \pm 0,1	5609 \pm 3	5,91 \pm 0,09
13	0,35 \pm 0,01	3,4 \pm 0,1	7,1 \pm 0,2	21,1 \pm 0,4	28,5 \pm 0,1	6262 \pm 8	2,04 \pm 0,04
14	0,64 \pm 0,01	2,8 \pm 0,1	3,4 \pm 0,1	10,7 \pm 0,1	65,3 \pm 0,1	11 622 \pm 216	6,63 \pm 0,07
15	0,44 \pm 0,01	5,0 \pm 0,1	10,9 \pm 0,1	18,5 \pm 0,1	113,6 \pm 0,5	12 378 \pm 12	13,46 \pm 0,07
16	0,06 \pm 0,01	3,2 \pm 0,1	3,1 \pm 0,2	1,4 \pm 0,2	22,5 \pm 0,1	3781 \pm 32	0,66 \pm 0,07
17	0,19 \pm 0,01	3,4 \pm 0,1	5,8 \pm 0,2	0,3 \pm 0,1	39,2 \pm 0,1	11 052 \pm 43	2,68 \pm 0,07
Мах/мин	13,6	13,2	3,6	70,3	6,7	4,6	24,64
Кларк	0,13	58	16	47	83	46 500	83
Фон _{пески}	0,1 \pm 0,05	15 \pm 3	20 \pm 5	8 \pm 2	30 \pm 7	–	–
Фон _{алевропелиты}	0,2 \pm 0,1	45 \pm 5	35 \pm 5	2 \pm 3	100 \pm 10	–	–

Примечание: кларк — кларковое содержание по [Виноградов, 1962]; фон — фоновые концентрации металлов в прибрежных донных осадках северо-западной части Японского моря [Шулькин, 2004]. Жирным выделены максимальные концентрации соединений тяжёлых металлов.

Note: *кларк* is clarke content according to [Vinogradov, 1962]; *фон* is background concentrations of metals in the coastal bottom sediments of the northwestern Sea of Japan [Shulkin, 2004]. Maximum concentrations of heavy metal compounds are highlighted in bold.

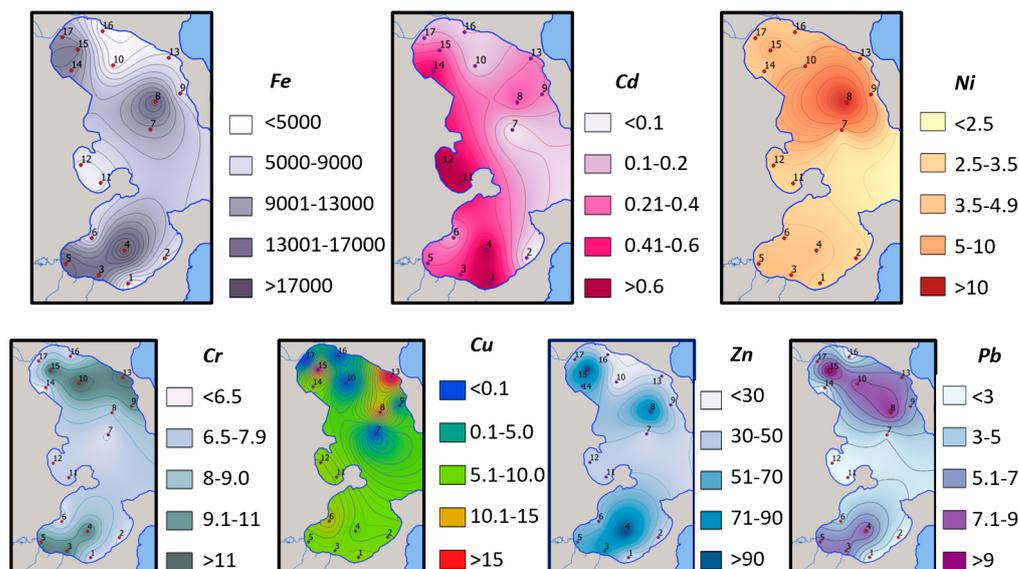


Рис. 3. Карты распределения концентраций тяжёлых металлов ($\mu\text{кг}\cdot\text{г}^{-1}$) в донных осадках залива Владимира (цифры на картах — номера станций)

Fig. 3. Maps of the distribution of heavy metal concentrations ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) in the Vladimir Bay bottom sediments (the stations are indicated on the maps with numbers)

Тяжёлые металлы в гонадах морских ежей. В гонадах *S. intermedius* определены концентрации тех же, что и в донных отложениях, шести ТМ (за исключением Fe). Диапазон изменения концентраций составил ($\mu\text{кг}\cdot\text{г}^{-1}$ сухой массы): Pb — 2,36–13,46; Cd — 0,22–0,62; Cu — 3,05–5,12; Cr — 1,34–2,32; Ni — 0,89–4,65; Zn — 32,51–118,94. Он варьировал в более узких пределах, чем диапазон для донных отложений. Максимальная вариабельность (5,70 раза) выявлена в ряду содержания Pb (табл. 9). Среди всех ТМ наибольшие концентрации характерны для цинка, наименьшие — для кадмия. Никель, медь, свинец и хром занимают промежуточное положение, сменяя друг друга в ряду убывания содержания на разных станциях. Порядок убывания концентраций в среднем формирует следующий ряд: Zn > Pb > Cu > Ni > Cr > Cd.

Таблица 9. Концентрации тяжёлых металлов в гонадах морского ежа *Strongylocentrotus intermedius* ($\mu\text{кг}\cdot\text{г}^{-1}$ сухого веса) из залива Владимира

Table 9. Heavy metal concentrations in *Strongylocentrotus intermedius* gonads ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ dry weight) from the Vladimir Bay

Станция	Металлы					
	Pb	Cd	Cu	Cr	Ni	Zn
2	2,36 ± 0,44	0,36 ± 0,02	3,30 ± 0,77	1,58 ± 0,21	2,65 ± 1,20	70,11 ± 16,58
7	3,89 ± 0,85	0,62 ± 0,02	3,21 ± 0,48	2,32 ± 0,31	2,58 ± 0,67	101,83 ± 21,37
10	5,89 ± 2,23	0,51 ± 0,08	3,99 ± 0,49	2,16 ± 0,14	2,05 ± 0,58	118,94 ± 28,67
11	2,82 ± 0,21	0,28 ± 0,03	3,05 ± 0,37	1,38 ± 0,16	4,65 ± 2,21	84,85 ± 15,68
12	3,01 ± 0,21	0,59 ± 0,08	3,58 ± 0,25	1,68 ± 0,11	1,54 ± 0,58	92,41 ± 15,81
14	13,46 ± 1,19	0,22 ± 0,03	5,12 ± 0,06	1,34 ± 0,47	0,89 ± 0,71	32,51 ± 21,47
Max/min	5,70	2,81	1,68	1,73	5,22	3,66

Примечание: приведены средние по результатам трёх повторностей значения и SD. Жирным выделены максимальные значения.

Note: the mean values based on the results of three replicates and SD are given. Maximum values are highlighted in bold.

ОБСУЖДЕНИЕ

Кислородный режим залива Владимира (РК и БПК₅) в целом в норме, зоны гипоксии отсутствуют. Тем не менее в кутовых частях бухт Средняя и Северная выявлены районы с высоким уровнем БПК₅, определяющим интенсивное потребление РК на окисление легкоразлагаемого ОВ. След от труднорастворимого ОВ (в том числе бытовых стоков посёлков, содержащих синтетические поверхностно-активные вещества и другие соединения), судя по показателям ПО, несущественен.

Показатели содержания органических форм фосфора довольно высоки и достигают максимума, 809,57 мкг·л⁻¹, в бухте Южная, близ посёлка Тимофеевка. Однако концентрации минеральных соединений фосфора (P_{мин}), по которым классифицируют трофический статус, в целом характеризуют воды залива Владимира в летний период как мезотрофные. Выравненное распределение КГМ в поверхностных водах на уровне 10³ КОЕ·мл⁻¹ (включая контрольную станцию за пределами залива) свидетельствует об α-мезосапробном уровне ОВ [Общая и санитарная микробиология, 2004]. Соотнесение микробиологических данных со шкалой трофности указывает на соответствие вод уровню олигомезотрофных, что совпадает с нашей прямой химической оценкой. Таким образом, водная масса залива в летний период имеет мезотрофный уровень ОВ, достаточный для поддержания обилия организмов формирующихся в ней биоценозов, и успешно «утилизирует» поступающее ОВ естественного и бытового происхождения. Влияние населённых пунктов и прибрежной полосы в целом на формирование условий эвтрофирования несущественно.

Содержание органического углерода в мягких грунтах достигало 3,64 % сухой массы пробы. В ряду максимальных значений C_{орг}, полученных для разных акваторий морской прибрежной зоны Приморского края [Гальшева, 2010], залив Владимира находится между заливом Находка (исключая бухту Находка) и заливом Амурский (рис. 4).

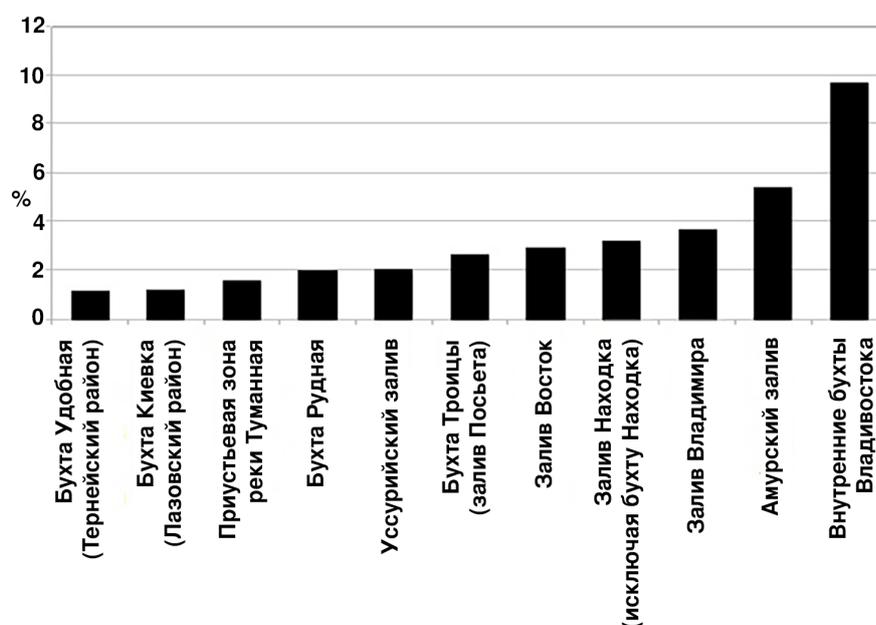


Рис. 4. Ряд максимальных значений содержания органического углерода (C_{орг}) (% на 100 г сухой массы пробы), обнаруженных в донных отложениях морской прибрежной зоны Приморского края

Fig. 4. Range of the maximum values of organic carbon (C_{орг}) content (% per 100 g of dry sample weight) recorded in the bottom sediments off the Primorsky Krai marine coast

Таким образом, залив Владимира можно причислить к морским акваториям с относительно высоким содержанием ОБ в мягких грунтах, что указывает на выраженность процессов накопления ОБ в экосистеме залива даже при условиях олигомезотрофного уровня морских вод. Причины формирования условий накопления ОБ в среде залива Владимира носят естественный характер, поскольку антропогенное воздействие на него (относительно воздействия на заливы Находка и Амурский) слабое.

Металлрезистентные микроорганизмы являются частью гетеротрофов, позволяющей оценить уровень и характер техногенного пресса на поверхностные воды залива. Если численность Cd-, Pb-, Co- и Ni-резистентных форм бактерий свидетельствует преимущественно о техногенном воздействии на среду, из которой они высеваются, то численность Cu- и Zn-резистентных форм — о биологическом природном или антропогенном воздействии [Христофорова и др., 2018]. Медь и цинк входят в состав молекул живых организмов и поступают в окружающую среду при разложении продуктов жизнедеятельности или при отмирании самих организмов. Коммунально-бытовые воды, включающие фекальные стоки, также содержат высокие концентрации этих микроэлементов. В целом микробная ассоциация залива Владимира характеризовалась по большей части как Cd-резистентная. При проверке эколого-физиологических свойств колоний, выросших на обогащённом кадмием субстрате, более половины культивируемых гетеротрофных бактерий проявляли высокую степень устойчивости к этому ТМ.

Для перехода от микробиологических данных к экологической оценке степени загрязнённости морской акватории используют шкалу, которая соотносит микробный индекс (долю конкретной металлрезистентной группы в процентах от КГМ) с ПДК тяжёлых металлов для водоёмов рыбохозяйственного значения [Безвербная и др., 2003]. При пересчёте абсолютной численности металлрезистентных групп в формат микробного индекса и при соотнесении его со шкалой оценки степени загрязнённости мы оцениваем относительно ровный фон Cd-резистентных бактерий как сигнализирующий о значительной степени (> 3 ПДК) загрязнения вод залива Владимира кадмием (табл. 10). «Векторное» распределение концентраций Cd в донных отложениях показывает градиент убывания его содержания от берега к центральной части залива, что даёт основания предполагать наличие берегового источника поступления кадмия.

Таблица 10. Оценка экологического состояния поверхностных вод залива Владимира по шкале соотнесения микробного индекса с ПДК тяжёлых металлов для рыбохозяйственных водоёмов

Table 10. Assessment of the ecological state of the Vladimir Bay surface waters on a scale of correlation of the microbial index with the maximum permissible concentration (MPC) for heavy metals in fishery basins

Станция	Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Co
2	▲	△	*	*	*	○
4	▲	*	*	○	*	○
5	▲	*	*	○	○	*
8	△	○	○	○	○	○
11	▲	○	*	○	△	△
12	△	○	*	○	*	*
13	△	○	*	○	*	○
14	▲	○	○	○	○	*
К	△	○	*	○	○	○

Примечание: К — контрольная станция за пределами залива. Символами обозначена степень загрязнения: ○ — фоновая (< ПДК); * — незначительная (\approx 1 ПДК); △ — ощутимая (1–3 ПДК); ▲ — значительная (> 3 ПДК).

Note: K denotes the control station outside the bay. The symbols indicate the degree of pollution: ○, background (< MPC); *, insignificant (\approx 1 MPC); △, tangible (1–3 MPC); ▲, significant (> 3 MPC).

В результате корреляционного анализа связи ОБ в донных отложениях залива с концентрациями ТМ, гранулометрической характеристикой и глубиной залегания грунта подтверждены известные зависимости увеличения содержания органики с нарастанием доли наиболее мелких фракций и стабилизации условий гидродинамики, связанных с глубиной (рис. 5) [Романкевич и др., 2009]. Положительная корреляция увеличения содержания ТМ в связи с ростом концентрации $C_{\text{орг}}$ в донных отложениях (при невысоких значениях коэффициента Пирсона) выявлена в отношении четырёх элементов — Zn, Cd, Cr и Pb. Данные по концентрации Cu, Fe и Ni не показывают корреляционной связи со значениями содержания ОБ. Таким образом, только в отношении четырёх из семи микроэлементов можно предполагать влияние накопленной концентрации ОБ как возможного фактора связывания и депонирования в состав донных отложений.

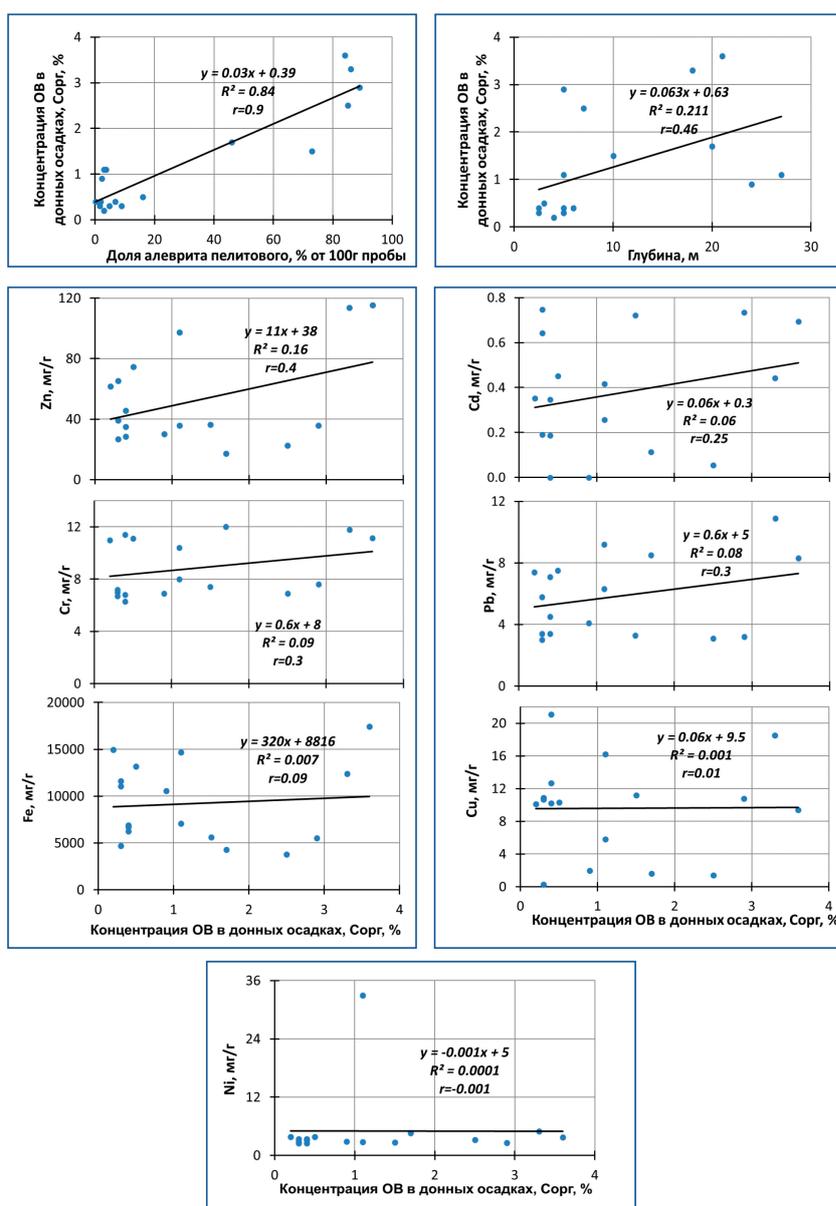


Рис. 5. Корреляционный анализ связи органического вещества (ОБ) в донных отложениях залива Владимира с концентрациями тяжёлых металлов, гранулометрической характеристикой и глубиной залегания грунта (R^2 — коэффициент детерминации; r — коэффициент корреляции Пирсона)

Fig. 5. Correlation analysis of the relationship of organic matter (OB) in the Vladimir Bay bottom sediments with heavy metal concentrations, grain-size characteristics, and depth of sediments (R^2 , the coefficient of determination; r , the Pearson correlation coefficient)

Значения фактора загрязнения C_f (табл. 11) ранжированы следующим образом (по уровням загрязнения): $C_f < 1$ — низкое; $1 \leq C_f < 3$ — среднее; $3 \leq C_f < 6$ — высокое; $C_f \geq 6$ — очень высокое [Ващенко и др., 2010; Hakanson, 1980]. Донные осадки залива Владимира имеют низкий уровень загрязнения Pb и Ni (лишь одно значение на ст. 8 для Ni > 1). Интересно, что для данной локации характерен и высокий уровень загрязнения Zn, для остальных же загрязнение этим соединением характеризуется как среднее (10 станций) и низкое (6 станций). Донные отложения наиболее загрязнены Cd и Cu: высокое и очень высокое загрязнение Cd и Cu выявлено для ст. 9 и 4 соответственно. Отметим, что для ст. 4, 12 и 15, расположенных в центральных частях бухт Северная и Южная, а также в кутовой части бухты Средняя, где идёт активное накопление ОБ, характерны и высокие уровни загрязнения Cd и Cu. Для Zn и Ni подобной связи не выявлено.

Таблица 11. Оценка экологического состояния донных отложений залива Владимира по величинам индексов загрязнения и экологического риска

Table 11. Assessment of the ecological state of the Vladimir Bay bottom sediments by the values of the contamination factor, the degree of contamination, and the sediment quality guideline quotient

Станция	C_f					C_d	SQG-Q
	Cd	Ni	Pb	Cu	Zn		
1	7,47	0,17	0,15	1,36	0,89	10,04	0,29
2	0,00	0,17	0,17	1,28	1,16	2,78	0,24
3	4,52	0,25	0,38	1,29	2,48	8,92	0,31
4	3,47	0,08	0,24	4,70	1,15	9,64	0,33
5	3,52	0,25	0,37	1,26	2,05	7,46	0,29
6	1,86	0,21	0,23	1,59	1,52	5,41	0,31
7	0,00	0,19	0,21	0,25	1,01	1,66	0,08
8	4,16	2,20	0,46	2,03	3,25	12,09	0,53
9	2,56	0,19	0,32	0,73	1,19	4,98	0,17
10	1,13	0,31	0,43	0,20	0,58	2,64	0,08
11	3,67	0,06	0,09	5,40	0,36	9,58	0,29
12	3,61	0,06	0,09	5,60	0,36	9,73	0,30
13	3,46	0,23	0,36	2,64	0,95	7,63	0,48
14	6,43	0,19	0,17	1,34	2,18	10,30	0,31
15	2,22	0,11	0,31	9,25	1,14	13,02	0,51
16	0,28	0,07	0,09	0,70	0,23	1,36	0,06
17	1,91	0,23	0,29	0,04	1,31	3,77	0,06

Повышенная концентрация ОБ в грунтах, характерная для тонкодисперсных фракций, обуславливает понижение содержания неорганического углерода и водородного показателя и, как следствие, изменение окислительно-восстановительного потенциала донных осадков. Уменьшение значений pH усиливает миграционную способность включённых в состав осадков элементов и является фактором риска вторичного загрязнения при аккумуляции грунтами токсичных элементов и их соединений. Таким образом, по величинам микробного индекса и C_f также можно предположить, что Cd поступает в воду залива от береговых источников и депонируется в донных отложениях. Между тем накопление $C_{орг}$ в донных осадках может не только способствовать связыванию ТМ, но и в дальнейшем (при изменении окислительно-восстановительного потенциала самих осадков и при понижении значений pH) вторично высвободить их в водную толщу [Шулькин, 2004].

Значения суммарного коэффициента степени загрязнения осадков C_d (см. табл. 11) ранжированы в соответствии с суммарной величиной C_f для фонового района, равной 6 [Ващенко и др., 2010], следующим образом: $C_d < 6$ — низкая; $6 \leq C_d < 12$ — средняя; $12 \leq C_d < 24$ — высокая; $C_d > 24$ — очень высокая степень загрязнения осадков тяжёлыми металлами. Большинство станций (8 из 17) характеризуется средней степенью загрязнения донных отложений. Высокая загрязнённость зарегистрирована для ст. 8 и 15.

Значения SQG-Q (табл. 11) ранжированы следующим образом [Ващенко и др., 2010; MacDonald et al., 1996]: $SQG-Q \leq 0,1$ — нетоксичные осадки, наименьшая вероятность наблюдения негативных биологических эффектов; $0,1 < SQG-Q < 1$ — умеренно токсичные осадки, средняя вероятность наблюдения негативных биологических эффектов; $SQG-Q > 1$ — сильно токсичные осадки, высокая вероятность наблюдения негативных биологических эффектов. Несмотря на то, что донные отложения залива Владимира загрязнены ТМ, в целом их можно охарактеризовать как умеренно токсичные. Наибольшая потенциальная токсичность отмечена для ст. 8.

В гонадах морского ежа *S. intermedius* в максимальных концентрациях накапливался Zn. В донных отложениях концентрация Zn была также высокой (и на трёх станциях даже превышала кларковые значения). Однако при оценке корреляции пар значений (Zn в грунтах — Zn в гонадах), полученных для каждой станции, выявлена чёткая обратная зависимость с коэффициентом корреляции Пирсона $r = -0,96$ (рис. 6). Другими словами, чем выше была концентрация цинка в гонадах, тем меньшее его содержание отмечено в донных отложениях.

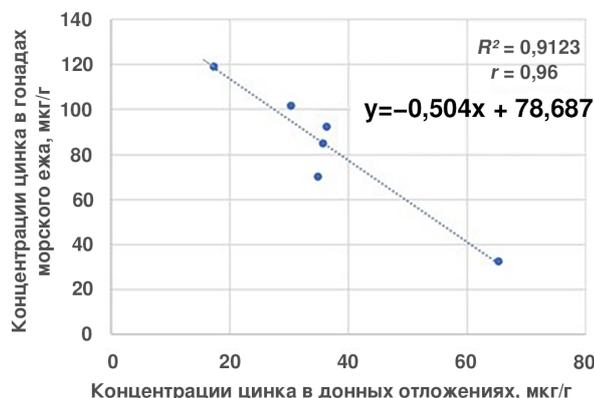


Рис. 6. Корреляционный анализ связи значений концентрации Zn в донных отложениях и в гонадах морского ежа *Strongylocentrotus intermedius*

Fig. 6. Correlation analysis of the relationship of Zn concentration values in the bottom sediments and in gonads of the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*

Из всех форм нахождения металлов в среде живые организмы способны поглощать и усваивать только биодоступные, при этом морские беспозвоночные обладают способностью регулировать поступление цинка в организм [Шулькин, 2004]. Возможно, несмотря на высокие концентрации Zn в донных отложениях, содержание его биодоступной для гидробионтов формы в воде и морских грунтах невысоко; соответственно, последующее алиментарное поглощение морскими ежами также обуславливает его невысокие концентрации в гонадах. Подобная картина была отмечена ранее для митилид из прибрежной части полуострова Муравьёва-Амурского [Шулькин, 2004]. Вероятно, поглощение морскими ежами биодоступной формы Zn происходит из придонных вод при непрерывном пропускании воды через полости тела (как и у всех гидробионтов).

Икра морских ежей является не только ценным пищевым продуктом, но и высокоэффективной лечебно-профилактической добавкой. С учётом этого факта одни из задач экологов — определение соответствия качества икры существующим нормативам и оценка угрозы здоровью при её потреблении в качестве пищи. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011) нормирует допустимые уровни содержания некоторых токсичных ТМ, приводя величины в $\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы. Пересчёт полученных нами значений на сырую массу и сравнение этих результатов (табл. 12) с установленными допустимыми уровнями показали, что содержание Cd и Pb в гонадах морских ежей ни на какой из станций сбора в заливе Владимира не превышает нормируемых предельных значений.

Таблица 12. Концентрации Pb и Cd ($\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сырой массы) в гонадах морского ежа *Strongylocentrotus intermedius* из залива Владимира (среднее \pm SD)

Table 12. Pb and Cd concentrations ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wet weight) in gonads of the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius* from the Vladimir Bay (mean \pm SD)

Станция	Pb	Cd
2	0,52 \pm 0,09	0,08 \pm 0,00
7	0,86 \pm 0,19	0,14 \pm 0,00
10	1,31 \pm 0,49	0,11 \pm 0,02
11	0,63 \pm 0,05	0,06 \pm 0,01
12	0,67 \pm 0,05	0,13 \pm 0,02
14	2,99 \pm 0,26	0,05 \pm 0,01
ДУ	10,00	2,00

Примечание: ДУ — допустимый уровень (ТР ТС 021/2011).

Note: DU denotes a permissible level (Technical Regulation of the Customs Union 021/2011).

Тем не менее выполненная с применением калькулятора ILCR оценка суммарного риска здоровью при непрерывном употреблении в пищу икры морского ежа из залива Владимира в течение летнего сезона указывает на существование опасности возникновения онкологических заболеваний. Значение этого коэффициента с учётом фактических концентраций Cd и Pb в гонадах составило $5,27\cdot 10^{-5}$; между тем допустимая величина, являющаяся критерием безопасности морского продукта, — 10^{-5} .

Выводы:

1. Экосистема залива Владимира с относительно высоким уровнем органического вещества в летний период успешно «утилизует» органику естественного и бытового происхождения. Влияние населённых пунктов и прибрежной полосы на формирование условий эвтрофирования несущественно. Химико-экологические показатели свидетельствуют о мезотрофном статусе поверхностных вод. Эколого-микробиологическая проверка по численности колоний гетеротрофных организмов показала α -мезосапробный уровень качества вод. Перевод микробиологических данных в химические по шкале сопоставления указывает на олигомезотрофный статус исследованного горизонта вод.
2. По максимальному значению $C_{\text{орг}}$ залив Владимира относится к морским акваториям с высоким содержанием органического вещества в донных отложениях. Наибольшие концентрации обнаружены в центральных и кутовых частях его бухт.
3. Массовыми видами макрозообентоса являются *Strongylocentrotus intermedius*, *Asterina pectinifera*, *Mizuhopecten yessoensis*, *Crenomytilus grayanus*, *Pododesmus macrochisma* и *Cucumaria japonica*, макрофитобентоса — *Desmarestia viridis*, *Costaria costata*,

- Saccharina japonica*, *Zostera marina* и *Phyllospadix iwatensis*. Средняя биомасса бентоса составляет $(841 \pm 583) \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, что свидетельствует о высоких уровнях биоресурсов залива. В макрозообентосе доминируют иглокожие, прежде всего морские ежи.
4. Микробные сообщества поверхностных вод залива Владимира в целом характеризуются одновременным присутствием резистентных к различным металлам эколого-трофических групп. Соотнесение результатов микробиологической оценки со шкалой ПДК свидетельствует о значительном загрязнении поверхностных вод залива в отношении Cd (> 3 ПДК). Общий фон с более низкой численностью клеток формируют Cu- и Zn-резистентные микроорганизмы.
 5. Валовое содержание в донных отложениях для большинства тяжёлых металлов (ТМ) было ниже кларковых значений. Фоновые концентрации превышены по нескольким ТМ. Ряд убывания значений концентраций исследуемых ТМ в грунтах выглядит следующим образом: Fe $>$ Zn $>$ Cu $>$ Cr $>$ Pb $>$ Ni $>$ Cd. Горизонтальное пространственное распределение концентраций ТМ в донных отложениях характеризуется четырьмя типами — «однополярное», «двуполярное», «триполярное» и «векторное». В гонадах морских ежей значения концентраций ТМ варьировали меньше, чем в донных отложениях. Порядок убывания концентраций в среднем составил следующий ряд: Zn $>$ Pb $>$ Cu $>$ Ni $>$ Cr $>$ Cd.
 6. Корреляционный анализ подтвердил зависимость увеличения содержания органического вещества в донных отложениях от нарастания доли наиболее мелких фракций и глубины. Положительная корреляция обнаружена для $C_{\text{орг}}$ и четырёх элементов (Zn, Cd, Cr и Pb), в отношении которых предположено влияние накопленной концентрации органического вещества как возможного фактора связывания и депонирования в состав донных отложений. Анализ связи концентраций ТМ в грунтах и гонадах морских ежей показал высокую отрицательную корреляцию в отношении Zn. Обратная зависимость обусловлена, возможно, биологически труднодоступной формой соединений цинка в донных отложениях.
 7. Фактор загрязнения C_f характеризует загрязнение донных отложений залива цинком как высокое, кадмием и медью — как очень высокое. Величина индекса C_d свидетельствует о средней степени загрязнения донных осадков ТМ в целом. По показателю SQG-Q грунты залива относятся к категории умеренно токсичных.
 8. Риск здоровью человека, определённый по суммарному присутствию в гонадах морского ежа Cd и Pb, показал соответствие допустимым значениям, которые указаны в Техническом регламенте Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции». Между тем по значению индекса нарастающего пожизненного риска ILCR можно сделать прогноз о существовании опасности возникновения онкологических заболеваний при длительном употреблении в пищу гонад морского ежа *S. intermedius* из залива Владимира.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект FZNS-2023-0011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Безвербная И. П., Дмитриева Г. Ю., Тазаки К., Ватанабе Х. Опыт оценки качества прибрежных морских вод Приморья на основе микробной индикации // *Водные ресурсы*. 2003. Т. 30, № 2. С. 222–231. [Bezverbnaya I. P., Dimitrieva G. Yu., Tazaki K., Vatanabe H. Evaluation of sea water quality in the coastal zone of Primor'e using the method of microbial indication. *Vodnye resursy*, 2003, vol. 30, no. 2, pp. 222–231. (in Russ.)]
2. Ващенко М. А., Альмяшова Т. Н., Жадан П. М. Многолетняя и сезонная динамика состояния гонад морского ежа *Strongylocentrotus intermedius*, обитающего в условиях антропогенного загрязнения (Амурский залив Японского моря) // *Вестник Дальневосточного*

- отделения Российской академии наук. 2005. № 1 (119). С. 32–42. [Vaschenko M. A., Almyashova T. N., Zhadan P. M. Long-term and seasonal dynamics of the gonad state in the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius* under anthropogenic pollution (Amursky Bay, Sea of Japan). *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk*, 2005, no. 1 (119), pp. 32–42. (in Russ.)]
3. Ващенко М. А., Жадан П. М., Альмяшова Т. Н., Ковалёва А. Л., Слинько Е. Н. Оценка уровня загрязнения донных осадков Амурского залива (Японское море) и их потенциальной токсичности // *Биология моря*. 2010. Т. 36, № 5. С. 354–361. [Vashchenko M. A., Zhadan P. M., Almyashova T. N., Kovalyova A. L., Slinko E. N. Assessment of the contamination level of bottom sediments of Amursky Bay (Sea of Japan) and their potential toxicity. *Biologiya morya*, 2010, vol. 36, no. 5, pp. 354–361. (in Russ.)]
 4. Ващенко Н. Г., Цой И. Б. Вещественный состав и условия образования неогеновых отложений континентального склона Приморья в районе залива Владимира (Японское море) // *Океанология*. 2014. Т. 54, № 4. С. 518–529. [Vashchenko N. G., Tsoy I. B. Composition and conditions for formation of Neogene deposits at the Primorye continental slope in the area of Vladimir Bay in the Sea of Japan. *Okeanologiya*, 2014, vol. 54, no. 4, pp. 518–529. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0030157414030149>
 5. Виноградов А. П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // *Геохимия*. 1962. № 7. С. 555–571. [Vinogradov A. P. Srednie sodержaniya khimicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh gornyykh porod zemnoi kory. *Geokhimiya*, 1962, no. 7, pp. 555–571. (in Russ.)]
 6. Гаврилова Г. С., Кучерявенко А. В., Одинцов А. М. Результаты и перспективы культивирования приморского гребешка *Mizuhopecten yessoensis* в зал. Владимира (Японское море) // *Известия ТИНРО*. 2006. Т. 147. С. 385–396. [Gavrilova G. S., Kucheryavenko A. V., Odintsov A. M. Results and prospects of the scallop *Mizuhopecten yessoensis* cultivation in the Vladimir Bay (Japan Sea). *Izvestiya TINRO*, 2006, vol. 147, pp. 385–396. (in Russ.)]
 7. Гаврилова Г. С., Сухин И. Ю., Турабжанова И. С. Первый опыт садкового выращивания заводской молоди гребешка (*Mizuhopecten yessoensis*) у восточного побережья Приморья // *Известия ТИНРО*. 2019. Т. 197. С. 208–218. [Gavrilova G. S., Sukhin I. Yu., Turabzhanova I. S. First experience of cage cultivation of hatchery-produced juvenile scallop *Mizuhopecten yessoensis* at eastern coast of Primorye. *Izvestiya TINRO*, 2019, vol. 197, pp. 208–218. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2019-197-208-218>
 8. Галышева Ю. А. Особенности распределения макробентоса в прибрежных морских экосистемах Приморья // *Известия ТИНРО*. Т. 163. С. 286–296. [Galysheva Yu. A. Features of macrobenthos distribution in coastal marine ecosystems at Primorye (Japan Sea). *Izvestiya TINRO*, 2010, vol. 163, pp. 286–296. (in Russ.)]
 9. Галышева Ю. А., Сердюк У. И., Христофорова Н. К. Состав и распределение макробентоса сублиторали залива Владимира Японского моря // *Известия ТИНРО*. 2018. Т. 192. С. 145–156. [Galysheva Yu. A., Serdyuk U. I., Khristoforova N. K. Structure and distribution of macrobenthos in the sublittoral zone of the Vladimir Bay, Japan Sea. *Izvestiya TINRO*, 2018, vol. 192, pp. 145–156. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-192-145-156>
 10. Донец М. М., Цыганков В. Ю., Кульшова В. И., Элхури Ж., Боярова М. Д., Гумовский А. Н., Гумовская Ю. П., Богатов В. В., Прозорова Л. А., Чернова Е. Н., Лысенко Е. В., Нго К. К. Пищевая безопасность двустворчатых моллюсков Южного Вьетнама: хлороорганические соединения и тяжёлые металлы как факторы риска для здоровья человека // *Медицинский академический журнал*. 2020. Т. 20, № 2. С. 45–58. [Donets M. M., Tsygankov V. Yu., Kulshova V. I., Elkhoury J., Boyarova M. D., Gumovskiy A. N., Gumovskaya Yu. P., Bogatov V. V., Prozorova L. A., Chernova E. N., Lysenko E. V., Ngo X. Q. Food safety of bivalves from the South Vietnam: Organochlorine compounds and heavy metals as risk factors for human health. *Meditinskii akademicheskii zhurnal*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 45–58. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/MAJ34285>

11. Калитина Е. Г., Михайлик Т. А., Семкин П. Ю., Барабанщиков Ю. А., Зорин С. А. Особенности микробиологического состава вод реки Раздольной (Южное Приморье) // *Известия ТИНРО*. 2015. Т. 180. С. 187–197. [Kalitina E. G., Mikhailik T. A., Semkin P. Yu., Barabanshchikov Yu. A., Zorin S. A. Features of microbiological composition for water from the Razdolnaya River (Southern Primorye). *Izvestiya TINRO*, 2015, vol. 180, pp. 187–197. (in Russ.)]
12. Качинский Н. А. *Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения* : монография. Москва : АН СССР, 1958. 193 с. [Kachinsky N. A. *Mekhanicheskii i mikroagregatnyi sostav pochvy, metody ego izucheniya* : monograph. Moscow : AN SSSR, 1958, 193 p. (in Russ.)]
13. Кулепанов В. Н., Иванова Н. В. Видовой состав и количественное распределение макрофитов в сублиторали района зал. Владимира (Северное Приморье) // *Известия ТИНРО*. 2006. Т. 146. С. 136–149. [Kulepanov V. N., Ivanova N. V. Specific structure and quantitative distribution of macrophytes in the sublittoral of Vladimir Bay (North Primorye). *Izvestiya TINRO*, 2006, vol. 146, pp. 136–149. (in Russ.)]
14. Лутаенко К. А., Колпаков Е. В. Расширение ареала инвазивной мидии *Mytilus galloprovincialis* (Bivalvia: Mytilidae) в Японском море // *Бюллетень Дальневосточного малакологического общества*. 2016. Т. 20, № 1. С. 57–76. [Lutaenko K. A., Kolpakov E. V. The extension of the distributional range of an invasive mussel, *Mytilus galloprovincialis* (Bivalvia: Mytilidae) in the Sea of Japan. *Byulleten' Dal'nevostochnogo malakologicheskogo obshchestva*, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 57–76. (in Russ.)]
15. *Общая и санитарная микробиология с технической микробиологических исследований* / под ред. А. С. Лабинской, Л. П. Блинковой, А. С. Ещиной. Москва : Медицина, 2004. 576 с. [Obshchaya i sanitarnaya mikrobiologiya s tekhnikoï mikrobiologicheskikh issledovaniï / A. S. Labinskaya, L. P. Blinkova, A. S. Eshchina (Eds). Moscow : Meditsina, 2004, 576 p. (in Russ.)]
16. *Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения* : приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 [в ред. от 10.03.2020]. [Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob"ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob"ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya : prikaz Minsel'khoza Rossii ot 13.12.2016 no. 552 [v red. ot 10.03.2020]. (in Russ.)]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> [accessed: 30.11.2021].
17. Романкевич Е. А., Ветров А. А., Пересыпкин В. И. Органическое вещество Мирового океана // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50, № 4. С. 401–411. [Romankevich E. A., Vetrov A. A., Peresyppkin V. I. Organic matter of the World Ocean. *Geologiya i geofizika*, 2009, vol. 50, no. 4, pp. 299–307. (in Russ.)]
18. *Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана*. Москва : ВНИРО, 2003. 202 с. [Rukovodstvo po khimicheskomyu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybokhozyaistvennykh vodoemov i perspektivnykh dlya promysla raionov Mirovogo okeana. Moscow : VNIRO, 2003, 202 p. (in Russ.)]
19. Христофорова Н. К., Емельянов А. А., Бердасова К. С., Дегтева Ю. Е. Экологическая характеристика вод пролива Босфор Восточный по кислородным показателям // *Известия ТИНРО*. 2015. Т. 181. С. 161–168. [Khristoforova N. K., Emelyanov A. A., Berdasova K. S., Degteva Yu. E. Ecological characteristic of water in the Eastern Bosphorus Strait by oxygen parameters. *Izvestiya TINRO*, 2015, vol. 181, pp. 161–168. (in Russ.)]
20. Христофорова Н. К., Емельянов А. А., Ефимов А. В. Биоиндикация загрязнения прибрежно-морских вод о. Русского (залив Петра Великого, Японское море) тяжёлыми металлами // *Известия ТИНРО*. 2018. Т. 192. С. 157–166. [Khristoforova N. K., Emelyanov A. A., Efimov A. V. Bioindication of pollution in the coastal marine waters at Russky Island (Peter the Great Bay, Japan Sea) by heavy metals. *Izvestiya TINRO*, 2018, vol. 192, pp. 157–166. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-192-157-166>

21. Шулькин В. М. *Металлы в экосистемах морских мелководий*. Владивосток : Дальнаука, 2004. 279 с. [Shulkin V. M. *Metally v ekosistemakh morskikh melkovodii*. Vladivostok : Dal'nauka, 2004, 279 p. (in Russ.)]
22. Birch G. F. Indicators of anthropogenic change and biological risk in coastal aquatic environments. In: *Geochemistry of Estuaries and Coasts* / G. Shimmield (Ed.). London ; Waltham ; San Diego : Academic Press, 2011, pp. 235–270. (Series: Treatise on Estuarine and Coastal Science ; vol. 4). <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00411-3>
23. Chakraborty P., Ramteke D., Chakraborty S., Nagender Nath B. Changes in metal contamination levels in estuarine sediments around India – An assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, vol. 78, iss. 1–2, pp. 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.09.044>
24. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 1980, vol. 14, iss. 8, pp. 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
25. Liang B., Qian X., Peng S., Liu X., Bai L., Cui B., Bai J. Speciation variation and comprehensive risk assessment of metal(loid)s in surface sediments of intertidal zones. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, vol. 15, iss. 10, art. no. 2125 (16 p.). <https://doi.org/10.3390/ijerph15102125>
26. MacDonald D. D., Scott Carr R., Calder F. D., Long E. R., Ingersoll Ch. G. Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters. *Ecotoxicology*, 1996, vol. 5, iss. 4, pp. 253–278. <https://doi.org/10.1007/BF00118995>
27. Saroop Sh., Tamchos S. Monitoring and impact assessment approaches for heavy metals. In: *Heavy Metals in the Environment: Impact, Assessment, and Remediation* / V. Kumar, A. Sharma, A. Cerdà (Eds). Amsterdam ; Oxford ; Cambridge : Elsevier, 2021, pp. 57–86. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-821656-9.00004-3>
28. Yoshimizu M., Kimura T. Study of intestinal microflora of salmonids. *Fish Pathology*, 1976, vol. 10, iss. 2, pp. 243–259. <https://doi.org/10.3147/jspf.10.243>
29. Zhang Ch., Yu Zh., Zeng G., Jiang M., Yang Zh., Cui F., Zhu M., Shen L., Hu L. Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. *Environment International*, 2014, vol. 73, pp. 270–281. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.08.010>

ORGANIC MATTER

IN THE ECOSYSTEM OF THE VLADIMIR BAY (THE SEA OF JAPAN): FOOD RESOURCE AND ENVIRONMENTAL RISK FACTOR

Yu. A. Galysheva, A. D. Pelekh, T. V. Boychenko, O. V. Nesterova, and A. N. Yakovleva

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

E-mail: galysheva.yua@dvfu.ru

To understand the accumulation process resulting from the input of toxic substances and elements into water areas, the study of the organic matter content in the aquatic environment and bottom sediments is of great importance. Moreover, such investigation is significant for identifying negative alterations in the ecosystem and potential environmental risks driven by the nature management. We aimed at analyzing the importance of organic matter as a factor of the environmental contamination in the Vladimir Bay (the Sea of Japan) and determining the toxicity of hydrobionts and the environmental risk to both the ecosystem and human health. This complex work was carried out applying chemical, analytical, microbiological, and hydrobiological techniques; it included mathematical and cartographic data processing, as well as calculation of accumulation factor and sediment quality guideline quotient. Seawater, bottom sediments, and macrobenthos sampled in the Vladimir Bay in July 2014 were analyzed. Chemical, ecological, and microbiological parameters of the bay waters were determined; those allowed to estimate the organic matter accumulation in the aquatic environment and bottom sediments and to establish the trophic status of the ecosystem in summer. Mass macrobenthic species and groups were identified; indices of benthic population abundance were determined indicating high levels of biomass. In surface waters, the abundance of heavy metal resistant groups of bacteria was estimated. In bottom sediments, heavy metal content and its spatial distribution were determined. Heavy metal concentrations

in the sea urchin gonads were quantified. The results of the microbiological assessment were compared with maximum permissible concentrations (MPC), and a significant pollution of the bay waters (more than 3 MPC) in terms of Cd was revealed. For Ni, Cu, Zn, and Cd, background concentrations were exceeded in the bottom sediments; for Cd and Zn, Clarke content was exceeded. The correlation between concentrations of organic matter in the bottom sediments and heavy metal content there was checked, as well as the correlation between heavy metal concentrations in the bottom sediments and in the sea urchin gonads (a statistically significant correlation was revealed for Zn). For the bay bottom sediments, the contamination factor C_f was determined; its values characterize the contamination with zinc as high, and with cadmium and copper – as very high. Also, the degree of contamination C_d was estimated; its values evidence for an average degree of contamination for the bottom sediments in total. The environmental risk quotients were calculated. According to SQG-Q value, the bay bottom sediments are classified as moderately polluted. As established, Cd and Pb content in the sea urchin gonads from the Vladimir Bay does not exceed the permissible values set in Technical Regulation of the Customs Union 021/2011. However, based on ILCR value, it can be concluded that there is a carcinogenic risk arising from consuming the sea urchin gonads.

Keywords: Vladimir Bay, Sea of Japan, organic matter, trophicity, bottom sediments, macrobenthos, heavy metals, accumulation factors, environmental risk, human health risk

УДК [582.261.1-11:551.311.8](292.471)

**БИОЛОГИЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ
ДИАТОМОВОЙ ВОДОРΟΣЛИ *NITZSCHIA CF. THERMALOIDES*,
НАСЕЛЯЮЩЕЙ ГРЯЗЕВЫЕ ВУЛКАНЫ КРЫМА**

© 2023 г. Н. А. Давидович, О. И. Давидович, Ю. А. Подунай

Карадагская научная станция имени Т. И. Вяземского — природный заповедник РАН —
филиал ФИЦ ИнБИОМ, Феодосия, Российская Федерация
E-mail: nickolaid@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.01.2021; после доработки 17.02.2021;
принята к публикации 16.02.2023; опубликована онлайн 31.05.2023.

В биологии актуально изучение способности организмов к существованию в экстремальных условиях, к которым особенно чувствительна фаза жизненного цикла, связанная с половым размножением и возможностью оставить следующее поколение. В пробах, которые были взяты из луж и озёр, образующихся в местах действия грязевых вулканов Булганакского сопочного поля (Керченский полуостров, Крым), обнаружена в большом количестве *Nitzschia cf. thermaloides* Hustedt. Из проб микропипеточным способом выделены и введены в культуру отдельные клоны, скрещивание которых позволило инициировать гетероталлическое половое воспроизведение. Целью работы было изучить биологию воспроизведения и жизненный цикл водоросли из биотопа с экстремально высокими уровнями освещённости, температуры и солёности. Впервые для данного вида приведено описание полового процесса, соответствующего типу IV2a по классификации Гайтлера. Определены кардинальные пункты — критические размеры клеток, обуславливающие переход из одной фазы жизненного цикла в другую. Приведён полный диапазон размеров клеток — от инициальных, появившихся в результате полового воспроизведения, до самых маленьких, наблюдавшихся при содержании в культуре. Рассмотрены основные положения теории жизненного цикла диатомовых водорослей, позволяющие выполнить анализ их природной популяции. Установлено, что популяция *N. cf. thermaloides* существует в месте отбора проб длительное время и представлена клетками, находящимися во всех фазах жизненного цикла.

Ключевые слова: диатомовые, *Nitzschia cf. thermaloides*, грязевые вулканы, половое воспроизведение, жизненный цикл

Диатомовые водоросли известны не только своим большим видовым разнообразием, но и значительной эволюционной пластичностью, позволившей им приспособиться к существованию на дне и в толще морских и пресных водоёмов, в почвах, на влажных поверхностях. Некоторые виды диатомей толерантны к экстремальным условиям температуры [Никулина, 2010], солёности [Неврова, Шадрин, 2005; Сеничева и др., 2008], высокой освещённости, включая ультрафиолет [Peletier et al., 1996], в отсутствие света способны к миксотрофному питанию [Абдуллин, Багмет, 2016]. В пробах воды, вытекшей из грязевых вулканов Булганакского сопочного поля (Керченский полуостров, Крым), было обнаружено 15 видов микроводорослей, среди них 6 относящихся к отделу Bacillariophyta, в том числе *Nitzschia cf. thermaloides* Hustedt, 1955 [Рябушко, Бондаренко, 2020]. В связи с указанной находкой возник ряд вопросов, которые касаются

фундаментальных аспектов биологии этих видов, обитающих в уникальных условиях температуры, солёности и инсоляции. Прежде всего нас интересовали биология воспроизведения диатомей и их отношение к экстремальным условиям. Какова продолжительность существования популяций, обнаруженных в грязевых вулканах? Каковы темпы деления диатомовых в данных биотопах? Способны ли виды в этих условиях возобновляться в поколениях, проходя все этапы жизненного цикла, включая процесс полового воспроизведения? Поставленные вопросы определили цель настоящей работы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объекты исследования выделены из проб, которые были отобраны 15 октября 2020 г. на Булганакском сопочном поле в точках с координатами, указанными в табл. 1.

Таблица 1. Точки отбора проб 15.10.2020 на Булганакском поле грязевых вулканов (Керченский полуостров, Крым) и солёность воды в пробах

Table 1. Sampling points in the Bulganak mud volcano field (Kerch Peninsula, Crimea), 15.10.2020; water salinity in the samples

Сопка	Координаты GPS		Солёность воды, ‰
	с. ш.	в. д.	
Андрусова	45°25'35.9"	36°28'38.9"	30, 35, 68
Павлова	45°25'33.0"	36°28'44.1"	18, 35, 56
Тищенко	45°25'33.3"	36°28'25.4"	20
Центральное озеро	45°25'23.7"	36°28'38.4"	19, 26

Обследовано четыре грязевых вулкана — грязевые сопки Андрусова (рис. 1А), Павлова (рис. 1В), Тищенко (рис. 1С) и Центральное озеро (рис. 1D). Булганакское сопочное поле относится к грязевулканическим образованиям с рассредоточенными центрами извержений (рис. 2), где на сравнительно небольшой территории расположены сопки и грифоны (локальные центры грязевулканической деятельности). При этом можно встретить сопки, незначительно возвышающиеся над окружающим ландшафтом, из которых выделяются газ и жидкий ил, растекающийся тонким слоем и образующий неглубокие лужи, и грязевые озёра меньшей или большей площади (например, вулканоид Центральное озеро). Второй морфотип вулканов — конусовидные холмы, выделяющие достаточно вязкую грязь, которая стекает по склонам (сопка Тищенко).

Рассолы грязевых вулканов относятся к гидрокарбонатно-натриевому типу (гидрокарбонатно-хлоридные натриевые или хлоридно-гидрокарбонатные натриевые), в них повышено содержание брома ($85\text{--}210\text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) и йода ($23\text{--}45\text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) [Матюнина, 2019]. Отмечено непостоянство химического состава рассолов грязевых вулканов: он может существенно изменяться даже в течение нескольких часов. Минерализация извергаемых рассолов не превышает $20\text{--}23\text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ [Каюкова, 2018; Куришко и др., 1968]. Однако следует указать, что в условиях высокой инсоляции и интенсивных ветров из-за испарения воды в вытекших рассолах локально зарегистрированы заметное повышение концентрации и осаждение солей. Минерализация может достигать $110\text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ [Куришко и др., 1968].

В лужах и грязевых озёрах диатомовые образуют плёнку обрастаний характерного бурозелёного цвета (рис. 1А). Плёнка обрастаний располагается как на поверхности жидкой фазы, так и на дне в тех местах, где толщина воды невелика, а основная часть взвеси оказывается осевшей. В зависимости от места нахождения площадь сплошного обрастания может составлять несколько квадратных дециметров и более.

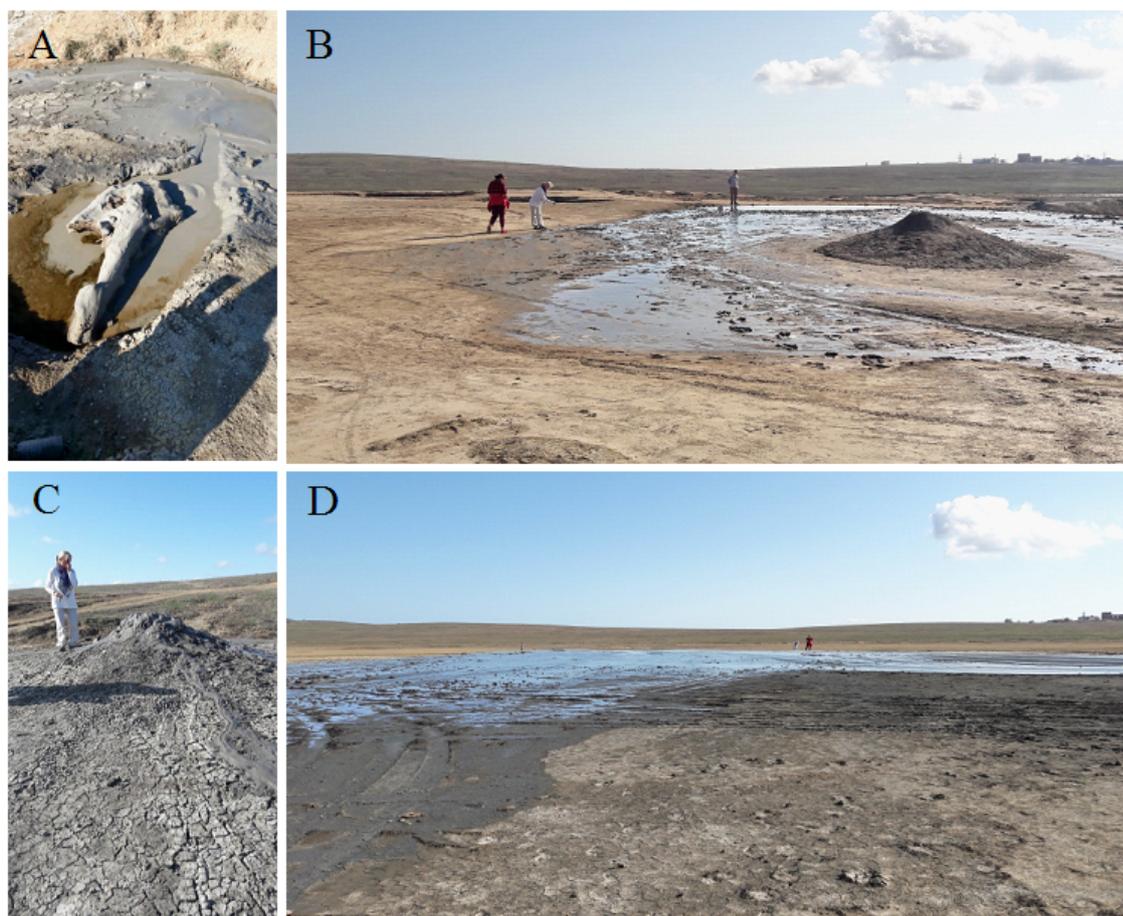


Рис. 1. Грязевые вулканы — сопки Андрусова (А), Павлова (В), Тищенко (С) и Центральное озеро (D) — Булганакского сопочного поля в период отбора проб (Керченский полуостров, Крым)

Fig. 1. The mud volcanoes – Andrusov (A), Pavlov (B), Tishchenko (C), and Central Lake (D) – of the Bulganak mud volcano field during the sampling period (Kerch Peninsula, Crimea)

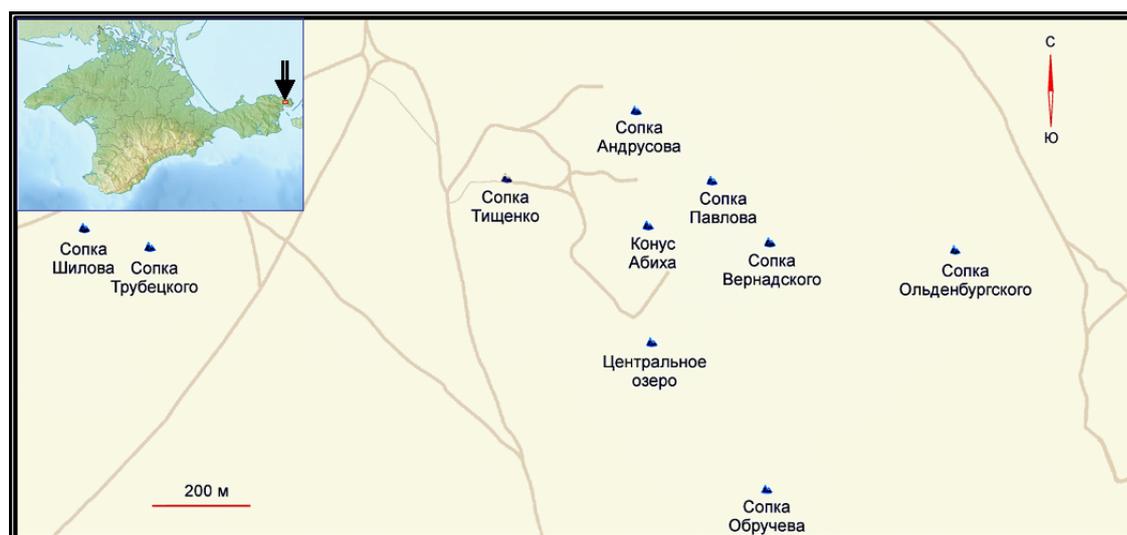


Рис. 2. Схема расположения грязевых вулканов Мало-Тарханского (слева) и Булганакского (справа) сопочных полей (Керченский полуостров, Крым)

Fig. 2. Location map of the mud volcanoes of the Malo-Tarkhan (left cluster) and the Bulganak (right cluster) mud volcano fields (Kerch Peninsula, Crimea)

Из проб, доставленных в лабораторию, используя инвертированные микроскопы Nib-100 (Китай) и «Альтами ИНВЕРТ 3» (Россия), микропипеточным способом выделили одиночные клетки *N. cf. thermaloides* (рис. 3), давшие начало 15 клоновым культурам. Культуры содержали в стеклянных колбах Эрленмейера объёмом 100 мл в модифицированной среде ESAW [Полякова и др., 2018], раз в 10–14 дней осуществляя пересевы в свежую среду. Условия содержания и порядок наименования клонов более подробно описаны в работе [Давидович и др., 2017]. Клоны содержали и скрещивали в стеклянных чашках Петри (диаметр — 40–50 мм) в среде с той же солёностью, при которой они находились во взятых пробах. Исходную солёность модифицированной среды ESAW (36 ‰) доводили до необходимого уровня, разбавляя её дистиллированной водой либо добавляя в неё хлорид натрия. Солёность измеряли рефрактометром RHS-10ATC (Китай). В пробах солёность заметно различалась в зависимости от точки отбора (см. табл. 1). Так, в трёх пробах грязи, вытекшей из вулканической сопки Андрусова, которые были взяты на площади менее 1 м², солёность составила 30, 35 и 68 ‰. Возможно, столь существенные различия обусловлены попавшими в пробу солями, откладывающимися на подстилающей поверхности в связи с испарением воды. В пробе, взятой непосредственно из жерла (вулкан Тищенко), солёность составила 20 ‰.

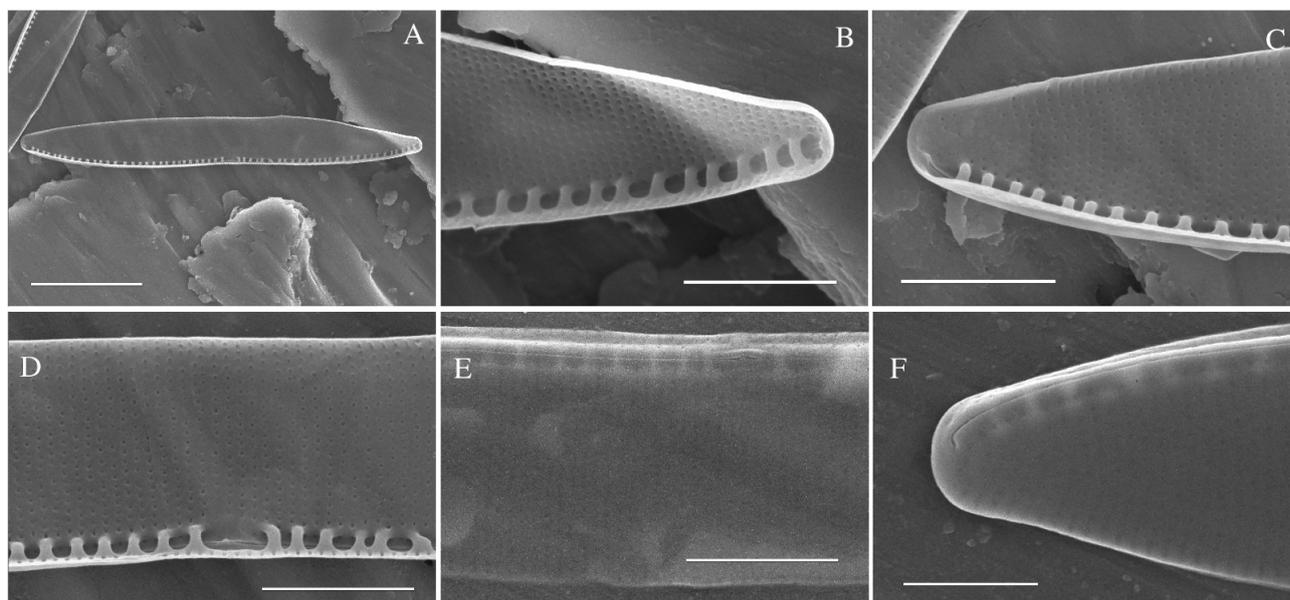


Рис. 3. *Nitzschia cf. thermaloides*, сканирующая электронная микроскопия. Вид створок изнутри (A–D) и снаружи (E–F). Масштабная линейка: A — 10 мкм; B–E — 3 мкм; F — 2 мкм

Fig. 3. *Nitzschia cf. thermaloides*, scanning electron microscopy. Internal (A–D) and external (E–F) valve view. Scale bar: A, 10 μm; B–E, 3 μm; F, 2 μm

Для электронной микроскопии панцири вываривали в перекиси водорода (35 %) и промывали (7–8 раз) дистиллированной водой; затем очищенные створки наносили на предметный столик и покрывали напылением золота. Микрофотографирование проведено с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi SU3500 (Япония). Длину и ширину клеток измеряли с использованием откалиброванной окулярной линейки при непосредственном наблюдении под микроскопом либо с помощью цифровой камеры Moticom 1080 (Китай) и прилагаемого программного обеспечения. Статистическая обработка полученных данных выполнена в Microsoft Excel. Средние значения (M) представлены с указанием ошибки среднего (standard error, SE) и объёма выборки (N): $M \pm SE$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Впервые половое воспроизведение *N. cf. thermaloides* отмечено нами в пробах, залитых питательной средой, ещё до выделения отдельных клонов. Найдены и измерены 17 инициальных клеток, средний апикальный размер которых оказался равным ($68,7 \pm 0,5$) мкм (максимум — 71,0 мкм). Длина лежащих рядом с ними створок пустых раскрывшихся панцирей родительских клеток составила в среднем ($37,4 \pm 0,7$) мкм ($N = 14$; максимум — 40 мкм). Уже по этим предварительным данным можно было заключить, что в процессе полового воспроизведения зарегистрировано двукратное увеличение размера, а длина клеток немногим более 70 мкм, очевидно, близка к максимальной видоспецифической. Последующие измерения клеток (не только из природной популяции, но и полученных в ходе скрещивания выделенных клонов) позволили на значительно большей выборке уточнить размеры, определяющие фазы жизненного цикла *N. cf. thermaloides* (табл. 2).

Таблица 2. Апикальный размер вегетативных, гаметангиальных и инициальных клеток *Nitzschia cf. thermaloides*

Table 2. The apical size of *Nitzschia cf. thermaloides* vegetative, gametangial, and initial cells

Клетки	Объём выборки (N)	Длина клеток, мкм	
		min	max
Вегетативные	1190	15	84
Гаметангиальные	103	33	43
Инициальные	202	56	84

По результатам измерения клеток из природной популяции ($N = 502$) установлено, что их длина варьировала от 15 до 74 мкм. Гистограмма распределения размеров клеток по частоте встречаемости в природной популяции представлена на рис. 4. При скрещивании выделенных клонов получены инициальные клетки, максимальный размер которых составил 84 мкм. Наибольшие гаметангиальные клетки имели длину 43 мкм (52 % максимального размера); это граница перехода из дорепродуктивной в репродуктивную фазу жизненного цикла.

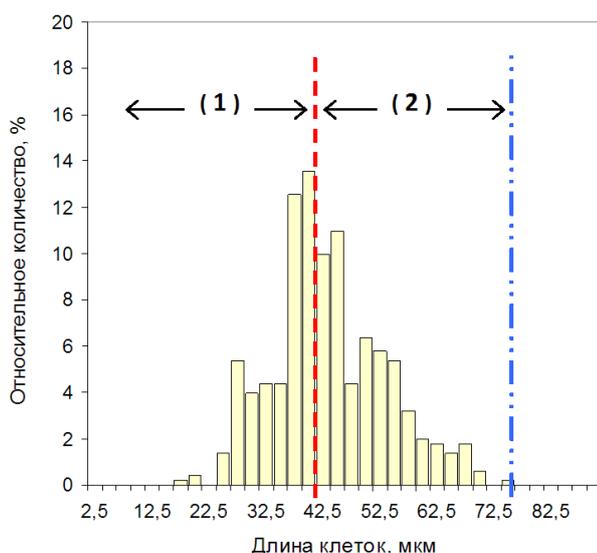


Рис. 4. Распределение длины клеток *Nitzschia cf. thermaloides* ($N = 502$) по частоте встречаемости в природной популяции грязевых вулканов Булганакского сопочного поля. Штрихпунктирная линия определяет максимальный видоспецифический размер. Клетки, размер которых меньше критической границы (штриховая линия), находятся в репродуктивной фазе (1) и представляют собой эффективную долю популяции. Более крупные клетки, размер которых попадает в диапазон между штриховой и штрихпунктирной линиями, находятся в дорепродуктивной фазе жизненного цикла (2)

Fig. 4. Distribution of *Nitzschia cf. thermaloides* cell length ($N = 502$) by frequency of occurrence in the natural population of the mud volcanoes of the Bulganak mud volcano field. The dash-dotted line defines the maximum species-specific size. Cells smaller than the critical limit (a dashed line) are in the reproductive phase (1) and represent the effective fraction of the population. Larger cells, the size of which is between a dashed and a dash-dotted line, are in the pre-reproductive phase of the life cycle (2)

Зарегистрирована прямая корреляция между длиной родительских и дочерних клеток (рис. 5). После выделения клоны в парных сочетаниях были проверены на предмет скрещиваемости/нескрещиваемости. Случайно выделенные из проб 15 клонов оказались репродуктивно совместимыми строго в соответствии со своими типами спаривания. Для выборки из 10 клонов представлена таблица скрещиваний (табл. 3). Клоны распределились по типам спаривания неравномерно, в соотношении 4 : 11.

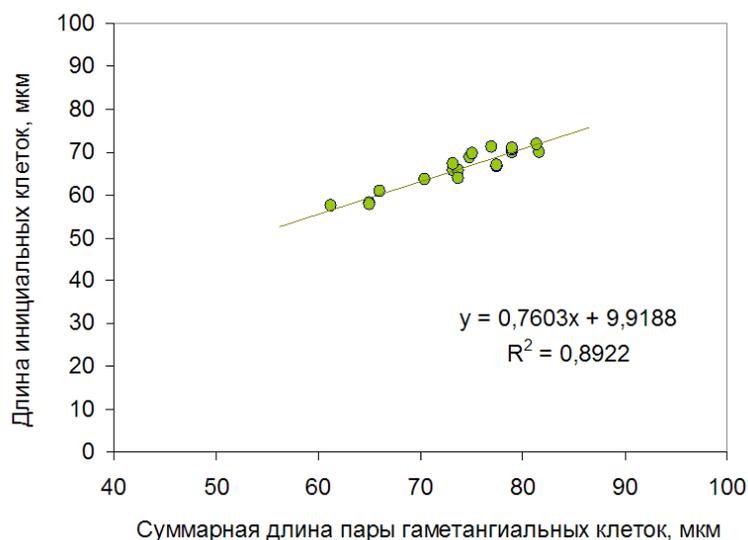


Рис. 5. Зависимость длины инициальных клеток от длины гаметангиальных клеток у *Nitzschia cf. thermaloides* ($N = 18$)

Fig. 5. Dependence of the initial cell length on the gametangial cell length in *Nitzschia cf. thermaloides* ($N = 18$)

Половому процессу у *N. cf. thermaloides* предшествует объединение родительских клеток в пары (рис. 6А), формирование которых можно было наблюдать на вторые сутки после того, как были сделаны смешанные посева. Клетки в парах располагались более или менее параллельно друг другу, показывая устойчивую связь. При этом никакой слизи клетки не выделяли, слизистые капсулы не образовывали. Гаметогенез в родительских клетках (клетках-гаметангиях) обычно начинался на третьи сутки (по завершении полного светотемнового периода) в утренние часы и протекал в парах почти одновременно, но не синхронно. Вначале протопласт клетки сжимался вдоль апикальной оси (рис. 6В). В каждой гаметангиальной клетке в результате трансапикального деления содержимого формировалось по две одинаковых гаметы (рис. 6С). Гаметы слегка увеличивались в размерах, что в большей мере характерно для гамет, сформировавшихся первыми (рис. 6D). По окончании формирования гаметы попарно сливались без какой-либо очерёдности (рис. 6Е, F); в результате образовывались две зиготы. Зиготы начинали биполярный рост, вытягиваясь параллельно апикальной оси створок гаметангиев (рис. 6G). Клетки с этого момента следует называть ауксоспорами (рис. 6H). Растущие ауксоспоры обычно располагались бок о бок более или менее параллельно друг другу и створкам родительских клеток; изредка ауксоспоры выстраивались вдоль одной оси (рис. 6I). Встречались гаметангиальные пары, у которых отсутствовала упорядоченность в ориентации ауксоспор и створок родительских клеток, например вследствие деформации перизониума, обеспечивающего биполярную направленность роста ауксоспор (рис. 6J).

Таблица 3. Таблица скрещиваний (демонстрирует репродуктивную совместимость клонов *Nitzschia cf. thermaloides*, выделенных из грязевых вулканов)

Table 3. Cross-mating table (shows reproductive compatibility of *Nitzschia cf. thermaloides* clones isolated from the mud volcanoes)

Грязевой вулкан	Клон	0.1026-YB	0.1026-YD	0.1020-OA	0.1020-OC	0.1029-YE	0.1029-YF	0.1029-YG	0.1025-YA	0.1020-OE	0.1020-OF
		mt	mt1	mt2	mt1	mt2	mt2	mt2	mt2	mt1	mt2
Андрусова	0.1026-YB	mt1									
Андрусова	0.1026-YD	mt2	3								
Павлова	0.1020-OA	mt1	0	2							
Павлова	0.1020-OC	mt2	2	0	3						
Павлова	0.1029-YE	mt2	3	0	3	0					
Павлова	0.1029-YF	mt2	2	0	–	0	0				
Павлова	0.1029-YG	mt2	3	0	3	0	0	0			
Центральное озеро	0.1025-YA	mt1	0	2	0	2	3	3	3		
Центральное озеро	0.1020-OE	mt2	3	3	3	0	0	0	0	3	
Центральное озеро	0.1020-OF	mt2	2	3	3	0	0	0	0	2	0

Примечание: mt — тип спаривания (mating type); типы спаривания (mt1 и mt2) выделены условно и для удобства восприятия обозначены синим и красным цветом соответственно. В таблице представлены максимальные значения балльной оценки интенсивности аукоспоробразования, полученные в результате 3–5-кратно повторённых экспериментов: 0 — аукоспор не наблюдалось; 1 — единично; 2 — не единично; 3 — массово. Прочерк — нет данных.

Note: mt, mating type; mating types (mt1 and mt2) are distinguished conventionally and marked in blue and red, respectively, for ease of perception. The table shows the maximum scores for the intensity of auxospore formation, obtained as a result of 3–5 times repeated experiments: 0, no auxospores were observed; 1, single auxospores; 2, non-abundant auxospores; 3, mass auxosporulation. Dash indicates lack of data.

При достаточной продолжительности светового периода (октябрь — ноябрь) в этот же день можно было встретить аукоспоры, которые успевали дорасти до максимальных размеров; внутри них начинали откладываться створки инициальных клеток (рис. 6К) — сначала эпитека, а затем, после ацитокинетического митоза, гипотека. Процесс аукоспоробразования продолжался и на четвёртые сутки. Поскольку инициальные клетки переходили к митотическому делению, в смешанных посевах можно было обнаружить как инициальные клетки, недавно покинувшие перизониум (рис. 6L), так и мало отличающиеся от них морфологически первые постинициальные клетки (рис. 6M).

Надо отметить, что сингамия не всегда протекала успешно; иногда сливалась только одна пара гамет, поэтому у некоторых гаметангиальных пар формировалась лишь одна зигота и, соответственно, одна аукоспора. К тому же результату приводило абортное развитие одной из аукоспор. Иногда ни одна пара гамет не могла достичь сингамии, даже в тех редких случаях, когда гаметангиальные клетки образовывали не пары, а триплеты. Однако в целом процесс аукоспоробразования протекал интенсивно; в смешанных посевах можно было наблюдать значительное количество крупных клеток новой генерации.

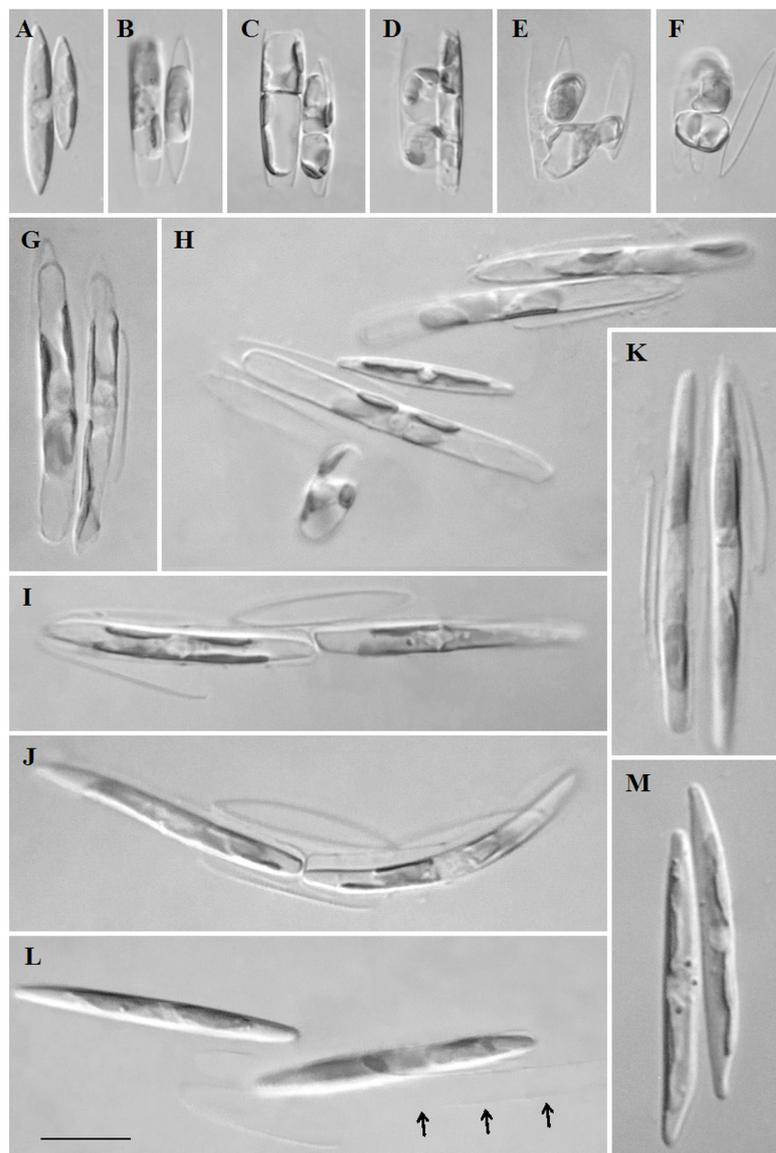


Рис. 6. Процесс полового воспроизведения у *Nitzschia cf. thermaloides*: А — формирование пар гаметангиальных клеток; В — начало формирования гамет, протопласт сжимается вдоль апикальной оси; С — в результате трансапикального деления образуются две одинаковые гаметы; D — гаметы слегка увеличиваются в диаметре; Е, F — гаметы попарно сливаются без какой-либо очерёдности; G — биполярно растущие аукоспоры; H — обычное расположение аукоспор, бок о бок параллельно друг другу и створкам гаметангиев; I — изредка аукоспоры располагаются вдоль одной оси; J — нарушения в развитии ведут к неупорядоченной ориентации аукоспор и створок родительских клеток; K — внутри полностью сформировавшихся аукоспор, достигших размера, близкого к максимальному видоспецифическому, начинают откладываться створки инициальных клеток (вначале эпитека, затем гипотека); L — инициальные клетки, недавно покинувшие перизониум (обозначен стрелками); M — инициальные клетки переходят к нормальным митотическим делениям, давая начало клонам новой генерации. Масштабная линейка: 20 мкм

Fig. 6. The process of *Nitzschia cf. thermaloides* sexual reproduction: A, formation of pairs of gametangial cells; B, the beginning of gamete formation, the protoplast contracts along the apical axis; C, as a result of transapical division, two identical gametes are formed; D, gametes slightly increase in diameter; E, F, gametes fuse in pairs without any order; G, bipolar-growing auxospores; H, usual arrangement of auxospores – side by side and parallel to each other and to the valves of gametangia; I, occasionally, auxospores are located along one axis; J, developmental disorders result in disordered orientation of auxospores and valves of parental cells; K, inside fully formed auxospores, which have reached a size close to the maximum species-specific, the valves of initial cells begin to deposit (first epitheca; then hypotheca); L, initial cells, that recently left the perizonium (indicated by arrows); M, initial cells return to normal mitotic divisions, giving rise to a new generation of clones. Scale bar: 20 μ m

ОБСУЖДЕНИЕ

Теория жизненного цикла диатомовых водорослей разработана достаточно хорошо [Рощин, 1994; Chepurnov et al., 2004; Drebes, 1977; Gastineau et al., 2014; Poulíčková, Mann, 2019; Round et al., 1990 и др.]. Основную часть цикла диатомеи проводят в диплоидном состоянии, осуществляя митотические деления, гаплоидны только гаметы. Половое воспроизведение, сопровождающееся мейозом, является обязательным атрибутом жизненного цикла практически у всех диатомовых водорослей, за редкими исключениями. При этом одна из самых примечательных особенностей диатомеи состоит в том, что их жизненный цикл имеет тесную связь с размерами клеток. Следующие основные положения, касающиеся подавляющего числа видов диатомовых водорослей, необходимо принять во внимание для того, чтобы выполнить анализ изучавшейся нами природной популяции:

- Прохождение жизненного цикла обусловлено изменением размеров клеток.
- В силу особенностей строения и способа формирования панциря апикальный размер у пеннатных водорослей и диаметр клеток у центрических уменьшаются при каждом вегетативном делении; в клонах происходят уменьшение среднего размера и увеличение диапазона варьирования размеров клеток.
- Восстановление исходных (максимальных) размеров клеток в популяции осуществляется в процессе полового воспроизведения за счёт быстрорастущих зигот, называемых ауксоспорами.
- В жизненном цикле можно выделить дорепродуктивную, репродуктивную и пострепродуктивную фазы (последнюю отмечают не у всех видов).
- Продолжительность дорепродуктивной фазы жизненного цикла составляет от нескольких месяцев до нескольких лет в зависимости от вида и от темпа деления клеток.
- Переход из дорепродуктивной в репродуктивную фазу связан с преодолением критического размера (один из кардинальных пунктов жизненного цикла), который у большинства диатомовых близок к половине максимального видоспецифического размера.
- Переход в репродуктивную фазу не означает безусловного вступления в половой процесс, для его реализации необходимо благоприятное сочетание факторов среды и наличие полового партнёра (в случае гетероталлического воспроизведения, которое доминирует у большинства пеннатных диатомовых); большинство клеток, достигших репродуктивной фазы, продолжает делиться вегетативно и уменьшаться в размерах.
- Независимо от размера родительских клеток, ауккоспоры обычно дорастают до размера, близкого к максимальному видоспецифическому. Однако у ряда видов размер дочерних (инициальных) клеток зависит от размера родительских. В таких случаях размер появившихся инициальных клеток может оказаться меньше критической границы, что позволяет им сразу же вступить в половой процесс. В итоге наблюдаются случаи двухстадийного ауккоспорообразования.

Таким образом, в процессе полового воспроизведения в популяции диатомовых происходят два важных события — восстановление исходных размеров клеток и появление новой генерации клонов, имеющих новые генетические «пасьянсы». Следует заметить, что у небольшого числа видов Bacillariophyta (крайне незначительного по сравнению с общим количеством изученных) не происходит изменение размеров клеток при вегетативном делении. Видимо, по этой причине у них никогда не наблюдали полового процесса. К таким видам относятся модельные в других отношениях, но представляющие собой исключение в плане половой репродукции *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin, 1897 и *Thalassiosira pseudonana* Hasle & Heimdal, 1970 — первые две диатомеи, у которых был секвенирован полный геном [Armbrust et al., 2004; Montsant et al., 2005].

Руководствуясь вышеизложенными принципами, можно проанализировать распределение клеток в природной популяции *N. cf. thermaloides* (см. рис. 3) по фазам жизненного цикла. На момент отбора проб немногим более половины клеток в популяции находились в дорепродуктивной фазе. Эффективная доля популяции составила 46 %. В популяции идёт процесс полового воспроизведения, о чём свидетельствуют находки клеток, размер которых близок к максимальному видоспецифическому. Очевидно, что появиться такие клетки могли только в результате полового воспроизведения. Спектр размеров охватывает все фазы жизненного цикла: в равной мере представлены клетки, находящиеся в дорепродуктивной и репродуктивной фазах. Такое состояние популяции можно назвать сбалансированным. Более того, если учесть, что для прохождения всего жизненного цикла диатомеям требуется обычно несколько лет [Mann, 1988], мы вправе заключить, что популяция *N. cf. thermaloides* не является эфемерной и находится в данном месте уже достаточно продолжительное время.

Ещё раз подтвердилась свойственная большинству диатомовых водорослей тенденция: граница размеров (кардинальный пункт), переходя которую клетки оказываются в репродуктивной фазе, близка к половине максимального видоспецифического размера (у большинства изученных видов она находится в диапазоне от 45 до 55 %) [Davidovich, 2000]. Следствием обнаруженной положительной корреляции между длиной родительских и дочерних клеток (см. рис. 4) будет неодинаковая продолжительность жизненного цикла отдельных клонов.

Изогамное половое воспроизведение, сопровождающееся формированием двух гамет в каждой клетке-гаметангии, отмечено не менее чем у 15 родов диатомовых, филогенетически как близких к роду *Nitzschia* Hassall, 1845 (например, *Achnanthes* Bory, 1822), так и далёких от него (к примеру, *Dickieia* Berkeley ex Kützing, 1844 или *Berkeleya* Greville, 1827), судя по наиболее масштабному на сегодня филогенетическому дереву, построенному по данным для 11 генов у 1151 таксона диатомей [Nakov et al., 2018]. Однако, помимо количества гамет и их поведения, важную роль в классификации типов полового процесса играют такие детали, как наличие или отсутствие копуляционной слизи, выделяемой клетками-гаметангиями; деление протопласта клетки в апикальной или трансапикальной плоскости в процессе формирования гамет и наличие или отсутствие перегруппировки последних; направление движения гамет; взаимная ориентация осей ауксоспор и створок гаметангиальных клеток. Приняв во внимание все детали, половой процесс, наблюдавшийся у *N. cf. thermaloides*, можно отнести к категории IB2a по классификации Гайтлера [Geitler, 1973].

В системе скрещивания вида главенствует гетероталлизм. Возможно, он является единственным путём воспроизведения, если учесть, что до настоящего времени случаев гомоталлизма в клоновых культурах не обнаружено.

В будущем предстоит изучить отношение *N. cf. thermaloides* к достаточно переменным, для многих других диатомовых экстремальным, условиям температуры и высокой солнечной радиации, а также установить пределы галотолерантности этого вида, обитающего в условиях сравнительно высокой солёности, которая характерна для луж и озёр грязевых вулканов.

Заключение. *Nitzschia cf. thermaloides* представлена в водоёмах, образованных выбросами грязевых вулканов Керченского полуострова, стабильной популяцией, в которой присутствуют клетки, находящиеся во всех фазах жизненного цикла: дорепродуктивной, репродуктивной и пострепродуктивной. Анализ размерного распределения клеток в популяции, который стал возможен благодаря установленным кардинальным пунктам жизненного цикла, показал, что популяция не является эфемерной и способна воспроизводиться в поколениях, несмотря на экстремальные условия существования.

Работа выполнена в рамках государственного задания КНС — ПЗ РАН — филиала ФИЦ ИнБЮМ «Изучение фундаментальных физических, физиолого-биохимических, репродуктивных, популяционных и поведенческих характеристик морских гидробионтов» (№ гос. регистрации 121032300019-0). Выделение клонов, измерения, наблюдения выполнены с использованием микроскопов, цифровых камер, лабораторной посуды и программного обеспечения, приобретённых за счёт средств грантов Российского фонда фундаментальных исследований «Получение данных о репродуктивной биологии рода *Ardissonaea*, критически важных для понимания филогении диатомовых» (№ 15-04-00237_a) и «Изучение видоспецифичности эволюционного перехода от оогамии к неоогамному половому воспроизведению у полярных центральных диатомей (*Mediophyceae*)» (№ 19-04-00070_a).

Благодарность. Выражаем признательность коллегам из ФИЦ ИнБЮМ, Л. И. Рябушко и её соавторам, за пионерную работу, вдохновившую нас на проведение данного исследования, а также В. Н. Лишаеву — за помощь при микрофотографировании на СЭМ. Благодарны водителю Карадагской научной станции В. В. Сироте — неизменному участнику экспедиций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абдуллин Ш. Р., Багмет В. Б. Миксотрофия цианобактерий и водорослей в условиях пещер // *Журнал общей биологии*. 2016. Т. 77, № 1. С. 54–62. [Abdullin Sh. R., Bagmet V. B. Mixotrophy of cyanobacteriae and algae inhabiting caves. *Zhurnal obshchei biologii*, 2016, vol. 77, no. 1, pp. 54–62. (in Russ.)]
2. Давидович Н. А., Давидович О. И., Подунай Ю. А. Коллекция культур диатомовых водорослей Карадагской научной станции (Крым) // *Морской биологический журнал*. 2017. Т. 2, № 1. С. 18–28. [Davidovich N. A., Davidovich O. I., Podunay Yu. A. Diatom culture collection of the Karadag scientific station (Crimea). *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2017, vol. 2, no. 1, pp. 18–28. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.1.03>
3. Каюкова Е. П. Химический состав жидкой фазы грязевых сопкок северо-восточной части Керченского полуострова (Восточный Крым) // *Геология, геоэкология, эволюционная география* : коллективная монография. Т. 17 / под ред. Е. М. Нестерова, В. А. Снытко. Санкт-Петербург : Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2018. С. 186–190. [Kaiukova E. P. Khimicheskii sostav zhidkoi fazy gryazevykh sopok severo-vostochnoi chasti Kerchenskogo poluostrova (Vostochnyi Krym). In: *Geologiya, geoekologiya, evolyutsionnaya geografiya* : collective monograph. Vol. 17 / E. M. Nesterov, V. A. Snytko (Eds). Saint Petersburg : Izd-vo RGPU im. A. I. Gertsena, 2018, pp. 186–190. (in Russ.)]
4. Куришко В. А., Месяц И. А., Тердовидов А. С. Гидрогеология грязевого вулканизма Керченского полуострова // *Геологический журнал*. 1968. Т. 8, вып. 1. С. 49–59. [Kuri-shko V. A., Mesyats I. A., Terdovidov A. S. Hidrogeologiya gryazevogo vulkanizma Kerchenskogo poluostrova. *Geologicheskii zhurnal*, 1968, vol. 8, iss. 1, pp. 49–59. (in Russ.)]
5. Матюнина В. А. Химический состав рассолов Булганакского и Мало-Тарханского сопочных полей (Восточный Крым) // *Материалы Международного молодёжного научного форума «Ломоносов-2019»* / отв. ред. И. А. Алешковский, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов. Москва : МАКС Пресс, 2019. С. 1–2. [Matyunina V. A. Khimicheskii sostav rassolov Bulganakskogo i Malo-Tarkhanskogo sopochnykh polei (Vostochnyi Krym) // *Materialy Mezhdunarodnogo molodezhnogo nauchnogo foruma “Lomonosov-2019”* / I. A. Aleshkovsky, A. V. Andriyanov, E. A. Antipov (Eds). Moscow : MAKS Press, 2019, pp. 1–2. (in Russ.)]. URL: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2019/data/15896/92330_uid343668_report.pdf [accessed: 11.11.2020].
6. Неврова Е. Л., Шадрин Н. В. Донные диатомовые водоросли солёных озёр Крыма // *Морской экологический журнал*. 2005. Т. 4, № 4. С. 61–71. [Nevrova E. L., Shadrin N. V. Benthic diatoms in Crimean saline lakes. *Morskoy ekologicheskij zhurnal*, 2005, vol. 4, no. 4, pp. 61–71. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/821>
7. Никулина Т. В. Водоросли горячих источников Курильских островов (Россия) // *Альгология*. 2010. Т. 20, № 3. С. 334–356.

- [Nikulina T. V. Biodiversity of algae of hot springs from Kuril Islands (Russia). *Al'gologia*, 2010, vol. 20, no. 3, pp. 334–356. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v12.i4.10>
8. Полякова С. Л., Давидович О. И., Подунай Ю. А., Давидович Н. А. Модификация среды ESAW, используемой для культивирования морских диатомовых водорослей // *Морской биологический журнал*. 2018. Т. 3, № 2. С. 73–80. [Polyakova S. L., Davidovich O. I., Podunay Yu. A., Davidovich N. A. Modification of the ESAW culture medium used for cultivation of marine diatoms. *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2018, vol. 3, no. 2, pp. 73–80. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2018.03.2.06>
 9. Рошин А. М. *Жизненные циклы диатомовых водорослей*. Киев : Наукова думка, 1994. 171 с. [Roshchin A. M. *Zhiznennyye tsikly diatomovykh vodoroslei*. Kyiv : Naukova dumka, 1994, 171 p. (in Russ.)]
 10. Рябушко Л. И., Бондаренко А. В. Микроводоросли грязевого вулкана Булганакского сопочного поля Крымского полуострова // *Морской биологический журнал*. 2020. Т. 5, № 1. С. 64–77. [Ryabushko L. I., Bondarenko A. V. Microalgae of mud volcano of the Bulganak sopochnoe field on the Crimean Peninsula. *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2020, vol. 5, no. 1, pp. 64–77. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2020.05.1.07>
 11. Сеничева М. И., Губелит Ю. И., Празукин А. В., Шадрин Н. В. Фитопланктон гиперсолёных озёр Крыма // *Микроводоросли Чёрного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования* / под ред. Ю. Н. Токарева, З. З. Финенко, Н. В. Шадрин ; НАН Украины, Институт биологии южных морей. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 93–99. [Senicheva M. I., Gubelit Yu. I., Prazukin A. V., Shadrin N. V. Fitoplankton gipersolenykh ozer Kryma // *The Black Sea Microalgae: Problems of Biodiversity Preservation and Biotechnological Usage* / Yu. N. Tokarev, Z. Z. Finenko, N. V. Shadrin (Eds) ; NAS of Ukraine, Institute of Biology of the Southern Seas. Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2008, pp. 93–99. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5521>
 12. Armbrust E. V., Berges J. A., Bowler Ch., Green B. R., Martinez D., Putnam N. H., Zhou Sh., Allen A. E., Apt K. E., Bechner M., Brzezinski M. A., Chaal B. K., Chiovitti A., Davis A. K., Demarest M. S., Detter J. Ch., Glavina T., Goodstein D., Hadi M. Z., Hellsten U., Hildebrand M., Jenkins B. D., Jurka J., Kapitonov V. V., Kröger N., Lau W. W. Y., Lane T. W., Larimer F. W., Lippmeier J. C., Lucas S., Medina M., Montsant A., Obornik M., Parker M. Sch., Palenik B., Pazour G. J., Richardson P. M., Rynearson T. A., Saito M. A., Schwartz D. C., Thamtrakoln K., Valentin K., Vardi A., Wilkerson F. P., Rokhsar D. S. The genome of the diatom *Thalassiosira pseudonana*: Ecology, evolution, and metabolism. *Science*, 2004, vol. 306, iss. 5693, pp. 79–86. <https://doi.org/10.1126/science.1101156>
 13. Drebes G. Sexuality. In: *The Biology of Diatoms* / D. Werner (Ed.). Oxford : Blackwell Scientific Publications, 1977, pp. 250–283. (Botanical Monographs ; vol. 13).
 14. Chepurnov V. A., Mann D. G., Sabbe K., Vyverman W. Experimental studies on sexual reproduction in diatoms. *International Review of Cytology*, 2004, vol. 237, pp. 91–154. [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(04\)37003-8](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(04)37003-8)
 15. Davidovich N. A. Species-specific sizes and size range of sexual reproduction in diatoms. In: *Proceedings of the 16th International Diatom Symposium*, Greece, 25 August – 1 September, 2000 / A. Economou-Amilli (Ed.). Greece : University of Athens, 2000, pp. 191–196.
 16. Gastineau R., Davidovich N. A., Hallegraeff G. M. Reproduction in microalgae. In: *Reproductive Biology of Plants* / K. G. Ramawat, J.-M. Mérillon, K. R. Shivanna (Eds). Boca Raton : CRC Press, 2014, pp. 1–28. <https://doi.org/10.1201/b16535>
 17. Geitler L. Auxosporenbildung und Systematik bei pennaten Diatomeen und die Cytologie von *Cocconeis*-Sippen. *Österreichische Botanische Zeitschrift*, 1973, vol. 122, no. 5, pp. 299–321.
 18. Mann D. G. Why didn't Lund see sex in *Asterionella*? A discussion of the diatom life cycle in nature. In: *Algae and the Aquatic Environment: Contributions in Honour of J. W. G. Lund* / F. E. Round (Ed.). Bristol, UK : Biopress Ltd., 1988, pp. 384–412.
 19. Montsant A., Jabbari K., Maheswari U., Bowler C. Comparative genomics of the pennate diatom

- Phaeodactylum tricornutum*. *Plant Physiology*, 2005, vol. 137, iss. 2, pp. 500–513. <https://doi.org/10.1104/pp.104.052829>
20. Nakov T., Beaulieu J. M., Alverson A. J. Accelerated diversification is related to life history and locomotion in a hyperdiverse lineage of microbial eukaryotes (diatoms, Bacillariophyta). *New Phytologist*, 2018, vol. 219, iss. 1, pp. 462–473. <https://doi.org/10.1111/nph.15137>
21. Peletier H., Gieskes W. W. C., Buma A. G. J. Ultraviolet-B radiation resistance of benthic diatoms isolated from tidal flats in the Dutch Wadden Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, vol. 135, pp. 163–168. <https://doi.org/10.3354/meps135163>
22. Poulíčková A., Mann D. G. Diatom sexual reproduction and life cycles. In: *Diatoms: Fundamentals and Applications* / J. Seckbach, R. Gordon (Eds). Hoboken, New Jersey : Wiley ; Salem, Massachusetts : Scrivener Publishing LLC, 2019, pp. 245–272. <https://doi.org/10.1002/9781119370741.ch11>
23. Round F. E., Crawford R. M., Mann D. G. *The Diatoms. Biology and Morphology of the Genera*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1990, 747 p.

REPRODUCTIVE BIOLOGY AND THE LIFE CYCLE OF THE DIATOM *NITZSCHIA* CF. *THERMALOIDES* INHABITING MUD VOLCANOES OF CRIMEA

N. A. Davidovich, O. I. Davidovich, and Yu. A. Podunay

T. I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of RAS – Branch of IBSS,
Feodosiya, Russian Federation
E-mail: nickolaid@yandex.ru

In biology, it is important to study the ability of organisms to exist under extreme conditions, to which the phase of the life cycle, related to sexual reproduction and the possibility to leave the next generation, is especially sensitive. *Nitzschia* cf. *thermaloides* Hustedt was found in high abundance in samples from puddles and lakes formed in the areas of action of mud volcanoes of the Bulganak mud volcano field (Kerch Peninsula, Crimea). Individual clones were isolated from the samples by the micropipette technique and introduced into a culture; their crossing made it possible to initiate heterothallic sexual reproduction. The aim of this work was to study reproductive biology and the life cycle of the alga from a biotope with extremely high levels of irradiance, temperature, and salinity. For the first time for this species, a description of the sexual process corresponding to IB2a type according to Geitler classification is given. The cardinal points have been defined, which represent critical cell sizes that determine the transition from one phase of the life cycle to another. The full range of cell sizes is given, from the initial ones that appeared as a result of sexual reproduction to the smallest ones observed when kept in the culture. The main postulates of the life-cycle theory are considered allowing to analyze the natural population of the alga. The population of *N. cf. thermaloides* was found to exist in the sampling site for a long time and to be represented by cells in all phases of the life cycle.

Keywords: diatoms, *Nitzschia* cf. *thermaloides*, mud volcanoes, sexual reproduction, life cycle

УДК 574.5(262.5)

**СОСТОЯНИЕ ИХТИО-, МЕЗО- И МАКРОПЛАНКТОННЫХ КОМПЛЕКСОВ
У КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА (ЧЁРНОЕ МОРЕ)
В СВЯЗИ С ОСОБЕННОСТЯМИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА
В ОКТЯБРЕ 2016 Г.**

© 2023 г. Т. Н. Климова¹, Б. Е. Аннинский¹, А. А. Субботин¹,
И. В. Вдодович¹, П. С. Подрезова

¹ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Российская Федерация
E-mail: tnklim@mail.ru

Поступила в редакцию 14.07.2020; после доработки 20.11.2020;
принята к публикации 16.02.2023; опубликована онлайн 31.05.2023.

Климатические изменения в гидрологическом режиме Чёрного моря, отмечаемые с 1990-х гг., отразились на состоянии эпипелагических комплексов морских организмов, прежде всего на сезонной изменчивости их биологических циклов. Это оказало существенное влияние на фенологию нереста природных популяций рыб, видовое разнообразие и пространственное распределение ихтиопланктона, а также на устоявшиеся трофические взаимоотношения в планктонном сообществе. В конечном итоге характер взаимодействия между различными звеньями трофической цепи в эпипелагических комплексах, их сезонная и межгодовая изменчивость влияют на эффективность нереста рыб, прежде всего массовых промысловых видов, и в значительной степени определяют успех пополнения их будущих поколений. С целью изучения видового состава, численности и пространственного распределения ихтиопланктона в октябре 2016 г. (89-й рейс НИС «Профессор Водяницкий», 30 сентября — 19 октября) были проведены исследования в шельфовых и открытых водах Чёрного моря у Крымского полуострова, проанализированы не только икра и личинки рыб, но и биомасса мезо- и макропланктона. Пробы ихтио- и макропланктона отбирали сетью Богорова — Расса (площадь входного отверстия — 0,5 м²; ячей — 300 мкм) методом тотальных вертикальных ловов от дна до поверхности моря в области шельфа и от нижней границы кислородной зоны до поверхности моря в глубоководной части. Ихтиопланктон фиксировали 4%-ным раствором формалина и анализировали позже под микроскопом, определяя таксономический состав организмов и по возможности — наличие и состав пищи в кишечниках личинок рыб. Проанализированы данные о видовом составе и пространственном распределении ихтио-, мезо- и макропланктона, а также о питании личинок рыб Чёрного моря у Крымского полуострова в октябре 2016 г. Период съёмки соответствовал начальной фазе осеннего гидрологического сезона. Ихтиопланктон был представлен икрой и личинками 9 видов тепловодных и 6 видов умеренноводных рыб. Средняя численность икры рыб составляла 2,92, а личинок — 3,56 экз.·м⁻². Низкая доля (30 %) мёртвой икры тепловодной хамсы *Engraulis encrasicolus*, а также наличие её разноразмерных личинок в море свидетельствовали о продолжении результативного нереста. Биомасса зоопланктона возрастала в направлении от шельфа к глубоководным районам. Мелкоразмерные фракции планктонных организмов преобладали на шельфе, обеспечивая здесь лучшие кормовые условия для выживания личинок рыб. Несмотря на значительную биомассу желтелых-планктофагов в октябре 2016 г., их влияние на ихтиопланктонные комплексы Чёрного моря, по-видимому, оставалось несущественным.

Ключевые слова: ихтиопланктон, мезопланктон, желтелый макропланктон, питание личинок рыб, видовое разнообразие, пространственное распределение, Чёрное море

Изменение климата — один из основных факторов, влияющих на фенологию нереста, пространственное распределение, видовую структуру и трофические взаимоотношения в морских экосистемах [Richardson et al., 2009; Robinson et al., 2014; Turan et al., 2016; Vinogradov et al., 1999]. Повышение температуры в морях с хорошо выраженной сезонностью, в том числе в Чёрном море, привело к инверсии жизненных циклов, смещению сроков размножения и расширению видового разнообразия гидробионтов на всех трофических уровнях — от первичных продуцентов до хищников [Auth et al., 2017; Fincham et al., 2013; McQueen, Marshall, 2017; Parsons, Lalli, 2002; Purcell et al., 2007]. Осенний гидрологический сезон (октябрь — ноябрь) обычно характеризуется перестройкой системы поверхностных течений от летнего типа циркуляции к зимнему и отличается максимальными временными градиентами температуры поверхности воды в море [Артамонов и др., 2018; Трощенко, Субботин, 2018]. Своеобразие осеннего ихтиопланктона состоит в том, что он может быть образован как тепловодными, так и умеренноводными видами рыб. В октябре начинается нерест умеренноводных рыб, икра которых доминирует в ихтиопланктоне, и продолжается нерест тепловодных видов, однако малочисленность живой икры и отсутствие личинок младших возрастных групп свидетельствуют о его безрезультативности. На шельфе и в глубоководных участках моря в октябре обычны икра умеренноводных *Sprattus sprattus* (Linnaeus, 1758) и *Merlangius merlangus* (Linnaeus, 1758), личинки *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758) старших возрастных групп и молодь *Syngnathus schmidti* Попов, 1928, единично встречаются икра, личинки и молодь прибрежных видов, вынесенных сюда течением [Гордина и др., 1991; Дехник, 1973; Дехник, Павловская, 1979; Климова и др., 2010].

Для желтелого макропланктона осенний гидрологический сезон важен по ряду причин: для сцифомедузы *Aurelia aurita* (Linnaeus, 1758) это знаковый этап, характеризующий успешность весенней генерации; для *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz, 1865 это период максимальной элиминации особей под влиянием *Beroe ovata* Bruguière, 1789 [Finenko et al., 2003]. Для многих видов мезозоопланктона октябрь — период активного роста и размножения на фоне ослабленного хищничества гребневиков. Хотя со снижением численности *M. leidyi* в планктонном сообществе отмечена тенденция возрастания трофической роли медуз, их хищнический пресс на зоопланктон в последние годы обычно не достигает критического порога для сохранения популяций жертв [Аннинский и др., 2016].

К сожалению, черноморский ихтиопланктон в шельфовых и открытых водах Чёрного моря в начале осеннего гидрологического сезона практически не анализировали в связи с его низкой численностью и видовым разнообразием [Дехник, Павловская, 1979; Климова и др., 2010, 2019; Klimova, Podrezova, 2018]. Последние опубликованные данные по комплексным ихтио-, мезо- и макропланктонным исследованиям в западном секторе Чёрного моря, включая район Крымского полуострова, относятся к октябрю 2005 г. [Климова и др., 2010]. Именно поэтому результаты комплексных планктонных исследований, проведённых в октябре 2016 г. как в шельфовых, так и в глубоководных районах Чёрного моря у Крымского полуострова, от мыса Тарханкут до Керченского пролива, в период перехода от летнего к осеннему гидрологическому сезону представляют определённый интерес.

Цель работы — проанализировать видовой состав, численность и пространственное распределение ихтио-, мезо- и желтелого макропланктона в октябре 2016 г. на фоне климатической изменчивости гидрологического режима вод Чёрного моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Планктонные исследования проводили в 89-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (30 сентября — 19 октября 2016 г.) в шельфовых и глубоководных районах Чёрного моря у Крымского полуострова в западном (от мыса Тарханкут до города Алупки) и восточном секторе (от мыса Меганом до Керченского пролива) в акватории с координатами от N43.22° до N45.15° и от E31.24° до E36.26° (рис. 1).

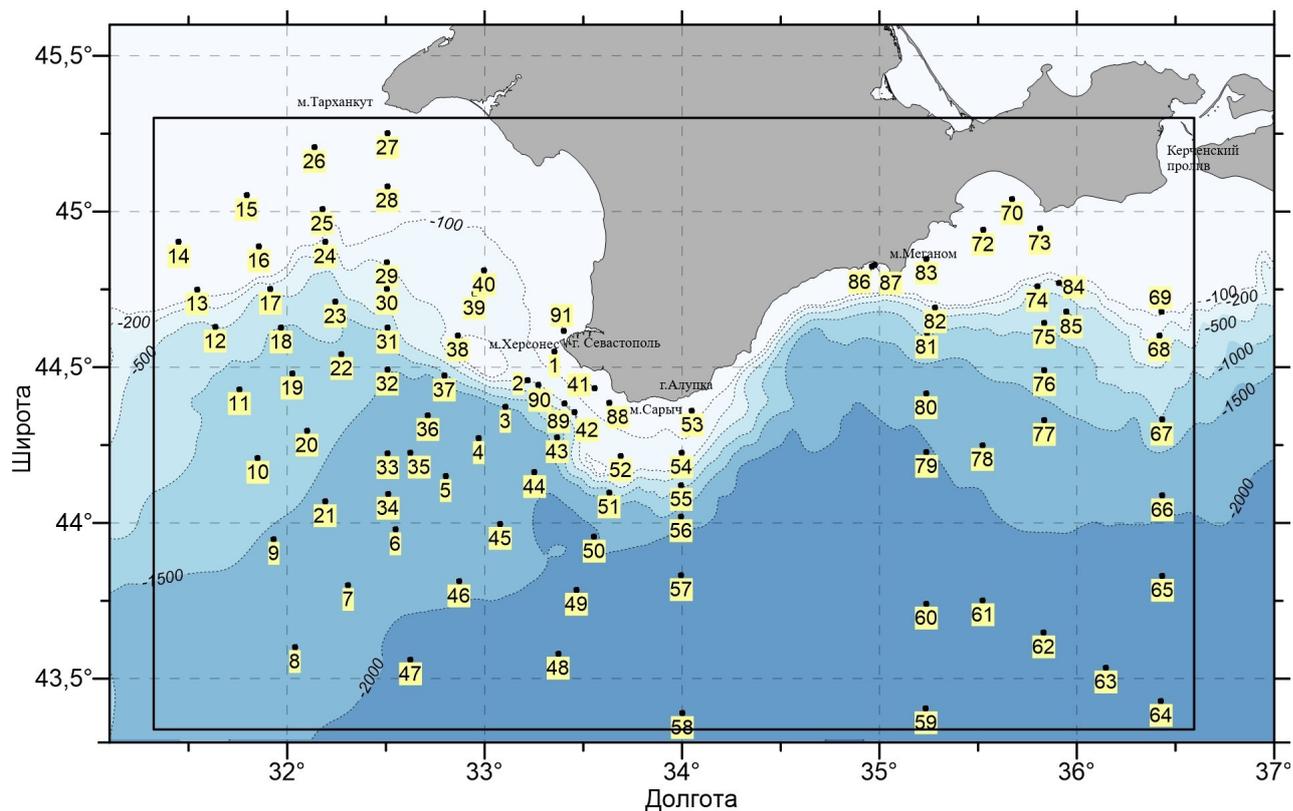


Рис. 1. Схема района исследований и выполненных станций в 89-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий»

Fig. 1. Schematic map of sampling stations in the 89th cruise of the RV “Professor Vodyanitsky”

Отбор проб икhtiо- и макропланктона, а также крупного рачкового планктона (*Calanus euxinus* Hulsemann, 1991) производили обратноконической сетью Богорова — Расса (БР-80/113; площадь входного отверстия — 0,5 м²; ячей — 300 мкм), а отбор всего мезозoopланктона осуществляли сетью Джеди (площадь входного отверстия — 0,1 м²; ячей — 112 мкм). Планктонные пробы собирали в режиме вертикальных ловов от дна до поверхности моря в области шельфа и от нижней границы кислородной зоны ($\sigma_t = 16,2$ по данным зонда Sea-Bird 911plus) до поверхности моря — в его глубоководной части.

Сеть БР-80/113 пробы отбирали в одной повторности на 62 станциях, в том числе на 39 станциях в районах глубоководной (> 200 м) эпипелагиали, на 19 станциях в районах внешнего шельфа (50–200 м) и на 4 станциях в районах внутреннего шельфа (< 50 м). Крупный желетельный макропланктон отфильтровывали через сито с ячейей 4 мм из свежесобранных проб и анализировали *in vivo* непосредственно на борту судна на предмет таксономического состава, численности и орально-аборальной длины тела гребневиков и диаметра зонтика медузы. Оставшуюся планктонную фракцию, включающую мелких (< 5 мм) желетелых, мезо- и икhtiопланктон, фиксировали и обрабатывали в стационарных условиях. Видовой состав и численность ранних размерно-возрастных стадий развития желетелых, крупных копепод и икhtiопланктона определяли под МБС-10 при увеличении 8 × 2; 8 × 4. Массу тела организмов рассчитывали по известным линейно-весовым соотношениям [Аннинский и др., 2013]. Икру и личинок рыб идентифицировали по [Дехник, 1973; D’Ancona, 1933; Russell, 1976].

Мезопланктон собирали сетью Джеди в двух повторностях в районе внешнего шельфа (ст. 1, N44.56°, E33.34°) и в глубоководной части моря (ст. 3, N44.37°, E33.07°), фиксировали и идентифицировали в стационарных условиях под микроскопом (рис. 1).

Фиксацию всех планктонных проб проводили в 4%-ном забуференном боратами растворе формалина.

Исследование питания личинок рыб проводили на фиксированном материале по методике Л. А. Дуки и В. И. Синюковой [1976]. Личинки разделены на размерные группы: хамса — по [Дехник, 1960], пелагическая игла-рыба — по [Гордина и др., 1991].

По формулам, предложенным Ю. Одумом [1986], рассчитаны показатели индексов разнообразия — видового разнообразия [Shannon, Weaver, 1949], видового богатства [Simpson, 1949], доминирования [Margalef, 1958] и выравненности [Pielou, 1966].

Для анализа гидрологического режима и структуры поверхностных течений использовали экспедиционные данные вертикальных зондирований гидролого-гидрохимическим зондирующим комплексом Sea-Bird 911plus CTD и данные акустического доплеровского профилографа течений (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) 300 kHz WorkHouse [Артамонов и др., 2018]. В качестве дополнительной информации привлекали материалы спутниковых наблюдений за температурой поверхности моря (далее — ТПМ) и карты геострофических и поверхностных течений [Морской портал Морского гидрофизического института, 2020; Copernicus Marine Service, 2019; National Center for Environmental Information, 2018] за август — октябрь 2016 г., а также данные регулярных наблюдений за температурой и солёностью вод в прибрежных районах Севастополя и Карадага [Троценко, Субботин, 2018; Троценко и др., 2019].

Сопряжённость распределения исследуемых планктонных компонентов и некоторых абиотических факторов среды (температуры и солёности морской воды) оценивали методом ANOSIM в статистической программе PAST 4.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенности гидрологического режима. Период съёмки (30 сентября — 19 октября 2016 г.) соответствовал начальной фазе осеннего гидрологического сезона. Интенсивное выхолаживание верхнего слоя моря с градиентами температуры более $3\text{--}3,5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{мес.}^{-1}$ началось в третьей декаде сентября и продолжалось до середины декабря [Артамонов и др., 2018; Морской портал Морского гидрофизического института, 2020; Троценко, Субботин, 2018; Троценко и др., 2019; Copernicus Marine Service, 2019; National Center for Environmental Information, 2018]. Хотя осенний гидрологический сезон характеризуется перестройкой системы поверхностных течений от летнего типа циркуляции к зимнему, данные спутниковых наблюдений за предшествующий период и во время съёмки, расчёты геострофической циркуляции [Морской портал Морского гидрофизического института, 2020; Copernicus Marine Service, 2019; National Center for Environmental Information, 2018], а также инструментальные наблюдения [Артамонов и др., 2018] свидетельствуют о том, что система циркуляции поверхностных вод в исследуемой акватории в первой декаде октября 2016 г. соответствовала летней с сохранением её основных особенностей [Климова и др., 2019]. Активное меандрирование струи Основного черноморского течения вдоль континентального склона способствовало сохранению двух квазистационарных синоптических образований: Севастопольского антициклона (далее — СевАЦ) над большой топографической ложбиной к западу от Гераклеийского полуострова и Крымского антициклона (далее — КрАЦ) на шельфе к югу от Феодосийского залива [Иванов, Белокопытов, 2011]. Южнее зоны Основного черноморского течения в западном и восточном секторах наблюдений прослеживались периферийные области западного и восточного ядер основного циклонического круговорота (далее — ОЦК) со слабыми и неустойчивыми течениями (рис. 2).

Общую картину сезонного пространственного распределения ТПМ с тенденцией повышения её значений с северо-запада (областей наиболее раннего и интенсивного понижения ТПМ) на восток нарушил сильный шторм 9–10 октября (рис. 2). В результате во второй декаде

октября фоновые значения ТПМ во всей акватории исследований понизились на 2–3 °С [Артамонов и др., 2018]. Таким образом, в западном секторе до шторма область повышенных значений ТПМ (+21,0...+21,5 °С) соответствовала зоне СевАЦ, а область минимальных значений ТПМ (+19,0...+19,5 °С) была ограничена небольшим районом шельфа северо-западной части моря [Артамонов и др., 2018] (рис. 3).

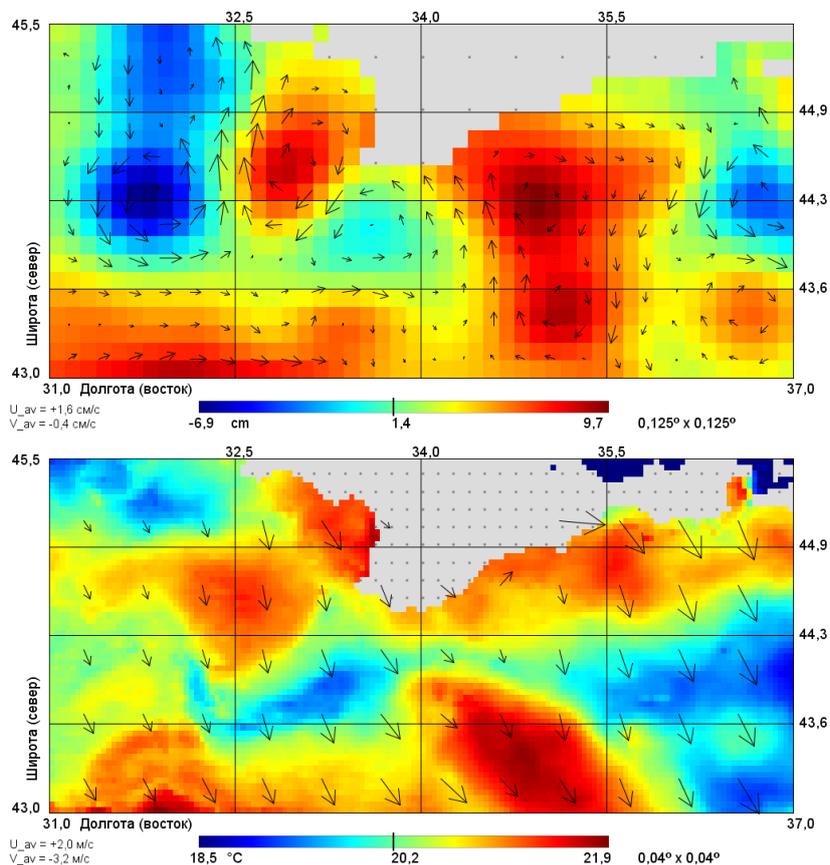


Рис. 2. Композиционные карты геострофических течений (вверху) и температуры поверхности моря (внизу) 20–30 сентября 2016 г. [Copernicus Marine Service, 2019; National Center for Environmental Information, 2018]

Fig. 2. Compositional maps of geostrophic currents (top) and sea surface temperature (bottom), 20–30 September, 2016 [Copernicus Marine Service, 2019; National Center for Environmental Information, 2018]

В восточном секторе исследований ихтиопланктон собирали во второй декаде октября 2016 г. Фоновые значения ТПМ понизились после шторма до +16...+16,5 °С, а в шельфовой зоне района от мыса Сарыч до Севастополя — до +17 °С (рис. 4).

На фоне сезонного выхолаживания поверхностного слоя моря и усиления ветро-волнового перемешивания толщина верхнего квазиоднородного слоя повсеместно увеличилась по сравнению с таковой в летний период. Максимальные значения толщины верхнего квазиоднородного слоя (до 28–30 м) отмечены в зоне СевАЦ и КраАЦ, а минимальные (до 12–16 м) — в зонах подъёма вод на северных перифериях западного и восточного ядер ОЦК.

Холодный промежуточный слой во всей исследуемой акватории существенно отличался от «классического» [Иванов, Белокопытов, 2011] по значениям температуры в ядре. Диапазон её пространственной изменчивости составил 8,30–8,52 °С: до 8,30–8,36 °С (минимальные значения) — в зонах подъёма вод на периферии ОЦК; 8,42–8,44 °С — в СевАЦ; до 8,5–8,52 °С — в КраАЦ. Изменчивость глубины залегания ядра холодного промежуточного слоя также соответствовала положению основных циркуляционных структур. Максимальное заглубление (до 85–90 м) зафиксировано над большой топографической ложбиной в зоне СевАЦ, заглубление до 80 м — в зоне КраАЦ, а минимальные значения — на периферии западного (до 35–40 м) и восточного (до 40–45 м) ядер ОЦК.

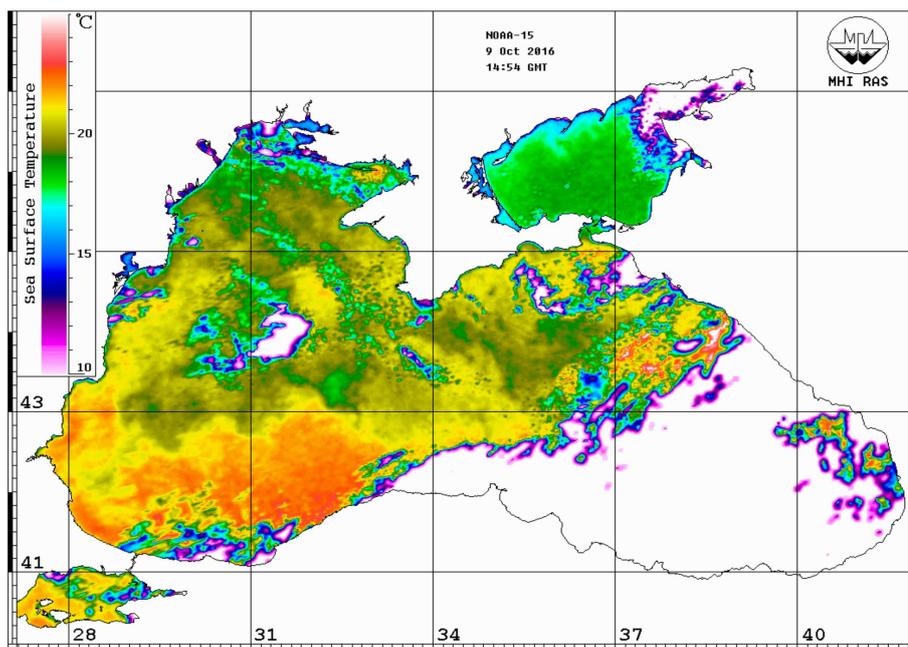


Рис. 3. Температура поверхности моря по данным спутника NOAA-15 (09.10.2016)

Fig. 3. Sea surface temperature according to NOAA-15 data (09.10.2016)

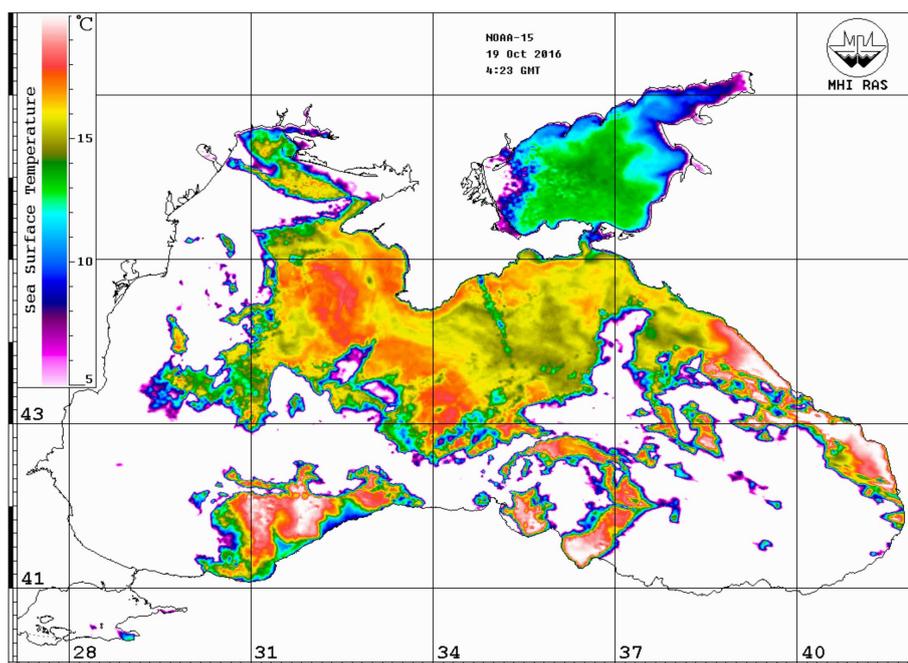


Рис. 4. Температура поверхности моря по данным спутника NOAA-15 (19.10.2016)

Fig. 4. Sea surface temperature according to NOAA-15 data (19.10.2016)

Пространственное распределение солёности поверхностных вод определялось близостью к основным источникам распреснения, направлением адвекции распреснённых вод, а также положением квазистационарных динамических образований. Вода с пониженной солёностью ($< 18\text{‰}$) отмечена в зонах СевАЦ и КраЦ, куда вовлекались трансформированные распреснённые воды из северо-западной части моря и от Керченского предпроливья. Наиболее солёные воды ($18,45\text{--}18,50\text{‰}$) соответствовали периферийным зонам ОЦК.

Ихтиопланктон. В ихтиопланктоне идентифицированы икра и личинки 15 видов рыб из 9 семейств (9 видов тепловодных и 6 видов умеренноводных рыб). Средняя численность икры составляла 2,92, а личинок — 3,56 экз.·м⁻² (табл. 1).

Таблица 1. Видовой состав и относительная численность (%) икры и личинок рыб у Крымского полуострова в октябре 2016 г.

Table 1. Species composition and relative abundance (%) of fish eggs and larvae off the Crimean Peninsula in October 2016

Вид	Икра	Личинки
Family: Engraulidae		
<i>Engraulis encrasicolus</i> (Linnaeus, 1758)	27,0	39,4
Family: Clupeidae		
<i>Sprattus sprattus</i> (Linnaeus, 1758)	42,5	0,8
Family: Gadidae		
<i>Merlangius merlangus</i> Linnaeus, 1758	20,5	5,3
<i>Trisopterus luscus</i> (Linnaeus, 1758)	4,5	10,7
Gadidae sp.	–	3,6
Family: Lotidae		
<i>Gaidropsarus mediterraneus</i> (Linnaeus, 1758)	4,5	0,8
<i>Molva macrophthalma</i> (Rafinesque, 1810)	–	0,8
Family: Syngnathidae		
<i>Syngnathus schmidti</i> Popov, 1928	–	28,1
Family: Scorpaenidae		
<i>Scorpaena porcus</i> Linnaeus, 1758	–	0,8
Family: Gobiidae		
<i>Pomatoschistus marmoratus</i> (Risso, 1810)	–	0,8
<i>Pomatoschistus minutus</i> (Pallas, 1770)	–	3,7
<i>Pomatoschistus pictus</i> (Malm, 1865)	–	1,8
<i>Gobius</i> sp.	–	0,8
Family: Mugilidae		
<i>Mugil cephalus</i> Linnaeus, 1758	1,0	1,8
Family: Bothidae		
<i>Arnoglossus kessleri</i> Schmidt, 1915	–	0,8
Средняя численность в лове, экз.·м ⁻²	2,92 ± 1,64	3,56 ± 1,63

В западном секторе исследований (мыс Тарханкут — город Алушка) ихтиопланктон собирали в первой декаде октября, когда система циркуляции поверхностных вод в анализируемой акватории, как было сказано выше, соответствовала летней с сохранением её основных особенностей. При температуре морской воды, достигающей +19,0...+21,5 °С, были обнаружены икра и личинки 10 видов рыб; их средняя численность составляла 3,4 и 4,7 экз.·м⁻² соответственно (рис. 5).

Над глубинами свыше 50 м нерестился умеренноводный шпрот *S. sprattus*, максимальная численность его икры (22 экз.·м⁻²) зарегистрирована у мыса Херсонес над глубиной 92 м. Кроме мерланга *M. merlangus* (обычного представителя семейства Gadidae), отмечены икра и личинки, идентифицированные нами как французская тресочка *Trisopterus luscus* (Linnaeus, 1758) (табл. 2). Этот вид трески описан для Северного и Средиземного морей [Alonso-Fernández et al., 2010; D’Ancona, 1933; Russell, 1976]; там её икра и личинки встречаются в течение круглого года с максимальной численностью с октября по май.

Из тепловодных видов продолжала нереститься хамса *E. encrasicolus*. Нерест её был результативным, о чём свидетельствовало наличие в пробах живой икры на разных этапах развития и личинок на желточном, смешанном и внешнем типах питания. Доля мёртвой икры в пробах

не превышала 30 %. Максимальная численность икры хамсы ($18,0 \text{ экз.}\cdot\text{м}^{-2}$) зарегистрирована на траверзе мыса Херсонес, а личинок ($14 \text{ экз.}\cdot\text{м}^{-2}$) — у мыса Тарханкут. Кроме хамсы, в пробах отмечены личинки бычков рода *Pomatoschistus* (*P. minutus* и *P. pictus*), кефали *Mugil cephalus*, пелагической иглы-рыбы *S. schmidtii* и морского ерша *Scorpaena porcus* (табл. 2, рис. 5).

Таблица 2. Видовой состав и средняя численность ($\text{экз.}\cdot\text{м}^{-2}$) ихтиопланктона в отдельных районах Чёрного моря (2016 г.)

Table 2. Ichthyoplankton species composition and mean abundance ($\text{ind.}\cdot\text{м}^{-2}$) in several areas of the Black Sea (2016)

Вид	Мыс Тарханкут — город Алупка				Мыс Меганом — Керченский пролив	
	30.09–09.10		19.10		10.10–17.10	
	Икра	Личинки	Икра	Личинки	Икра	Личинки
<i>Engraulis encrasicolus</i>	1,2	2,1	–	–	–	–
<i>Sprattus sprattus</i>	1,4	–	2,0	–	0,6	0,1
<i>Merlangius merlangus</i>	0,5	–	0,5	–	0,9	0,7
<i>Trisopterus luscus</i>	0,2	0,5	–	1,0	–	–
Gadidae sp.	–	0,2	–	–	–	–
<i>Gaidropsarus mediterraneus</i>	–	–	–	–	0,5	0,1
<i>Molva macrophthalma</i>	–	–	–	0,5	–	–
<i>Mugil cephalus</i>	0,1	0,1	–	–	–	0,1
<i>Syngnathus schmidtii</i>	–	1,5	–	0,5	–	0,4
<i>Scorpaena porcus</i>	–	0,1	–	–	–	–
<i>Pomatoschistus marmoratus</i>	–	–	–	–	–	0,1
<i>Pomatoschistus minutus</i>	–	0,1	–	–	–	0,1
<i>Pomatoschistus pictus</i>	–	0,1	–	–	–	0,1
<i>Gobius</i> sp.	–	–	–	0,5	–	–
<i>Arnoglossus kessleri</i>	–	–	–	–	–	0,1
Средняя численность	3,4	4,7	2,5	2,5	2,0	1,8

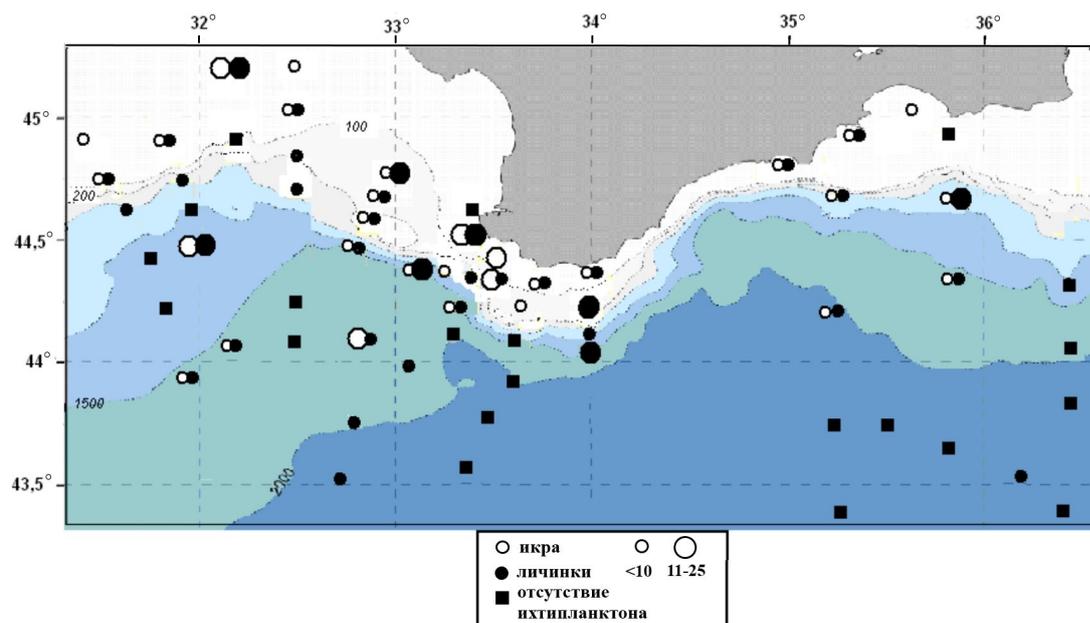


Рис. 5. Карта-схема распределения ихтиопланктона ($\text{экз.}\cdot\text{м}^{-2}$) в октябре 2016 г.

Fig. 5. Schematic map of ichthyoplankton distribution ($\text{ind.}\cdot\text{м}^{-2}$) in October 2016

Во второй декаде октября ихтиопланктон собирали на 17 станциях в восточном секторе исследований (мыс Меганом — Керченский пролив) после резкого понижения значений ТПМ (рис. 5). Здесь идентифицированы икра и личинки 9 видов рыб. Средняя численность икры составляла 2,0, а личинок — 1,8 экз. \cdot м⁻² (табл. 2). На прибрежных станциях в ихтиопланктоне, кроме икры умеренноводного налима *Gaidropsarus mediterraneus*, отмечены личинки тепловодных видов — бычков рода *Pomatoschistus* и камбалы *Arnoglossus kessleri* Schmidt, 1915. На станциях, выполненных на свале глубин, ихтиопланктон представлен в основном икрой и личинками обычных для зимнего нерестового сезона видов рыб — мерланга, шпрота и налима. Икра и личинки хамсы в ихтиопланктоне отсутствовали. Из тепловодных видов пойманы единичные экземпляры молодки пелагической иглы-рыбы, а также личинки бычков, которые, вероятно, были вынесены сюда течением по восточной периферии КраАЦ в результате усиления северо-восточных ветров [Морской портал Морского гидрофизического института, 2020]. Над глубинами свыше 2000 м только на 1 из 8 выполненных станций отмечена личинка *S. schmidtii*.

В конце второй декады месяца (19 октября 2016 г.) выполнены 4 станции от города Севастополя до мыса Сарыч в диапазоне глубин 73–314 м. В отличие от ТПМ, зарегистрированной в первой декаде октября, ТПМ здесь уже не превышала +17 °С; в ихтиопланктоне отмечены икра и личинки всего 6 видов рыб (при средней численности ~ 2,5 экз. \cdot м⁻²) (табл. 2). Из тепловодных видов обнаружены единичные экземпляры личинок *Gobius* sp. и молодка *S. schmidtii*. Умеренноводные виды представлены икрой шпрота и мерланга и личинками недавно вселившихся в Чёрное море средиземноморских хищников — французской тресочки и средиземноморской щуки *Molva macrophthalma* из семейства Lotidae [D’Ancona, 1933]; они были пойманы над глубиной ~ 300 м мористее бухты Ласпи (табл. 2). В последние годы исследований единичные личинки этих видов регулярно встречаются у Крымского полуострова от мыса Тарханкут до Керченского пролива [Klimova, Podrezova, 2018].

Было изучено питание разноразмерных личинок рыб трёх видов, преобладающих в ихтиопланктоне, — двух тепловодных (*E. encrasicolus*, 21 экз.; *S. schmidtii*, 22 экз.) и одного умеренноводного (*T. luscus*, 6 экз.) (табл. 1).

Анализ размерного состава личинок хамсы показал, что 9 % были на желточном, 27 % — на смешанном, 64 % — на внешнем типе питания. У личинок хамсы длиной (total length, TL) от 6,2 до 14,7 мм, находившихся на внешнем типе питания, пищевые объекты в кишечниках отмечены в основном в виде аморфной массы, идентифицировать которую не представлялось возможным. Только у двух личинок зарегистрированы науплиусы копепод размером от 0,15 до 0,2 мм, сохранившие хитиновые оболочки, а у личинки длиной 14,7 мм в кишечнике идентифицирован копепоидит *Acartia clausi* Giesbrecht, 1889 (0,75 мм).

В кишечниках пелагической иглы-рыбы размером от 13,2 до 87 мм преимущественно встречены ювенильные стадии Copepoda (Calanoida). В единичных случаях зафиксированы Cladocera и яйца гидробионтов. В питании иглы-рыбы II размерной группы доля мелких пищевых объектов (до 0,25 мм) не превышала 8 %; у личинок III размерной группы в кишечниках доминировали организмы длиной 0,4–0,7 мм. Пелагическая игла-рыба преимущественно потребляет доминирующие в планктоне виды, и очевидно, что преобладание более крупных пищевых объектов в её кишечниках связано с их обилием в море.

У личинок, идентифицированных нами как французская тресочка *T. luscus*, длиной (TL) от 2,6 до 4,0 мм отмечены ювенильные стадии копепод (Calanidae и Oithonidae) размером 0,175–0,375 мм в количестве от 2 до 8 экз. на один кишечник.

В целом в период исследований (октябрь 2016 г.) зарегистрирована невысокая численность ихтиопланктона при довольно большом для открытых вод количестве видов (15). Индекс видового богатства по всей выборке составлял 11,5. Из-за отсутствия выраженного доминирования

в ихтиопланктоне (индекс доминирования — 0,2) зафиксированы достаточно высокие для межсезонья индексы выравненности (0,7) и видового разнообразия (2,8) [Одум, 1986; Pielou, 1966; Shannon, Weaver, 1949; Simpson, 1949].

Мезопланктон. В мезозоопланктоне преобладали виды *A. clausi*, *C. euxinus*, *Paracalanus parvus* (Claus, 1863), *Penilia avirostris* Dana, 1849 и *Parasagitta setosa* (J. Müller, 1847), обычно имеющие максимальную или близкую к таковой биомассу в осенние месяцы. Единственным исключением является *Pseudocalanus elongatus* (Brady, 1865), биомасса которого, как правило, достигает наибольших величин в марте — апреле. На внешнем шельфе и в глубинной части моря состав мезозоопланктона несколько различался. Зафиксировано закономерное повышение доли холодноводных видов с удалением от побережья. В порядке убывания по биомассе на внешнем шельфе доминировали *P. setosa* (20,4 %), *P. parvus* (18,3 %), *A. clausi* (12,2 %) и *P. avirostris* (12,1 %), а на больших глубинах — *C. euxinus* (32,1 %), *P. elongatus* (21,5 %), *P. parvus* (12,0 %) и *P. setosa* (11,3 %).

На 39 станциях глубоководной эпипелагиали биомасса доминирующей копеподы *C. euxinus* изменялась в зависимости от положения нижней границы кислородной зоны ($\sigma_t = 16,2$). Так, при её увеличении от 100–125 до 126–150 м биомасса этого рачка возрастала от (6200 ± 800) до (9020 ± 1020) мг·м⁻². В глубинном диапазоне нижней границы кислородной зоны, 151–180 м, значение снижалось до (7300 ± 1900) мг·м⁻². В целом численность и биомасса общего и кормового (без ночесветки) зоопланктона были вдвое выше в открытой пелагиали, чем на шельфе (табл. 3). Подобного не зарегистрировано для мелкого кормового зоопланктона (организмы < 0,5 мм), являющегося основной пищей личинок рыб. Хотя его численность на внешнем шельфе ($134\,592$ экз·м⁻²) и уступала численности в районе глубинной эпипелагиали ($222\,244$ экз·м⁻²), для значений биомассы мелких организмов прослежена обратная закономерность — 1022 мг·м⁻² на шельфе и 983 мг·м⁻² на глубинной станции. Среди мелких видов и форм по численности всюду доминировали копеподиты *P. parvus* (32,8 и 37,4 %), а по биомассе — *Oikopleura (Vexillaria) dioica* Fol, 1872 (36,8 %) на внешнем шельфе и *P. parvus* (35,8 %) в глубоководной части моря.

Биомасса копепод и, видимо, рачкового зоопланктона в целом в глубоководной части моря была связана с численностью и биомассой гребневика *Pleurobrachia pileus* (O. F. Müller, 1776) ($p < 0,01$), а также с численностью медузы *A. aurita* ($p < 0,05$).

Таблица 3. Состав, численность (экз·м⁻²) и биомасса (мг·м⁻²) мезозоопланктона на двух станциях траверза мыса Херсонес (над глубиной 92 и 1800 м) в октябре 2016 г.

Table 3. Mesozooplankton composition, abundance (ind·m⁻²), and biomass (mg·m⁻²) on two stations of the Cape Khersones traverse (above the depth of 92 and 1,800 m) in October 2016

Вид	Внешний шельф (50–200 м)				Глубоководные районы (> 200 м)			
	экз·м ⁻²	%	мг·м ⁻²	%	экз·м ⁻²	%	мг·м ⁻²	%
Общий мезозоопланктон	332 153	–	7570	–	569 524	–	14 840	–
Кормовой мезозоопланктон	315 599	–	6700	–	552 134	–	13 950	–
Мезозоопланктон < 0,5 мм	134 592	100	1022	100	222 244	100	983	100
<i>Paracalanus parvus</i>	44 082	32,8	249	24,4	83 225	37,4	352	35,8
<i>Acartia</i> spp.	24 004	17,8	77	7,5	38 615	17,4	126	12,8
<i>Pseudocalanus elongatus</i>	4885	3,6	22	2,2	23 174	10,4	109	11,1
<i>Centropages ponticus</i>	7424	5,5	33	3,2	9662	4,3	42	4,3
Науплиусы Copepoda	19 000	14,1	14	1,4	32 000	14,4	24	2,4
<i>Penilia avirostris</i> (< 0,5 мм)	2315	1,7	23	2,3	625	0,3	6	0,1
<i>Oikopleura dioica</i>	14 250	10,6	377	36,8	3750	1,7	108	11,0
Прочие	18 632	13,8	227	22,2	31 193	14,0	200	20,3

Желетельный макропланктон был в основном представлен сцифомедузой *A. aurita* и тремя видами гребневиков (*M. leidyi*, *P. pileus* и *B. ovata*), присутствующими совместно в более чем 90 % проб (рис. 6).

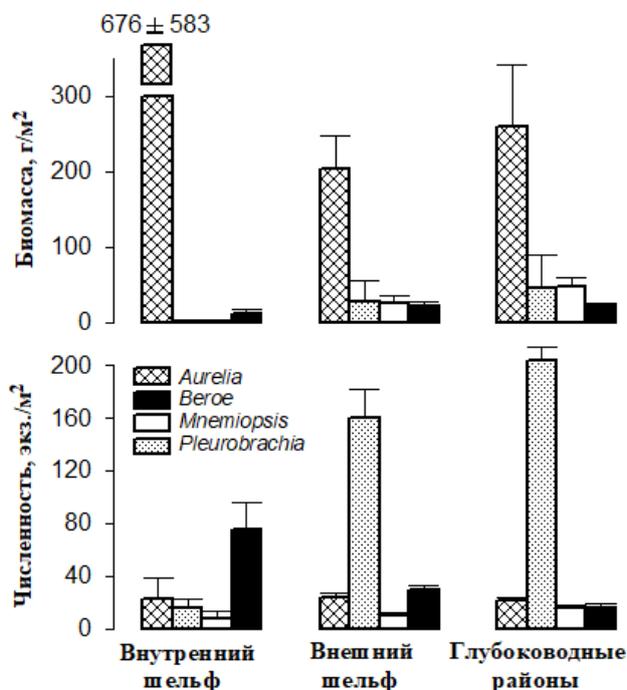


Рис. 6. Численность (экз·м⁻²) и биомасса (г·м⁻²) желетелого макропланктона в центральных районах Чёрного моря в октябре 2016 г. (средние ± ошибки средних)

Fig. 6. Gelatinous macroplankton abundance (ind·m⁻²) and biomass (g·m⁻²) in the central Black Sea in October 2016 (mean values ± standard errors)

Средняя биомасса *A. aurita* в районах с глубинами > 200 м составляла 203–260 г·м⁻², численность — 21–24 экз·м⁻². Высокая биомасса зафиксирована на прибрежном шельфе — (676 ± 583) г·м⁻². Отсутствие существенных различий по биомассе и численности медузы в разных районах эпипелагиали прослежено по среднегеометрическим оценкам (79–157 г·м⁻² и 10–21 экз·м⁻²) и подтверждено статистически ($p > 0,05$). Максимальная биомасса (2611 г·м⁻²) и численность этого вида (92 экз·м⁻²) зарегистрированы на периферии восточного ядра ОЦК (ст. 79).

На шельфе и в глубоководных районах моря конкурирующие с медузой гребневиков *P. pileus* и *M. leidyi* имели в среднем одинаковую биомассу, однако по численности и по распространённости из них доминировал *P. pileus*. Выделены два очага наиболее крупных скоплений этого гребневика — периферия восточного ядра ОЦК (до 161 г·м⁻² и 444 экз·м⁻²) и пограничные области СевАЦ (до 93 г·м⁻² и 331 экз·м⁻²). *M. leidyi* был обнаружен в макропланктоне на 58 станциях. В целом этот гребневик встречался чаще и в больших количествах в направлении от внутреннего шельфа к глубоководной эпипелагиали. Несмотря на наличие локальных скоплений особей (до 325 г·м⁻² на ст. 79), их биомасса обычно не превышала 50 г·м⁻², а в открытых районах моря в среднем составляла 26–48 г·м⁻². Численность *M. leidyi* возрастала ближе к восточной части моря, где в редких случаях достигала 70 экз·м⁻² (ст. 63).

Третий вид, *B. ovata*, встречался в море практически повсеместно. Его средняя биомасса находилась в пределах 11–22 г·м⁻², причём была выше в тех же районах, что и биомасса *M. leidyi* ($p < 0,01$). Большей численности здесь достигала и *A. aurita* ($p < 0,05$). Численность гребневика была максимальной в районе Феодосийского залива (108–112 экз·м⁻²) и убывала с удалением от побережья Крыма. Эти данные дают основание предположить, что популяция *B. ovata* изначально развивалась в прибрежной зоне, а расселение в открытые районы моря происходило позднее.

Общая численность ихтиопланктона, а также отдельно икры и личинок рыб выше ($p < 0,05$) в районах с большей численностью гребневика *B. ovata*. Кроме того, численность личинок рыб оказалась позитивно связана с численностью медузы *A. aurita* ($p < 0,05$) и, возможно ($p < 0,07$), с температурой верхнего слоя моря. Появление отдельных представителей ихтиопланктона могло быть сопряжено с различными биотическими и абиотическими условиями. Если численность икры и личинок хамсы *E. encrasicolus* находилась в связи лишь с численностью *B. ovata* ($p < 0,05$), то численность личинок и молоди пелагической иглы-рыбы *S. schmidtii* в основном коррелировала с численностью и биомассой копеподы *C. euxinus* ($p < 0,05$), биомассой всего мезопланктона (если принять, что её значение в среднем в 1,6 раза выше биомассы калянуса [Аннинский, Тимофеев, 2009]) ($p < 0,05$), а также с численностью медузы *A. aurita* ($p < 0,05$). Для икры шпрота *S. sprattus* и мерланга *M. merlangus* какой-либо связи с условиями их обитания не выявлено ($p > 0,05$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Видовой состав, численность и пространственное распределение ихтиопланктона в различных районах Чёрного моря в основном лимитированы гидрологическим режимом, прежде всего температурой воды как определяющим ритм биологических процессов фактором, а также кормовой базой и воздействием хищников [Дехник, Павловская, 1979].

Период планктонных исследований соответствовал начальному этапу осеннего гидрологического сезона с достаточно плавным понижением ТПМ во время выполнения съёмки в западном секторе в первой декаде октября и с резким уменьшением ТПМ в восточном секторе во второй декаде октября, после сильного шторма.

В октябре тепловодные виды рыб обычно завершают свой нерест, а умеренноводные только начинают нереститься, поэтому в ихтиопланктоне, как правило, преобладают личинки старших возрастных групп тепловодных и икра умеренноводных видов [Дехник, 1973]. В первой декаде октября 2016 г. в западном секторе исследований в ихтиопланктоне идентифицированы 10 видов, отмечена сравнительно высокая средняя численность икры и личинок рыб. Среди личинок доминировала тепловодная хамса *E. encrasicolus*, а по количеству икры преобладал умеренноводный шпрот *S. sprattus*. При этом икра тепловодной хамсы в пробах составляла довольно значительную долю — 35,3 %. Более того, в 2016 г., в отличие от предыдущих лет [Дехник, 1973; Климова и др., 2010; Klimova, Podrezova, 2018], нерест хамсы был результативным, о чём свидетельствовало наличие в пробах личинок (44,7 % от общей численности всех видов) всех возрастных групп. Одновременно отмечены икра 3 видов и личинки 2 видов умеренноводных рыб (см. табл. 2). С 1 по 14 октября 2005 г., когда ТПМ была в среднем на 2 °С ниже, чем в 2016 г., в ихтиопланктоне зарегистрированы икра и личинки рыб 11 видов [Климова и др., 2010]. Средняя численность икры была вдвое ниже, чем в 2016 г. Нерестились только обычные умеренноводные виды — шпрот, мерланг и налим; результативным нерест был лишь у мерланга. Личинки тепловодных рыб были представлены 8 видами. Хамса уже завершила свой нерест, её личинки старших возрастных групп доминировали в пробах, что соответствовало данным ихтиопланктонных исследований 1950–1970-х гг. [Дехник, 1973].

Резкое изменение параметров термической стратификации после шторма 9–10 октября 2016 г. отразилось на структуре видового состава ихтиопланктона на шельфе Юго-Западного Крыма (от мыса Сарыч до города Севастополя): увеличилась доля умеренноводных рыб. Количество видов ихтиопланктона в конце второй декады октября сократилось почти вдвое, а средняя численность икры и личинок рыб не превышала 2,5 экз.·м⁻² (табл. 2). Икра была представлена только умеренноводными шпротом и мерлангом, но их нерест был безрезультативным. В пробах отмечены лишь личинки умеренноводных вселенцев *T. luscus* и *M. macrophthalma*. Выпали из уловов икра и личинки хамсы, тепловодные виды были представлены только единичными личинками бычков и молодью пелагической иглы-рыбы.

В восточном секторе исследований ихтиопланктон собирали во второй декаде октября 2016 г. Фоновые значения ТПМ понизились после шторма до $+16 \dots +16,5$ °С. На шельфе и свале глубин северо-восточной части акватории (от мыса Меганом до Керченского пролива) отмечены икра и личинки 9 видов рыб, то есть почти столько же видов, что и в западном секторе исследований до шторма. Между тем отсутствие в пробах икры и личинок хамсы, которые преобладали в пробах западного сектора исследований в первой декаде октября, привело к снижению средней численности икры до 2,0, а личинок — до $1,8 \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$ (см. табл. 2). Умеренноводные виды представлены икрой и личинками обычных для зимнего ихтиопланктона видов (шпрот, мерланг и налим), а тепловодные — лишь единичными личинками бычков *Pomatoschistus* и камбалы *A. kessleri*, а также молодью пелагической иглы-рыбы. Южнее, на глубоководных станциях, пробы были практически пустыми (как отмечено выше, на 8 выполненных станциях пойман только 1 экземпляр иглы-рыбы).

Как в октябре 2016 г., так и в октябре 2005 г. зарегистрированы благоприятные условия для выживания личинок тепловодных и умеренноводных рыб [Климова и др., 2010]. Личинки на смешанном и внешнем типе питания с пустыми кишечниками в светлое время суток встречены не были. В октябре 2016 г. у личинок хамсы, перешедших на внешний тип питания, пища в основном имела вид аморфной массы, а у самых крупных экземпляров идентифицированы ювенильные стадии копепод, что соответствует данным [Дука, Синюкова, 1976] об особенностях питания и строения кишечника личинок этого вида. Подробный анализ питания пелагической иглы-рыбы различных размерных групп представлен по материалу, собранному в сентябре 1987 г., когда ТПМ была сопоставима с таковой в октябре 2016 г. [Гордина и др., 1991]. У личинок III размерной группы как в сентябре 1987 г., так и в октябре 2016 г. в кишечниках доминировали крупные пищевые организмы (длиной 0,4–0,7 мм); в питании личинок иглы-рыбы II размерной группы в сентябре 1987 г. преобладали мелкие пищевые объекты, а в октябре 2016 г. их доля не превышала 8 %. Ранее в кишечниках иглы-рыбы II размерной группы от 18 до 51 % общего количества потреблённых организмов составляла мелкая *Oithona nana* Giesbrecht, 1893 [Гордина и др., 1991]. В настоящее время этот вид в черноморском зоопланктоне не встречается.

Большое количество пищевых объектов в кишечниках личинок рыб свидетельствовало о хорошей кормовой базе, что было подтверждено мезопланктонными исследованиями. В начальной фазе осеннего гидрологического сезона в 2016 г. море остывало медленнее, чем в 2005 г., и дольше поддерживало благоприятные температурные условия для развития тепловодного зоопланктона [Климова и др., 2010]. Во многом благодаря росту популяций тепловодных видов (*P. parvus*, *Centropages ponticus*, *P. avirostris* и др.) значения численности и биомассы кормового зоопланктона как на внешнем шельфе, так и в глубоководной части моря в 2016 г. достигали уровня верхнего предела соответствующих данных 2005 г. [Климова и др., 2010]. Небольшое количество проб в 2016 г. не позволяет оценить межгодовые различия в численности и биомассе мелкоразмерного зоопланктона статистически. Однако то, что за это время численность кормовых организмов размером $< 0,5$ мм выросла в 4–6 раз, а их биомасса — в 7–8 раз, вполне согласуется с наметившейся в последние годы тенденцией к увеличению обилия всего рачкового планктона [Аннинский и др., 2016]. Рост его численности и биомассы указывает на некоторое, возможно временное, повышение трофности Чёрного моря, что подтверждают и данные по хищным желтелым [Аннинский, Тимофте, 2009]. В глубоководной части моря биомасса медузы *A. aurita* в 2016 г. была достоверно выше ($p < 0,01$), чем в 2005 г. Биомасса *P. pileus* за этот временной отрезок возросла вдвое ($p < 0,001$), а биомасса *M. leidyi* ($\sim 250 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$ до сезонной вспышки *B. ovata*) — в 2–3 раза. Всё это говорит о том, что желтелого макропланктона в 2016 г. было больше; потенциально он мог иметь более сильное влияние на весь мезозоопланктон, в том числе на ихтиопланктонные

комплексы, чем в 2005 г. Однако, судя по количеству мезозоопланктона, а также по обилию икры и личинок рыб, хищнический пресс желтелых не нанёс существенного ущерба популяциям жертв. На это же, по-видимому, указывает позитивная связь общей численности личинок рыб с численностью *A. aurita*. Такая зависимость, как и аналогичная (между численностью ранних возрастных стадий хамсы и гребневика *B. ovata*), может свидетельствовать об очевидных трофических векторах распределения ихтиопланктона в море. В первом случае таким вектором могло быть обилие микропланктона, во втором — большее развитие мелкого кормового зоопланктона при слабом хищническом прессе гребневиков-планктофагов. Следует отметить, что *B. ovata* в настоящее время оказывает более существенное влияние на популяцию *M. leidy*, чем в прошлые годы. Он раньше появляется в планктоне и быстрее адаптируется к сезонному измельчанию особей в популяции жертв, генерируя за счёт личиночного размножения собственное мелкоразмерное поколение [Финенко, Дацк, 2016]. Кроме того, *B. ovata* проникает в районы глубоководной эпипелагиали, где *M. leidy* ранее спасался от полного выедания [Аннинский и др., 2013].

Сравнительно высокие значения ТПМ в первой декаде октября 2016 г., с одной стороны, способствовали пролонгированию нереста хамсы и других тепловодных видов рыб, а с другой — препятствовали полноценному освоению в октябре поверхностного слоя моря холодолюбивыми желтелыми (*A. aurita* и *P. pileus*), предпочитающими более низкую температуру [Anninsky, 2009], что могло привести к вытеснению обоих видов в более глубокие горизонты. Многочисленность особей *A. aurita* и *P. pileus* обострила их конкуренцию и внутривидовое пищевое соперничество на данных глубинах. Это, вероятно, привело к снижению как среднего диаметра зонтика медузы, так и скорости роста её генерации. В частности, скорость роста генерации *A. aurita* в октябре 2016 г. оказалась одной из самых низких за последние 15 лет.

Выводы:

1. В октябре 2016 г. на фоне климатических изменений в гидрологическом режиме Чёрного моря в шельфовых и глубоководных районах у Крымского полуострова отмечены икра и личинки 15 видов из 9 семейств как умеренноводного, так и тепловодного комплексов. Средняя численность икры составляла 2,92, а личинок — 3,56 экз.·м⁻². Сравнительно высокие индексы видового разнообразия, а также широкий размерный ряд личинок и наличие кормовых организмов в их кишечниках свидетельствовали о благоприятных условиях для выживания ихтиопланктона в период исследований.

2. Численность и видовая структура ихтиопланктона изменялись в соответствии с особенностями гидрологического режима в период съёмки. В первой декаде октября — начальной фазе осеннего гидрологического сезона, когда система циркуляции поверхностных вод в анализируемой акватории ещё соответствовала летней и температура воды превышала +21 °С, в западном секторе исследований отмечены икра и личинки 10 видов рыб; их средняя численность составляла 3,4 и 4,7 экз.·м⁻² соответственно. В море ещё происходил результативный нерест тепловодной хамсы, о чём свидетельствовали низкая доля мёртвой икры (30 %) и присутствие в пробах личинок всех возрастных групп — на желточном (9 %), смешанном (27 %) и внешнем (64 %) типах питания. Нерест умеренноводных *Sprattus sprattus* и *Merlangius merlangus* был безрезультативным, а личинки двух видов из семейства Gadidae встречены единично.

Во второй декаде октября, при резком понижении температуры поверхности моря до +16,5...+17 °С на фоне усиления ветро-волнового перемешивания, в восточном секторе исследований отмечены икра и личинки ещё 9 видов рыб, но их средняя численность уменьшилась до 2,0 и 1,8 экз.·м⁻² соответственно. Видовая структура была уже типичной для осеннего нерестового сезона. Хамса в пробах отсутствовала. Здесь зарегистрирован результативный нерест умеренноводных *Gaidropsarus mediterraneus*, *S. sprattus* и *M. merlangus*; тепловодные виды были представлены лишь личинками старших возрастных групп.

В конце съёмки на шельфе юго-западной части Крымского полуострова, от города Севастополя до мыса Сарыч, ихтиопланктон был представлен только 6 видами: единичными экземплярами тепловодных личинок *Gobius* sp. и *Syngnathus schmidti*, икрой умеренноводных *S. sprattus* и *M. merlangus*, а также личинками средиземноморских вселенцев *Trisopterus luscus* и *Molva macrophthalma*.

3. Несмотря на обилие желетелых хищников в 2016 г., они не нанесли существенного ущерба популяциям мезо- и ихтиопланктона. В 2016 г. раннее появление (в апреле) гребневика *Beroe ovata* и его проникновение в районы глубоководной эпипелагиали ослабили хищнический пресс *Mnemiopsis leidyi* на зоопланктон верхнего квазиоднородного слоя, где происходит развитие икры и личинок большинства видов рыб. Относительно высокая температура поверхности морской воды (более +20 °С) препятствовала полноценному освоению этого биотопа холододобивыми желетельными (*Aurelia aurita* и *Pleurobrachia pileus*) и способствовала их вытеснению на более глубокие горизонты, где обострились их конкуренция и внутривидовое пищевое соперничество.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по темам «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана» (№ гос. регистрации 121030100028-0), «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (№ гос. регистрации 121030300149-0) и «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (№ гос. регистрации 121041400077-1). Исследования выполнены в Центре коллективного пользования «НИС “Профессор Водяницкий”» ФИЦ ИнБЮМ.

Благодарность. Авторы выражают искреннюю признательность к. б. н. Ю. А. Загородней за помощь в определении пищевых объектов в кишечниках личинок рыб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аннинский Б. Е., Тимофте Ф. Распределение зоопланктона в западном секторе Чёрного моря в октябре 2005 г. // *Морской экологический журнал*. 2009. Т. 8, № 1. С. 17–31. [Anninsky B. E., Timofte F. The distribution of zooplankton in the western Black Sea in October 2005. *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2009, vol. 8, no. 1, pp. 17–31. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/996>
2. Аннинский Б. Е., Финенко Г. А., Дацьк Н. А., Игнатъев С. М. Желетельный макропланктон в Чёрном море осенью 2010 г. // *Океанология*. 2013. Т. 53, № 6. С. 758–768. [Anninsky B. E., Finenko G. A., Datsyk N. A., Ignatyev S. M. Gelatinous macroplankton in the Black Sea in the autumn of 2010. *Okeanologiya*, 2013, vol. 53, no. 6, pp. 758–768. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0030157413060014>
3. Аннинский Б. Е., Финенко Г. А., Дацьк Н. А. Роль желетелых хищников в трофодинамике планктонных сообществ прибрежных районов Чёрного моря // *Морские биологические исследования: достижения и перспективы* : в 3 т. : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, приуроч. к 145-летию Севастопольской биологической станции, Севастополь, 19–24 сентября 2016 г. Севастополь, 2016. Т. 2. С. 221–224. [Anninsky B. E., Finenko G. A., Datsyk N. A. The trophodynamic role of gelatinous predators in planktonic communities of the coastal regions of the Black Sea. In: *Morskie biologicheskie issledovaniya: dostizheniya i perspektivy* : v 3 t. : sb. materialov Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, priuroch. k 145-letiyu Sevastopol'skoi biologicheskoi stantsii, Sevastopol, 19–24 Sept., 2016. Sevastopol, 2016, vol. 2, pp. 221–224. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/3169>
4. Артамонов Ю. В., Алексеев Д. В., Скрипалева Е. А., Шутов С. А., Дерюшкин Д. В., Завьялов Д. Д., Колмак Р. В., Шаповалов Р. О., Шаповалов Ю. И., Федирко А. В., Щербаченко С. В.

- Особенности сезонной и синоптической изменчивости структуры вод в зоне основного черноморского течения в осенне-зимний период 2016 г. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2018. № 1. С. 32–43. [Artamonov Yu. V., Alekseev D. V., Skripaleva E. A., Shutov S. A., Deriushkin D. V., Zavyalov D. D., Kolmak R. V., Shapovalov R. O., Shapovalov Yu. I., Fedirko A. V., Shcherbachenko S. V. Peculiarities of seasonal and synoptic variability of water structure in the zone of the Rim Current at autumn and winter 2016. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya*, 2018, no. 1, pp. 32–43. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-1-32-43>
5. Гордина А. Д., Овен Л. С., Ткач А. В., Климова Т. Н. Распространение, размножение и питание пелагической иглы-рыбы *Syngnathus schmidtii* в Чёрном море // *Вопросы ихтиологии*. 1991. Т. 31, № 1. С. 107–114. [Gordina A. D., Oven L. S., Tkach A. V., Klimova T. N. Distribution, reproduction and feeding of the pelagic pipefish, *Syngnathus schmidtii*, in the Black Sea. *Voprosy ikhtiologii*, 1991, vol. 31, no. 1, pp. 107–114. (in Russ.)]
 6. Дехник Т. В. Показатели элиминации в эмбриональный и личиночный периоды развития черноморской хамсы // *Труды Севастопольской биологической станции*. 1960. Т. 13. С. 216–244. [Dekhnik T. V. Pokazateli eliminatsii v embrional'nyi i lichinochnyi periody razvitiya chernomorskoj khamsy. *Trudy Sevastopol'skoi biologicheskoi stantsii*, 1960, vol. 13, pp. 216–244. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5474>
 7. Дехник Т. В. Ихтиопланктон Чёрного моря. Киев : Наукова думка, 1973. 235 с. [Dekhnik T. V. *Ikhtioplankton Chernogo morya*. Kyiv : Naukova dumka, 1973, 235 p. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5654>
 8. Дехник Т. В., Павловская Р. М. Закономерности распределения, динамики численности и выживания рыб на ранних этапах онтогенеза // *Основы биологической продуктивности Чёрного моря* / под общ. ред. В. Н. Гресе. Киев : Наукова думка, 1979. С. 268–272. [Dekhnik T. V., Pavlovskaya R. M. Zakonomernosti raspredeleniya, dinamiki chislennosti i vyzhivaniya ryb na rannikh etapakh ontogeneza. *Osnovy biologicheskoy produktivnosti Chernogo morya* / pod obsh. red. V. N. Greze. Kyiv : Naukova dumka, 1979. С. 268–272. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/8059>
 9. Дука Л. А., Синюкова В. И. *Руководство по изучению питания личинок и мальков морских рыб в естественных и экспериментальных условиях*. Киев : Наукова думка, 1976. 134 с. [Duka L. A., Sinyukova V. I. *Rukovodstvo po izucheniyu pitaniya lichinok i mal'kov morskikh ryb v estestvennykh i eksperimental'nykh usloviyakh*. Kyiv : Naukova dumka, 1976, 134 p. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/7900>
 10. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. *Океанография Чёрного моря*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с. [Ivanov V. A., Belokopytov V. N. *Oceanography of the Black Sea*. Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2011, 212 p. (in Russ.)]
 11. Климова Т. Н., Вдодович И. В., Аннинский Б. Е. Ихтиопланктон в планктонном сообществе западного сектора Чёрного моря в октябре 2005 г. // *Вопросы ихтиологии*. 2010. Т. 50, № 3. С. 349–355. [Klimova T. N., Vdodovich I. V., Anninskii B. E. Ichthyoplankton in the plankton community of the western sector of the Black Sea in October 2005. *Voprosy ikhtiologii*, 2010, vol. 50, no. 3, pp. 349–355. (in Russ.)]
 12. Климова Т. Н., Субботин А. А., Мельников В. В., Серебренников А. Н., Подрезова П. С. Пространственное распределение ихтиопланктона у Крымского полуострова в летний сезон 2013 г. // *Морской биологический журнал*. 2019. Т. 4, № 1. С. 63–80. [Klimova T. N., Subbotin A. A., Melnikov V. V., Serebrennikov A. N., Podrezova P. S. Spatial distribution of ichthyoplankton near the Crimean Peninsula in the summer spawning season 2013. *Morskoj biologicheskij zhurnal*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 63–80. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2019.04.1.06>
 13. *Морской портал Морского гидрофизического института* : сайт. [Marine Portal of the Marine Hydrophysical Institute : site. (in Russ.)]. URL: http://dvs.net.ru/mp/index_ru.shtml [accessed: 16.06.2020].
 14. Одум Ю. *Экология* : в 2 т. : пер. с англ. / под ред. В. Е. Соколова. Москва : Мир, 1986. Т. 2. 376 с. [Odum Yu. *Ekologiya* : in 2 vols / transl.

- from English / V. E. Sokolov (Ed.). Moscow : Mir, 1986, vol. 2, 376 p. (in Russ.)]
15. Трощенко О. А., Субботин А. А. Абиотические факторы и условия обитания гидробионтов прибрежной зоны Юго-Восточного Крыма. Гидрологические особенности // *Биология Чёрного моря у берегов Юго-Восточного Крыма* / под ред. Н. С. Костенко. Симферополь : АРИАЛ, 2018. С. 46–59. [Troshchenko O. A., Subbotin A. A. Abioticheskie faktory i usloviya obitaniya gidrobiontov pribrezhnoi zony Yugo-Vostochnogo Kryma. Hidrologicheskie osobennosti. In: *The Biology of the Black Sea Offshore Area at the South-Eastern Crimea* / N. S. Kostenko (Ed.). Simferopol : ARIAL, 2018, pp. 46–59. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5150>
 16. Трощенко О. А., Субботин А. А., Еремин И. Ю. Изменчивость основных лимитирующих факторов среды в процессе выращивания двустворчатых моллюсков на ферме в районе Севастополя // *Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология*. 2019. Т. 5 (71), № 2. С. 308–321. [Troshchenko O. A., Subbotin A. A., Eremin I. Yu. Variability of main limiting environmental factors in the process of bivalve mollusk cultivation at the mussel farm in Sevastopol. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 2019, vol. 5 (71), no. 2, pp. 308–321. (in Russ.)]
 17. Финенко Г. А., Дацык Н. А. Репродуктивные особенности гребневика *Mnemiopsis leidyi* в шельфовой зоне Чёрного моря // *Морские биологические исследования: достижения и перспективы* : в 3 т. : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участием, приуроч. к 145-летию Севастопольской биологической станции, Севастополь, 19–24 сентября 2016 г. Севастополь, 2016. Т. 1. С. 317–319. [Finenko G. A., Datzyk N. A. The reproductive features of ctenophore *Mnemiopsis leidyi* in inshore zone of the Black Sea. In: *Morskie biologicheskie issledovaniya: dostizheniya i perspektivy* : v 3 t. : sb. materialov Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, priuroch. k 145-letiyu Sevastopol'skoi biologicheskoi stantsii, Sevastopol, 19–24 Sept., 2016. Sevastopol, 2016, vol. 1, pp. 317–319. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/3048>
 18. Alonso-Fernández A., Vergara A., Saborido-Rey F. Embryonic development and spawning pattern of *Trisopterus luscus* (Teleostei: Gadidae) under controlled conditions. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2010, vol. 91, spec. iss. 6, pp. 1281–1287. <https://doi.org/10.1017/S0025315410000147>
 19. Anninsky B. E. Organic composition and ecological energetics of the jellyfish *Aurelia aurita* L. (Cnidaria, Scyphozoa) under Black Sea conditions. In: *Trophic Relationships and Food Supply of Heterotrophic Animals in the Pelagic Ecosystem of the Black Sea* / G. E. Shulman, B. Öztürk, A. E. Kideys, G. A. Finenko, L. Bat (Eds). Istanbul, Turkey : Black Sea Commission Publications, 2009, pp. 99–160.
 20. Auth T. D., Daly E. A., Brodeur R. D., Fisher J. L. Phenological and distributional shifts in ichthyoplankton associated with recent warming in the northeast Pacific Ocean. *Global Change Biology*, 2017, vol. 24, iss. 1, pp. 259–272. <https://doi.org/10.1111/gcb.13872>
 21. *Copernicus Marine Service* : [site]. URL: <https://data.marine.copernicus.eu/products> [accessed: 02.11.2019].
 22. D'Ancona U. Order: Acanthini. Family 1: Gadidae. In: *Fauna and Flora of the Bay of Naples*. Monograph No. 38: Eggs, larvae and juvenile stages of Teleostei / S. Lo Bianco (Ed.). 1933, pt. II, pp. 188–261, plates XII–XV. (English transl. by Israel Program for Scientific Translations, 1969).
 23. Finenko G. A., Romanova Z. A., Abolmasova G. I., Anninsky B. E., Svetlichny L. S., Hubareva E. S., Bat L., Kideys A. E. Population dynamics, ingestion, growth and reproduction rates of the invader *Beroe ovata* and its impact on plankton community in Sevastopol Bay, the Black Sea. *Journal of Plankton Research*, 2003, vol. 25, iss. 5, pp. 539–549. <https://doi.org/10.1093/plankt/25.5.539>
 24. Fincham J. I., Rijnsdorp A. D., Engelhard G. H. Shifts in the timing of spawning in sole linked to warming sea temperatures. *Journal of Sea Research*, 2013, vol. 75, pp. 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2012.07.004>
 25. Klimova T. N., Podrezova P. S. Seasonal distribution of the Black Sea ichthyoplankton near the Crimean Peninsula. *Regional Studies*

- in Marine Science*, 2018, vol. 24, pp. 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.08.013>
26. Margalef R. Information theory in ecology. *General Systems*, 1958, vol. 3, pp. 36–71.
27. McQueen K., Marshall T. C. Shifts in spawning phenology of cod linked to rising sea temperatures. *ICES Journal of Marine Science*, 2017, vol. 74, iss. 6, pp. 1561–1573. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx025>
28. National Center for Environmental Information / National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) : [site]. URL: <https://www.nodc.noaa.gov/SatelliteData/pathfinder4km> [accessed: 22.04.2018].
29. Parsons T. R., Lalli C. M. Jellyfish population explosions: Revisiting a hypothesis of possible causes. *La Mer*, 2002, vol. 40, pp. 111–121. http://www.sfjo-lamer.org/la_mer/40-3/40-3-2.pdf
30. Pielou E. C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, vol. 10, iss. 2, pp. 370–383. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(66\)90133-0](https://doi.org/10.1016/0022-5193(66)90133-0)
31. Purcell J. E., Uye S. I., Lo W. T. Anthropogenic causes of jellyfish blooms and direct consequences for humans: A review. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, vol. 350, pp. 153–174. <https://doi.org/10.3354/meps07093>
32. Richardson A. J., Bakun A., Hays G. C., Gibbons M. J. The jellyfish joyride: Causes, consequences and management responses to more gelatinous future. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, vol. 24, iss. 6, pp. 312–322. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.01.010>
33. Robinson K. L., Ruzicka J. J., Decker M. B., Brodeur R. D., Hernandez F. J., Quiñones J., Acha E. M., Uye S., Mianzan H., Graham W. M. Jellyfish, forage fish, and the world's major fisheries. *Oceanography*, 2014, vol. 27, no. 4, pp. 104–115. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2014.90>
34. Russell F. S. *The Eggs and Planktonic Stages of British Marine Fishes*. London ; New York ; San Francisco : Academic Press, 1976, 524 p.
35. Shannon C. E., Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana, IL : University of Illinois Press, 1949, 117 p.
36. Simpson E. H. Measurement of diversity. *Nature*, 1949, vol. 163, pp. 688. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
37. Turan C., Erguden D., Gürlek M. Climate change and biodiversity effects in Turkish seas. *Natural and Engineering Sciences*, 2016, vol. 1, iss. 2, pp. 15–24. <http://dx.doi.org/10.28978/nesciences.286240>
38. Vinogradov M. E., Shushkina E. A., Mikaelyan A. S., Nezhlin N. P. Temporal (seasonal and interannual) changes of ecosystem of the open waters of the Black Sea. *Environmental Degradation of the Black Sea: Challenges and Remedies / S. Beşiktepe, Ü. Ünlüata, A. S. Bologna (Eds)*. Dordrecht : Kluwer Acad. Publ., 1999, pp. 109–129. (NATO Science Series: 2. Environmental Security ; vol. 56).

**STATE OF THE ICHTHYO-, MESO-, AND MACROPLANKTON COMPLEXES
OFF THE CRIMEAN PENINSULA (THE BLACK SEA)
IN CONNECTION WITH THE HYDROBIOLOGICAL REGIME FEATURES
IN OCTOBER 2016**

T. N. Klimova¹, B. E. Anninsky¹, A. A. Subbotin¹, I. V. Vdodovich¹, and P. S. Podrezova

¹A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: tnklim@mail.ru

The changes in the Black Sea hydrological regime recorded since 1990s have altered the state of epipelagic complexes of marine organisms, primarily the seasonal variability of their biological cycles. This largely affected the spawning phenology of natural fish populations, as well as ichthyoplankton species diversity and spatial distribution, and established trophic relationships within the plankton community. The interactions between links of the food chain in epipelagic complexes, as well as their seasonal and interannual variations, ultimately affect fish spawning efficiency, especially that of mass commercial species, and determine the replenishment of their new generations. To establish

ichthyoplankton species composition, abundance, and spatial distribution, the study was carried out in shelf and open areas of the Black Sea (the Crimean coast) during the 89th cruise of the RV “Professor Vodyanitsky” (30 September – 19 October, 2016). Eggs and larvae of fish and the biomass of meso- and macroplankton were analyzed. Ichthyoplankton and macroplankton were sampled with Bogorov–Rass net (inlet area of 0.5 m²; mesh size of 300 μm) by vertical sampling technique. In the shelf areas, sampling was carried out from the bottom up to the surface, while in the deep-sea areas, from the lower boundary of the oxygen zone up to the surface. Ichthyoplankton was fixed with 4% neutralized formaldehyde and investigated under microscope to determine taxonomic composition and, if possible, to analyze contents of fish larvae intestines. Species composition and spatial distribution of ichthyo-, meso-, and macroplankton in October 2016 were studied, as well as the feeding of fish larvae of the Black Sea off the Crimean coast. The research covered the initial phase of the autumn hydrological season. In samples, eggs and larvae of 9 warm-water fish species and 6 temperate-water fish species were found. The mean abundance of eggs was 2.92 ind.·m⁻², and the mean abundance of larvae was 3.56 ind.·m⁻². The low percentage (30%) of dead eggs of the warm-water European anchovy *Engraulis encrasicolus* and the presence of its different-sized larvae evidenced the ongoing productive spawning. The zooplankton biomass increased from the shelf towards the deep-sea areas. Small plankton organisms prevailed in the shelf areas providing enough food for fish larvae to survive. Despite the significant biomass of gelatinous plankton feeders in October 2016, their effect on ichthyoplankton complexes of the Black Sea was apparently minor.

Keywords: ichthyoplankton, mesoplankton, gelatinous macroplankton, feeding of fish larvae, species diversity, spatial distribution, Black Sea

УДК 574.583.033(262.5.04)

**ОБИЛИЕ, ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ
И СТРУКТУРА СООБЩЕСТВА МЕТАЗОЙНОГО МИКРОЗООПЛАНКТОНА
В ГРАДИЕНТЕ БУХТА — ВЗМОРЬЕ
(НА ПРИМЕРЕ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ, ЧЁРНОЕ МОРЕ)**

© 2023 г. С. А. Серегин, Е. В. Попова

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Российская Федерация
E-mail: serg-seryogin@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.02.2021; после доработки 22.04.2021;
принята к публикации 16.02.2023; опубликована онлайн 31.05.2023.

Цель исследования — выявить закономерные изменения в обилии, видовом разнообразии и структуре сообществ метазойного микрозоопланктона (ММ) в градиентных условиях морского побережья на относительно небольших пространственных масштабах. Актуальность работы определяется малочисленностью подобных исследований, позволяющих опосредованно оценить степень антропогенного воздействия на морскую биоту и установить трофический статус локальных акваторий с помощью индексов видового разнообразия. Проанализированы три акватории побережья города Севастополя: открытое взморье, устье Севастопольской бухты и внутренняя её часть. Локализация станций отбора проб отражает градиент условий среды, характеризующийся разной степенью воздействия на биоту природных и антропогенных факторов. Исследования проведены в летний и осенний периоды года. Пробы ММ отбирали из трёх горизонтов водного столба — поверхностного, 0–5-метрового и 0–10-метрового слоёв. В открытом взморье и устье бухты численность ММ по вертикали была более выравненной, тогда как в глубине бухты различия между слоями могли достигать 5–700 раз. Максимальная численность ММ (1837,1 тыс. экз.·м⁻³) отмечена в начале августа в поверхностном слое во внутренней части бухты. С конца лета происходило снижение обилия во всех исследованных акваториях. Видовое разнообразие сообщества ММ, оценённое с помощью индексов Шеннона, Симпсона, Пиелу и др., уменьшалось в направлении от открытого взморья вглубь бухты. Эта закономерность сохранялась в оба сезона. Наиболее информативными оказались индекс Шеннона, индекс полидоминантности Симпсона и индекс выравненности Пиелу. Они хорошо отражали как сезонные изменения видового разнообразия, так и направленность изменений в градиенте трофности локальных акваторий бухты. С помощью многомерного анализа выявлены случаи существенной трансформации в структуре сообщества ММ придонного слоя вод в глубине бухты. Основной вероятной причиной этих локальных изменений является возникновение в загрязнённых участках бухты гипоксических условий в нижних горизонтах вод, приводящее к деградации численности и видового состава исследуемого зоопланктонного сообщества.

Ключевые слова: метазойный микрозоопланктон, обилие, видовое разнообразие, структура сообщества, градиент бухта — взморье, трофический статус акватории

Одним из показателей благополучия экосистемы может служить её видовое разнообразие. В условиях повышенного уровня загрязнения природной среды происходит его снижение — уменьшение видового богатства и изменение распределения видов по их обилию [Мэггаран, 1992]. При этом исчезновение видов отражается на ключевых процессах, важных для продуктивности и устойчивости экосистем. Таким образом, уменьшение биоразнообразия само становится активным фактором, влияющим на функционирование экосистемы, сопоставимым по силе воздействия с такими факторами (драйверами), как глобальное потепление, повышенный уровень CO₂, эвтрофикация и др. [Cardinale et al., 2012; Hooper et al., 2012]. Именно поэтому одной из важнейших задач экологии является исследование причин деградации и путей сохранения/восстановления естественного уровня биоразнообразия в экосистемах, подверженных существенному антропогенному воздействию.

Севастопольская бухта относится к морским акваториям, интенсивно используемым человеком на протяжении нескольких столетий. Она представляет собой полузамкнутую акваторию, ориентированную в широтном направлении с востока на запад и характеризующуюся затруднённым водообменом с открытой (и менее загрязнённой) частью моря. Бухта отличается мелководностью и интенсивной антропогенной нагрузкой, связанной в том числе со стоком реки Чёрная. Имея значительную протяжённость от кутовой части в месте впадения реки до устья бухты и выхода из неё (около 7 км), её акватория характеризуется наличием естественного градиента природных и антропогенных факторов.

В течение многих лет в акватории бухты специалисты проводят мониторинговые исследования гидролого-гидрохимических и биологических характеристик водной среды. В результате работ выделено несколько характерных зон с разной термогалинной и гидрохимической структурой вод, а также определены их сезонные изменения [Иванов и др., 2006]. Рассчитаны индексы трофности разных частей Севастопольской бухты [Совга и др., 2020]. Показано, что различия в численности и смертности зоопланктона связаны с интенсивностью водообмена, сгонно-нагонными ветрами и сезонными изменениями уровня моря [Репетин и др., 2003]. Одним из биологических объектов исследований в бухте является микрозоопланктон [Серегин, Попова, 2017; Seregin, Popova, 2016, 2019]. Это один из ключевых компонентов морских пищевых цепей, осуществляющий передачу значительной части вещества и энергии от низших трофических уровней (фито- и бактериопланктона) к более высоким [Calbet, 2008]. В частности, метазойный микрозоопланктон (далее — ММ) играет существенную роль в питании молоди рыб в Чёрном море [Климова и др., 2017; Мельников и др., 2015]. Особенно ценна его рачковая фракция — важнейшее звено рациона личинок рыб, обеспечивающее условия воспроизводства рыбных ресурсов моря и его локальных акваторий. Подробное изучение состава, экологических особенностей и количественных характеристик ММ имеет большое значение, в том числе в связи с проблемой антропогенного воздействия на прибрежные акватории. Сообщество ММ, представленное в основном короткоживущими видами, способно быстро реагировать на изменения условий окружающей среды, что делает эти организмы удобным объектом для диагностики таких трансформаций, в частности под влиянием антропогенных факторов [Дятлов, 2000]. Например, ранее нами отмечено, что при загрязнении прибрежных морских вод бытовыми стоками в составе ММ возрастает доля коловраток [Серегин, Попова, 2012].

Целью наших исследований было определить возможные различия обилия, видового разнообразия и структуры сообщества метазойного микрозоопланктона на относительно небольших пространственных масштабах градиента открытое взморье — устье бухты — внутренняя часть бухты, характеризующегося различной степенью воздействия природных и антропогенных факторов. Дополнительно мы попытались оценить применимость некоторых индексов видового разнообразия для анализа его изменений в ряду акваторий с разной трофностью вод.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В августе (07.08 и 29.08) и в конце октября — начале ноября (24.10 и 06.11) 2019 г. проведены отборы проб метазоопланктона в трёх точках побережья города Севастополя: в открытом взморье, на траверзе входа в Карантинную бухту (ст. 1, Веха); в устьевой части бухты, напротив Константиновской батареи (ст. 2, Равелин); в глубине Севастопольской бухты, на траверзе Сухарной балки (ст. 3, Сухарная бухта) (рис. 1). Указанные станции соответствуют станциям многолетнего мониторинга в прибрежных водах Севастополя и расположены в локальных акваториях с разной степенью воздействия на биоту природных и антропогенных факторов среды. На каждой из станций отобраны пробы из поверхностного (surface, S) ~ 10-сантиметрового слоя воды, а также из слоёв 0–5 и 0–10 м. Таким образом в летний и осенний периоды отобрано по 18 проб, всего — 36 проб. С поверхности пробы взяты простым зачерпыванием воды пластиковым пробоотборником; в столбе воды пробы отобраны планктонной сетью Апштейна с площадью входного отверстия 0,025 м², оборудованной нейлоновым ситом с ячейей 30 мкм. Применение разных методов отбора проб для изучаемого сообщества, согласно данным наших предыдущих исследований [Seregin, Popova, 2016] и выводам других авторов [Svetlichny et al., 2016], не вносило существенных различий в получаемые результаты. Одновременно с планктонными отбирали пробы для определения солёности, проводили измерения температуры воды в поверхностном слое и на глубине 5 и 10 м при помощи гидрологического термометра, а также фиксировали скорость и направление ветра.

Подготовку и обработку проб проводили в соответствии с [ICES Zooplankton Methodology Manual, 2000]. Собранные поверхностные и сетные пробы доставляли в лабораторию, концентрировали при помощи воронки обратной фильтрации и фиксировали 40%-ным формальдегидом до конечного содержания в пробе 4 %. Анализ всех проб проводили тотально в камере Богорова под микроскопом МБС-9 при 32-кратном увеличении. Науплиусов копепод определяли, руководствуясь [Сажина, 1985]. Подробно процедура описана нами ранее [Seregin, Popova, 2016].

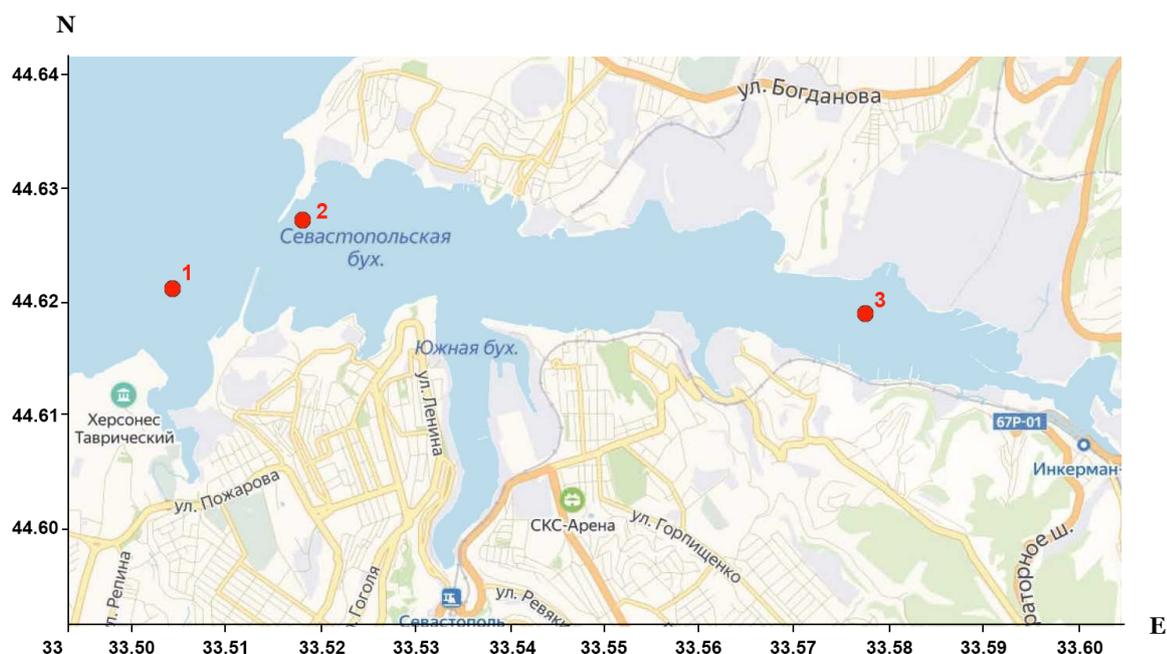


Рис. 1. Картограмма станций отбора проб в побережье города Севастополя: 1 — ст. Веха; 2 — ст. Равелин; 3 — ст. Сухарная бухта

Fig. 1. Schematic map of sampling stations in Sevastopol coastal area: 1, sta. Vekha; 2, sta. Ravelin; 3, sta. Sukharnaya Bay

Результаты количественной обработки проб представляли как концентрацию организмов (экз.·м⁻³) в поверхностном слое, в подлежащем под ним 0,1–5-метровом («среднем», Nm) и в 5–10-метровом («глубоком», Nb) слоях. Расчёт численности ММ (тыс. экз.·м⁻³) в слоях 0,1–5 (Nm) и 5–10 м (Nb) производили по формулам (1, 2):

$$Nm = (N_5 \times 5 - N_0 \times 0,1) / (h_5 - h_0), \quad (1)$$

$$Nb = (N_{10} \times 10 - N_5 \times 5) / (h_{10} - h_5), \quad (2)$$

где N_0 — численность метазойного микрозоопланктона в поверхностном слое;

N_5 — численность в слое 0–5 м;

N_{10} — численность в слое 0–10 м;

h — вертикальная протяжённость слоя.

Обработка полученных данных проведена в программе PRIMER v5 [Clarke et al., 2014]. Исходные данные по численности ММ для включения в общую матрицу результатов предварительно $\sqrt{\quad}$ -трансформированы для снижения возможного влияния значительно более высокой численности массовых видов. Программа позволяет рассчитывать, в частности, индексы видового разнообразия, из которых мы использовали несколько наиболее употребляемых [Мэгарран, 1992; Шитиков и др., 2003]:

1. Информационный индекс Шеннона, $H' = -\sum p_i \ln p_i$, где H' — численное значение индекса Шеннона; $i = 1, 2 \dots S$; S — количество видов; p_i — доля в пробе особей i -го вида; $p_i = n_i / N$; n_i — численность i -го вида; N — общая численность.
2. Индекс Симпсона, D , в двух формах:
 - 2.1. Вероятность межвидовых встреч, PIE (probability of interspecific encounters), $PIE = 1 - D = 1 - \sum (p_i^2)$, где D — вероятность того, что две подряд изъятые особи принадлежат одному виду (остальные обозначения — те же, что в индексе Шеннона).
 - 2.2. Индекс полидоминантности, $1 / D$.
3. Индекс выравнивания Пиелу, $E = H' / H_{max} = H' / \ln S$.
4. Индекс видового богатства Маргалёфа, $D_{Mg} = (S - 1) / \ln N$.
5. Индекс Бриллюэна, $HB = (\ln N! - \sum \ln n_i!) / N$.

Относительно большое количество использованных индексов продиктовано следующими соображениями. Несмотря на то, что оценки различных индексов для одних и тех же сообществ часто коррелируют друг с другом, некоторые исследователи применение какого-либо одного из них (богатства, разнообразия, выравнивания) без параллельных сведений о поведении индексов других типов или даже близких по смыслу считают неправильным [Песенко, 1982]. В частности, ранее нами было показано, что для оценки короткопериодной динамики изменения видового разнообразия сообщества ММ более информативным оказался индекс Шеннона, значение которого на несколько дней раньше, чем таковое индекса Симпсона, отреагировало на изменение видовой структуры сообщества [Серегин, Попова, 2017].

Сходство/различие структуры сообщества ММ на разных станциях, глубинах и в разные моменты времени оценивали по коэффициенту Брея — Кёртиса. Для графического отображения меры сходства/различия использовали кластерный анализ (по методу групповых средних, group average) и метод многомерного масштабирования (multidimensional scaling, MDS-анализ). Оценку вклада разных видов в сходство и различие структуры ММ на различных станциях и горизонтах отбора проб в разное время проводили с помощью программы SIMPER из пакета PRIMER v5.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Характеристика погодных и гидрологических условий во время отбора проб. Сборы 7 и 29 августа почти не различались по метеоусловиям. Температура воздуха (ночью...днём) составляла +19...+29 и +20,5...+30,5 °С соответственно (<http://www.sevmeteo.info>). В обоих случаях ветер был северо-западного направления и незначительной скорости — менее 1 м·с⁻¹ в начале месяца и 1–2 м·с⁻¹ в конце. При этом на станции в глубине бухты (на траверзе Сухарной бухты) в обе даты зарегистрированы штилевые условия. Температура верхнего 10-метрового слоя вод в начале августа характеризовалась следующими цифрами (на глубине 10 м и на поверхности): +21,3 и +25,7 °С в открытом побережье; +18,0 и +25,6 °С в устье бухты; +24,0 и +26,1 °С в глубине бухты. Солёность поверхностного слоя варьировала незначительно — 18,00–18,03 и 18,06 ‰. В конце августа температура составляла +24,2 и +24,4 °С; +24,1 и +24,5 °С; +23,8 и +24,6 °С соответственно.

В октябре ветер характеризовался некоторым увеличением скорости (до 2–4 м·с⁻¹) и почти тем же направлением (северо-северо-западным). Температура воздуха изменялась от +13,0 °С ночью до +25,0 °С днём. Температура воды на глубине 10 м и на поверхности заметно снизилась и составляла +17,4 и +18,1 °С в открытом побережье; +17,2 и +17,8 °С в устье бухты; +17,4 и +17,7 °С в глубине бухты. Солёность поверхностного слоя воды — 18,28–18,09 и 17,89 ‰ соответственно.

Начало ноября было отмечено усилением ветров южного направления до 6–7 м·с⁻¹ и дальнейшим понижением температуры воды: значения составили +16,0 и +17,0 °С в открытом побережье; +16,5 и +16,8 °С в устье бухты; +14,3 и +15,2 °С в глубине бухты. Температура воздуха варьировала от +16,0 до +22,0 °С.

Показатели обилия метазойного микрозоопланктона. Общая численность ММ в открытом побережье в начале августа составляла 331,7 тыс. экз·м⁻³ в поверхностном слое; 110,9 тыс. экз·м⁻³ в слое 0,1–5 м; 312,5 тыс. экз·м⁻³ в слое 5–10 м. В устье бухты значения обилия ММ были следующими: 138,1; 216,1; 103,0 тыс. экз·м⁻³ соответственно. В глубине бухты численность ММ достигала 1837,1; 340,2; 2,6 тыс. экз·м⁻³ соответственно. Таким образом, в море и устье бухты численность ММ по вертикали была более выравненной, тогда как в глубине бухты различия между слоями достигали 5–700 раз. Максимальная численность была зарегистрирована в глубине бухты в поверхностном слое и стала рекордной за 10-летний период наблюдений в Севастопольской бухте [Seregin, Popova, 2019].

В конце месяца численность ММ значительно изменилась как по станциям, так и по глубинам. Относительно неизменным оставалось только обилие ММ в поверхностном слое открытого взморья — 311,5 тыс. экз·м⁻³. В подстилающих слоях обилие снизилось на порядок и составило 24,4 и 24,7 тыс. экз·м⁻³. В итоге средневзвешенная численность в столбе воды уменьшилась более чем в 7 раз. В устье бухты численность ММ возросла на поверхности в несколько раз по сравнению со значением в начале месяца (до 708,4 тыс. экз·м⁻³), а в нижних слоях была в 20 раз меньше поверхностной. Средневзвешенное содержание ММ уменьшилось по сравнению с таковым для начала месяца примерно в 4 раза. В глубине бухты численность на поверхности значительно понизилась, а средневзвешенная численность во всём исследованном слое возросла примерно в 6 раз, прежде всего за счёт её увеличения в придонном слое; в целом распределение обилия по вертикали стало более равномерным (табл. 1).

В осенний период происходило дальнейшее снижение общей численности ММ в столбе воды на каждой из исследованных станций. Вертикальная структура микропланктонного сообщества в большинстве случаев характеризовалась уменьшением обилия от поверхности к более глубоким слоям воды. В ноябре на ст. 3 повторилась ситуация начала августа, когда в нижнем слое концентрация ММ была очень низкой — на 2 с лишним порядка ниже поверхностной (табл. 1).

Таблица 1. Общая численность ($\times 10^3$ экз. \cdot м $^{-3}$) метазойного микрозоопланктона в прибрежье Севастополя по датам отбора проб**Table 1.** Metazoan microzooplankton total abundance ($\times 10^3$ ind. \cdot м $^{-3}$) in Sevastopol coastal area by sampling dates

Станция	Слой	Лето		Осень	
		07.08.2019	29.08.2019	24.10.2019	06.11.2019
Ст. 1 (открытое взморье)	Поверхность	331,7	311,5	132,5	110,3
	0,1–5 м	111,0	24,4	55,9	14,5
	5–10 м	306,8	24,7	37,5	18,2
Ст. 2 (устье бухты)	Поверхность	138,1	708,4	420,0	136,6
	0,1–5 м	215,7	30,7	185,5	28,1
	5–10 м	88,3	29,8	9,4	46,3
Ст. 3 (в глубине бухты)	Поверхность	1830,2	291,1	274,0	309,1
	0,1–5 м	314,4	78,2	182,6	182,6
	5–10 м	2,6	125,8	171,7	1,2

Характеристика видового разнообразия. В составе ММ в анализируемый период выделяли рачковую и нерачковую фракции. Первая состояла из науплиусов и копеподитных стадий черноморских копепод — рода *Acartia* Dana, 1846, *Paracalanus parvus* (Claus, 1863), *Pseudocalanus elongatus* (Boeck, 1865), *Centropages ponticus* Karavaev, 1895, *Oithona davisae* Ferrari F. D. & Orsi, 1984, *Oithona similis* Claus, 1866, *Pseudodiaptomus marinus* Sato, 1913, *Calanus euxinus* Hulsemann, 1991, гарпактицид. Также в рачковую фракцию входили науплиусы и циприсы усонюгих раков, клadoцеры *Pleopis polyphemoides* (Leuckart, 1859), очень редко — малоразмерные *Penilia avirostris* Dana, 1849. В нерачковой фракции доминировали велигеры двустворчатых и брюхоногих моллюсков и личинки полихет; в малых количествах встречались коловратки, личинки аппендикулярий *Oikopleura dioica* Fol, 1872, гребневиков *Beroe ovata* Bruguière, 1789 и *Pleurobrachia pileus* (O. F. Müller, 1776), форонид, а также некоторые другие организмы.

В начале августа в открытом прибрежье отмечено от 22 до 34 видов и жизненных форм ММ, причём на поверхности их зарегистрировано заметно меньше, чем в более глубоких слоях. Сходная зависимость распределения ММ выявлена на станции в устье бухты: зафиксировано от 19 до 35 видов и стадий с максимальным количеством видов в среднем слое. На ст. 3 (в глубине бухты) учитываемое разнообразие варьировало от 15 до 30 видов, а распределение по горизонтам было прямо противоположным таковому на ст. 1 и 2: максимальное число видов отмечено в поверхностном слое, их количество снижалось с глубиной. В нижнем слое обнаружено в 2 раза меньше видов, чем в верхних слоях. Рачковый планктон в нижнем слое был представлен младшими стадиями копепод *O. similis*, *P. parvus* и *P. elongatus* (все — относительно холодноводные), науплиусами гарпактицид и клadoцерами *P. polyphemoides*; в нерачковом зафиксированы *O. dioica*, гребневики *B. ovata* и *P. pileus*, турбеллярии.

В конце августа зарегистрирована более выравненная картина с распределением видов как по станциям, так и по глубинам. Ситуация с резким уменьшением количества видов в придонном слое повторилась в конце октября на ст. 2 и в начале ноября — на ст. 3. В табл. 2 представлены средние по сезонам индексы видового разнообразия, рассчитанные в программе PRIMER с учётом всех дат, станций и слоёв водного столба.

Индекс Маргалефа отражает видовое богатство в определённом местообитании по соотношению числа видов и их численности: чем выше индекс, тем бóльшим видовым богатством характеризуется данный биотоп [Шитиков и др., 2003]. Таким образом, максимальное видовое богатство в летний период отмечено на ст. 1 (в открытом прибрежье): средневзвешенный

индекс Маргалефа в толще водного столба составлял 2,71. Величины для устья бухты и её внутренней части — 2,23 и 2,02 соответственно. Осенью зафиксировано небольшое уменьшение видового богатства при сохранении закономерности в градиенте открытое взморье — устье — бухта: средневзвешенные показатели индекса Маргалефа составляли 2,52 – 2,10 – 1,85 соответственно.

Таблица 2. Средние за сезон величины индексов видового разнообразия

Table 2. Seasonal mean values of species diversity indices

Сезон	Станция	Слой, м	Средние за сезон индексы видового богатства и разнообразия					
			Маргалефа, D_{Mg}	Шеннона, H'	Симпсона, PIE	Симпсона, $1/D$	Бриллуэна, HB	Пиелу, E
Позднелетний	1	0	1,85	1,17	0,45	1,83	1,17	0,36
		0,1–5	2,72	2,09	0,79	4,64	2,09	0,61
		5–10	2,74	2,21	0,82	6,20	2,21	0,64
	2	0	1,58	0,97	0,38	1,78	0,96	0,33
		0,1–5	2,49	1,90	0,70	4,18	1,9	0,58
		5–10	2,01	1,60	0,64	2,90	1,59	0,51
	3	0	1,96	1,27	0,49	2,54	1,26	0,39
		0,1–5	2,27	1,49	0,59	2,46	1,49	0,45
		5–10	1,78	1,56	0,62	3,36	1,54	0,55
Осенний	1	0	1,80	1,81	0,74	3,91	1,81	0,59
		0,1–5	2,83	1,75	0,71	3,53	1,74	0,52
		5–10	2,24	1,77	0,72	4,17	1,76	0,56
	2	0	1,94	1,90	0,77	4,28	1,90	0,59
		0,1–5	2,28	1,80	0,71	3,63	1,80	0,57
		5–10	1,93	1,73	0,74	3,85	1,73	0,59
	3	0	1,59	1,72	0,70	3,48	1,73	0,57
		0,1–5	2,22	1,68	0,70	3,45	1,68	0,51
		5–10	1,50	1,37	0,58	2,4	1,36	0,53

Информационный индекс Шеннона (см. табл. 2) объединяет видовое богатство и выравненность в одну величину и количественно дифференцирует системы с одинаковым видовым богатством, но с разной степенью доминирования тех или других видов [Шитиков и др., 2003]. Для летнего периода средневзвешенные значения индекса в исследуемом 10-метровом слое вод в градиенте открытое взморье — устье — бухта составляли 2,14 – 1,74 – 1,52; это подтверждало, что наибольшее видовое разнообразие характерно для морских вод за пределами бухты, а по мере продвижения вглубь бухты видовое богатство и выравненность снижаются. В осеннее время показатели индекса Шеннона составили 1,76 – 1,77 – 1,52, свидетельствуя о статус-кво биоразнообразия в глубине бухты, а также о более высоком (и одинаковом) его состоянии в территориально наиболее близких акваториях устья бухты и открытого взморья. При этом уровень видового разнообразия в открытых водах несколько снизился по сравнению с таковым для летнего периода. Такой же результат засвидетельствовал индекс Симпсона, PIE . Средневзвешенные показатели летом составили 0,80 – 0,67 – 0,60, а осенью — 0,72 – 0,72 – 0,64.

Индекс Бриллуэна, который применяется в случае, если не гарантируется случайный отбор объектов или же не учитываются все виды сообщества, использован нами в качестве контроля. Его величины практически полностью совпадают со значениями индекса Шеннона и отражают уже отмеченные закономерности изменения биоразнообразия в исследованных акваториях (табл. 2).

Для оценки выравненности распределения видов нами дополнительно использован индекс Пиелу, *E*. Бóльшее его значение соответствует бóльшей выравненности распределения видов по их относительному обилию. Средневзвешенные показатели индекса Пиелу для станций в градиенте открытое взморье — устье — бухта летом составляли 0,62 – 0,54 – 0,50, а осенью — 0,54 – 0,58 – 0,52. Таким образом, в летний период распределение видов в открытом взморье более выравнено, чем в устье бухты и тем более в её внутренней части. В осеннее время бóльшая выравненность была характерна для устья бухты; минимальной она оставалась во внутренней её части.

Сходство/различие структуры сообщества. Рассчитанные величины коэффициентов Брея — Кёртиса свидетельствуют на первый взгляд о довольно значительном варьировании уровня сходства сообщества ММ на разных станциях и горизонтах в различные периоды времени. В целом по всем данным коэффициент сходства изменялся от 0,5 до 85,1 %. Значения коэффициента сходства до 50,0 % составляли 43 % всех случаев; остальные данные свидетельствовали о более высоком уровне сходства. Случаи низкого сходства (не выше 24 %) — около 10 % всех попарных сравнений. Эти исключения составили данные, полученные в нижнем слое ст. 3 в начале августа и в ноябре, а также в этом же слое на ст. 2 в конце октября. Графическое отображение полученных с использованием кластерного и MDS-анализа результатов приведено на рис. 2.

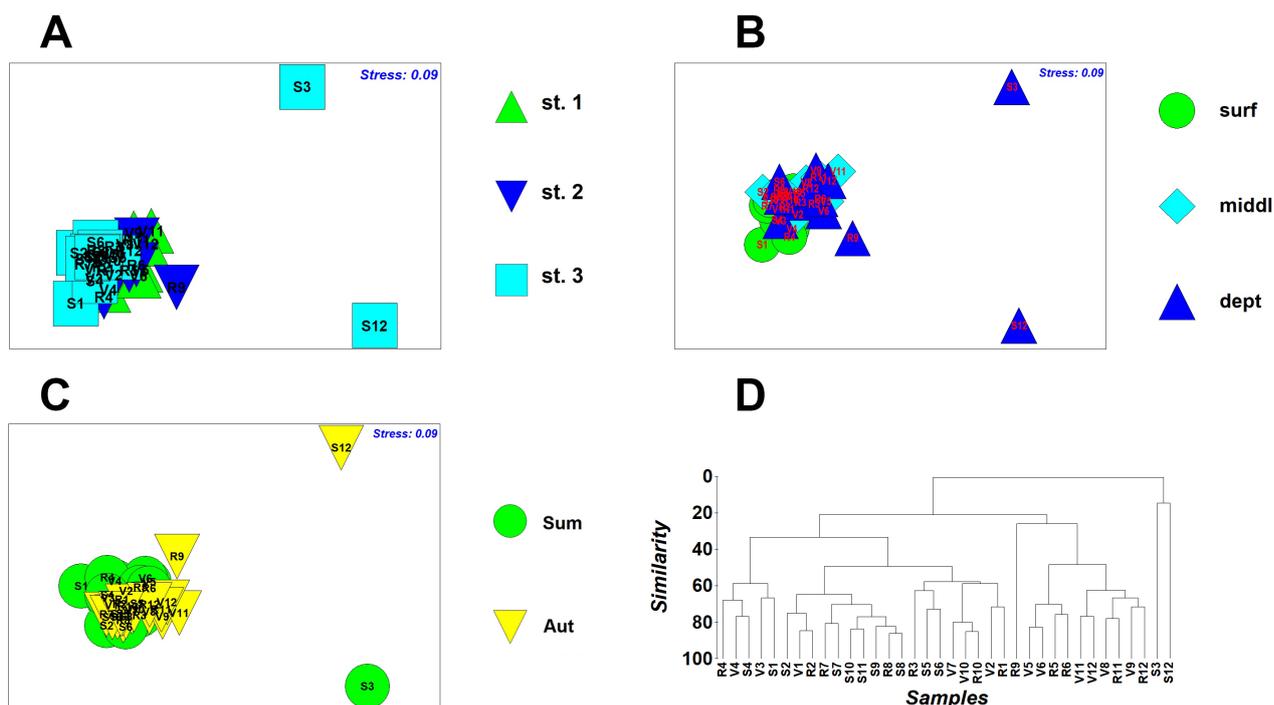


Рис. 2. Графический (2D) результат MDS-анализа структуры сообщества метазойного микрозоопланктона на разных станциях (A), глубинах (B) и в зависимости от сезона (C); диаграмма кластерного анализа всей суммы данных (D): V — ст. 1; R — ст. 2; S — ст. 3. Цифрами от 1 до 12 обозначены последовательные номера проб по горизонтам и датам: 1–6 — для летнего сезона; 7–12 — для осеннего

Fig. 2. Graphical (2D) result of MDS analysis of the structure of the metazoan microzooplankton community at different stations (A), at different depths (B), and depending on the season (C); diagram of cluster analysis of the entire data set (D): V, sta. 1; R, sta. 2; S, sta. 3. Numbers 1 to 12 are successive sample numbers by horizons and dates: 1–6, for summer season; 7–12, for autumn season

Средний уровень сходства для станций (включая все горизонты и сроки взятия проб) составил: для ст. 1 — 34,4 %; для ст. 2 — 35,8 %; для ст. 3 — 35,0 %. Средний уровень различий между станциями варьировал от 63,2 до 72,1 %. Средний уровень сходства для слоёв облова имел следующие значения: для поверхностного слоя — 41,9 %; для среднего — 41,2 %; для придонного — всего 26,7 %. Уровень различий колебался от 63,8 до 74,4 %. Сходство по сезонам (для всех станций и глубин) составляло 30,8 % для лета и 39,3 % для осени; различия были значительно выше — 67,9 %.

Рассмотрим случаи наиболее низкого сходства. На ст. 3 (в глубине бухты) 7 августа уровень сходства в придонном слое по отношению к поверхностному и среднему был всего 8,2 и 4,4 % соответственно. По отношению к остальным станциям, горизонтам и сезонам он составлял менее 24,0 %. Как продемонстрировано выше, показатели обилия и видовой состав на этой станции в придонном слое были значительно обеднены по сравнению с таковыми для верхних слоёв и остальных станций. Подобная ситуация повторилась для этого же местообитания в начале ноября (06.11.2019): уровень сходства сообщества ММ равнялся 5,2 и 6,7 % по отношению к верхним слоям (между ними уровень сходства по Брею — Кёртису составил 83,7 %) и не превышал 23,0 % по отношению к остальным станциям, горизонтам и сезонам. Количественные и качественные показатели сообщества ММ были также резко обеднены по сравнению с таковыми для остальных станций и глубин отбора проб. Показатели обилия и видового богатства сообщества на ст. 2 в слое 5–10 м 24.10.2019 занимают промежуточное положение между основным массивом данных и вышеуказанными показателями ММ в глубине бухты. Уровень сходства с поверхностным и средним слоем (коэффициент Брею — Кёртиса между ними равен 72,9 %) составлял 33,3 и 29,9 % соответственно, а с остальными показателями он варьировал от 19 до 45 %.

Результаты анализа видового состава ММ с помощью программы SIMPER свидетельствуют, что наибольшее влияние на сходство/различие структуры исследуемого сообщества оказывали самые массовые виды. Из рачковой фракции к ним относятся различные возрастные стадии копеподы *O. davisae*, науплиальные стадии акарциид и изредка — науплиусы *P. parvus*. Из нерачковой фракции наиболее значимыми были велигеры двустворчатых моллюсков и личинки полихет; менее значимыми — велигеры брюхоногих моллюсков и личинки *O. dioica*. При этом изменения численности *O. davisae* определяли от 73,7 до 84,3 % в доле сходства станций (по всем глубинам и срокам отбора проб), от 65,5 до 81,7 % — в доле сходства глубин (по всем станциям и срокам) и от 69,2 до 82,2 % — в доле сходства сезонов (по всем станциям и глубинам).

ОБСУЖДЕНИЕ

Видовое разнообразие и трофические условия акваторий. Согласно данным многолетних исследований сотрудников ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», открытая часть моря в непосредственной близости от входа в бухту является менее загрязнённой акваторией, чем воды бухты, в силу затруднённого водообмена между бухтой и морем [Иванов и др., 2006; Кондратьев, Видничук, 2020; Слепчук и др., 2017; Совга и др., 2020]. Если участок акватории у ст. 1 (в открытом побережье) принять за условно чистый, то можно заключить, что район ст. 2 (в устье Севастопольской бухты) характеризуется слабым загрязнением, а местоположение ст. 3 — сильным (рис. 3).

Следует учитывать, что вертикальная структура течений в водах Севастопольской бухты, особенно в её более глубоководной части, характеризуется выраженной двухслойностью: в поверхностном слое течение направлено внутрь бухты, на восток, в придонном слое — к выходу из бухты, на запад [Лемешко и др., 2014]. Таким образом, движение условно чистых вод (при соответствующих гидродинамических и метеорологических условиях) направлено внутрь бухты по поверхности, а распространение загрязнённых и более трофных вод из кутовой и средней части бухты в сторону её устья происходит в нижнем горизонте.

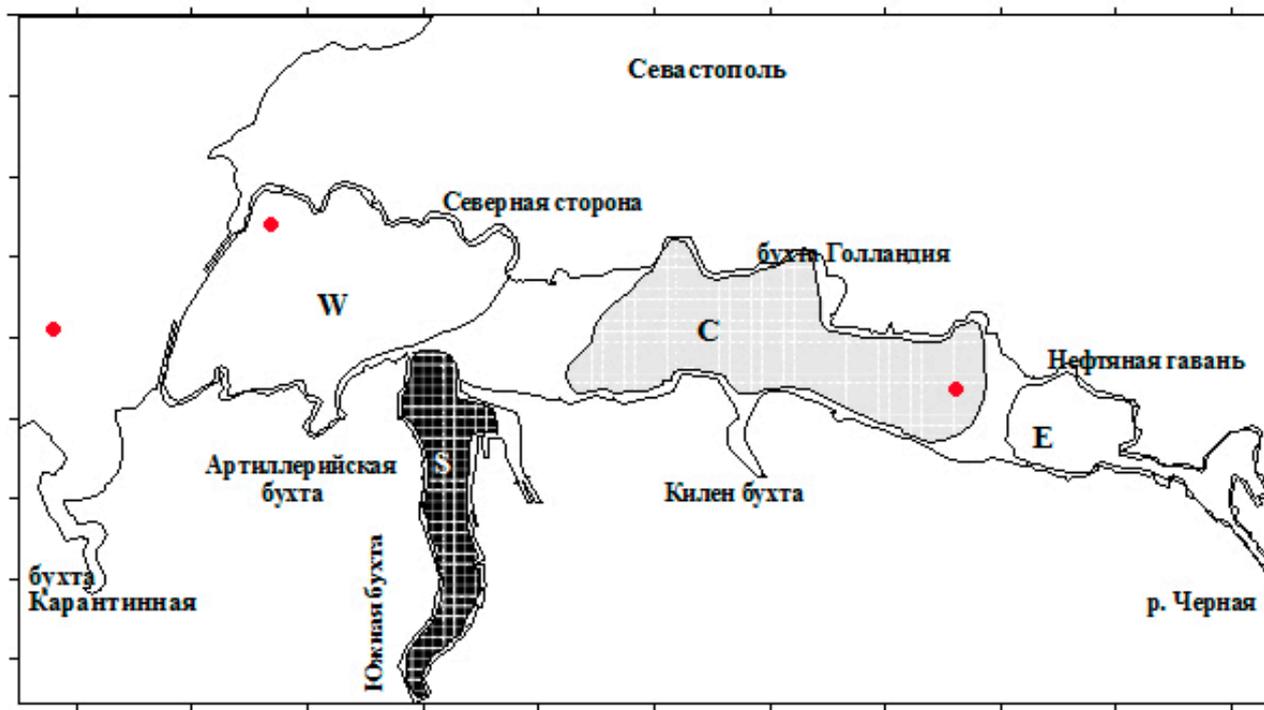


Рис. 3. Районирование Севастопольской бухты по уровню загрязнения воды (согласно [Иванов и др., 2006]): районы слабого (W), умеренного (E), сильного (C) и очень сильного (S) загрязнения. Красными кружочками обозначены наши станции отбора проб

Fig. 3. Zoning of the Sevastopol Bay by the level of water pollution (according to [Ivanov et al., 2006]): areas of low (W), moderate (E), high (C), and very high (S) pollution. Our sampling stations are marked with red circles

Причиной эвтрофирования водоёмов обычно является избыточное поступление в них биогенных элементов и легкоокисляемой органики, главными источниками которых выступают речной сток и промышленно-бытовые сточные воды. В Севастопольской бухте это сток реки Чёрная, неочищенные или условно очищенные сточные воды, а также ливневые воды с площади водосбора, в результате влияния которых возникают различия в уровне первичного продуцирования органического вещества в разных локациях бухты [Иванов и др., 2006]. С учётом основных источников загрязнения и эвтрофирования трофность вод бухты является более высокой в кутовой и особенно в средней её части и менее значимой в устьевой зоне. В целом уровень трофности вод Севастопольской бухты характеризуется как переходный от низкого к среднему, а основным определяющим его фактором являются неорганические формы азота [Слепчук и др., 2017; Совга и др., 2020].

Применение индексов альфа-разнообразия для водных экосистем даёт возможность не только определить собственно видовое разнообразие биоты водоёма или его части (акватории), но и косвенно оценить их трофический статус. Такой подход реализован в схемах комплексного использования и охраны водных ресурсов (КИОВР) при оценке состояния водных экосистем [2021]. Полученные нами результаты по биоразнообразию сообщества ММ на достаточно малых пространственных масштабах исследованной акватории вполне согласуются с общими положениями этого подхода. Бóльшее биоразнообразие сообщества обнаружено в более чистых акваториях, и наоборот: при более выраженной антропогенной нагрузке на акваторию отмечено снижение биоразнообразия. Учитывая одинаковость систематического состава ММ

в пределах анализируемой акватории, полагаем, что различия в биоразнообразии и структуре сообщества между станциями складывались прежде всего за счёт различий в численности и степени доминирования наиболее массовых видов.

Оценка трофического статуса исследованных акваторий на основе полученных значений индекса Шеннона, используемого в расчётах КИОВР, получается следующей. В летний период для открытого взморья характерен олиготрофный статус вод, для устья бухты — мезотрофный, а для внутренней её части — переходный от мезотрофного к гипертрофному. В осенний период статус трофности в градиенте открытое взморье — устье бухты — бухта характеризовался как мезотрофный — мезотрофный — переходный к гипертрофному. Некоторое повышение трофности открытых вод можно отнести, скорее всего, к росту обилия фитопланктона в Чёрном море в октябре — ноябре [Финенко и др., 2019] и к сопутствующему увеличению концентрации в воде органического вещества. Оценка уровня трофности прибрежных вод Севастополя с помощью индекса эвтрофикации E-TRIX [Vollenweider et al., 1998] также показала, что сезонные максимумы трофности совпадают с пиками цветения фитопланктона — осенним и весенним. Для Севастопольской бухты уровень трофности вод был оценён как переходный от низкого к среднему [Слепчук и др., 2017]. Индекс Шеннона довольно часто используют при мониторинге загрязнений среды обитания и при оценке трофического статуса водных экосистем. Было показано, например, что значение индекса при исследовании разнообразия рыб резко увеличивается по мере удаления от места сбросов в воду отходов [Мэгарран, 1992]. При изучении зоопланктона в озёрах чебаркульской группы прослежена чёткая зависимость индекса Шеннона (по численности разных видов) от трофического статуса водоёма [Пузнецките, Марушкина, 2005]. По результатам проведённых нами исследований видового разнообразия в мае — июне 2013 г. в устье Севастопольской бухты эти воды охарактеризованы как мезотрофные [Серегин, Попова, 2017]. Подобный результат был зафиксирован ранее с использованием индексов загрязнения и индекса трофности E-TRIX [Губанов и др., 2002].

Индекс Симпсона, *PIE*, характеризовал видовое разнообразие сообщества ММ как высокое летом и осенью в открытых водах взморья, а только осенью — в устье бухты. Внутри бухты разнообразие ММ оценено как умеренное. Некоторым неудобством применения этого индекса можно считать его недостаточную наглядность и «разрешающую способность»: его значения имеют узкий размах варьирования даже при сильных изменениях условий обитания и характеристик сообществ, аналогично ситуации с индексом выравненности Пиелу [Пузнецките, Марушкина, 2005]. К тому же, как показало наше изучение короткопериодной изменчивости ММ, индекс *PIE* может с запозданием реагировать на изменение видового состава сообщества по сравнению с индексом Шеннона [Серегин, Попова, 2017]. Многие исследователи считают лучшей мерой оценки альфа-разнообразия индекс полидоминантности Симпсона [Шитиков и др., 2003]. Средневзвешенные его значения для водного столба продемонстрировали более наглядные различия видового разнообразия в градиенте открытое взморье — устье бухты — бухта. Для летнего периода они составляли 5,46 – 3,51 – 2,90, а для осеннего — 3,85 – 3,78 – 2,92 соответственно. Таким образом, в них отразились как различия месторасположения станций в градиенте трофности, так и отчасти сезонные изменения видового разнообразия.

Невысокие величины индекса выравненности Пиелу свидетельствовали в целом о выраженной степени доминирования массовых видов в сообществе ММ побережья Севастополя. Действительно, в летнем и осеннем зоопланктоне изучаемых акваторий в последние годы доминирует недавний вселенец в Чёрное море — неритический вид копепод *O. davisae*. Численность разновозрастных стадий этого вида, особенно внутри бухты, может достигать 90 % и большего процента общей численности ММ, сильно воздействуя на показатели выравненности видового состава сообщества [Seregin, Popova, 2016, 2019]. Ранее для прибрежных вод Средиземного моря было

показано, что высокая численность представителей семейства Oithonidae часто связана с повышенным уровнем антропогенного прессинга на морские прибрежные акватории, а эти виды могут являться биоиндикаторами антропогенного загрязнения [Dřira et al., 2018; Serranito et al., 2016]. В нашем случае доля влияния *O. davisae* на показатель сходства структуры сообщества в исследованном градиенте станций увеличивалась от 73,7 % на ст. 1 (в открытом побережье) до 79,3 % на ст. 2 (в устье бухты) и 84,3 % на ст. 3 (в глубине бухты). Данный вид обладает биоиндикаторными свойствами, поскольку параметры его численности способны отражать повышенный уровень трофности акваторий. Отметим, что одновременно с увеличением вклада *O. davisae* по градиенту открытое взморье — устье бухты — бухта снижалась доля влияния акарциид (7,9 – 6,7 – 4,3 % соответственно) и велигеров двустворчатых моллюсков (6,5 – 5,6 – 2,6 %).

Различия в структуре сообщества и влияние на неё факторов среды. Результаты исследования показали, что наиболее существенные изменения в структуре сообщества ММ связаны с нижним слоем вод в глубине бухты (ст. 3). Они сопровождались как значительным уменьшением общей численности, так и редукцией обилия видов.

Ситуация в устье бухты (ст. 2) в слое 5–10 м 24.10.2019 занимает промежуточное положение между состоянием сообщества ММ в глубине бухты и в открытых водах. Видовой состав на ст. 2 был богаче, чем на ст. 3 в ноябре, но беднее, чем летом. Рачковая фракция состояла из мелких науплиусов и копеподитов II стадии *P. parvus*, поздних науплиусов и копеподитов II–III *O. davisae*, копеподитов II *A. clausi*, младших копеподитов *P. marinus*, науплиусов гарпактицид, а также кладоцер *P. polyphemoides* и Isopoda. В нерачковой фракции преобладали мелкие велигеры *Bivalvia*. По сравнению с верхними слоями здесь выявлено отсутствие циррипедий, копеподитных стадий гарпактицид, полного спектра стадий *P. parvus*, *O. davisae*, *A. clausi* и *P. marinus*, а из нерачкового планктона — отсутствие *O. dioica*, *Pleurobrachia*, полихет и гидромедуз. Коэффициенты различий с вышележащими слоями составляли 66,7 % с поверхностью и 70,1 % со средним слоем; они были ниже, чем соответствующие коэффициенты на ст. 3 (91,7 и 95,6 % летом; 94,8 и 93,3 % осенью). Данный факт может быть объяснён меньшей интенсивностью отрицательного воздействия неблагоприятных факторов среды на ММ в устье бухты, чем в её внутренней части.

Анализируя погодные и гидрологические условия во время сбора проб, следует отметить, что на ст. 3 в начале августа зафиксированы самая высокая температура (+24...+26,1 °C) и штиль. Такие условия при развитой летней вертикальной стратификации вод бухты могут способствовать меньшему содержанию кислорода в более глубоких слоях воды. «...В годы с жаркими, маловетренными летними сезонами из-за ослабления динамических процессов обостряются негативные для экосистемы явления. В частности, явления гипоксии отмечались в придонных слоях бухты, когда насыщение вод кислородом было менее 50 %» [Иванов и др., 2006, с. 24]. Этому способствует сброс неочищенных бытовых стоков и так называемый летний пик развития фитопланктона, не свойственный открытым районам моря, а характерный только для загрязнённых акваторий [Иванов и др., 2006]. Процесс деоксигенации морских прибрежных вод в результате человеческой деятельности — проблема для всего Мирового океана [Rabalais et al., 2014]. Анализ данных летних съёмок за последние 10 лет в Севастопольской бухте показал регулярное возникновение гипоксических условий и образование сероводорода у дна на соседней со ст. 3 станции 8 [Кондратьев, Видничук, 2020]. По их же данным, относительное содержание кислорода в придонном слое на ст. 3 в августе 2019 г. также было пониженным и составляло всего 56 % насыщения. Вполне вероятно, что ситуация со снижением численности и видового богатства ММ на ст. 2 (в устье бухты) в октябре связана с распространением загрязнённых вод из средней части Севастопольской бухты с придонной струёй течения в ней [Лемешко и др., 2014]. По пути к устью бухты концентрация контаминантов уменьшалась вследствие разбавления; соответственно, снижалось деградирующее воздействие на структуру сообщества. Возникновению подобных

негативных явлений в сообществе ММ в осенний период могут способствовать и сезонные изменения уровня Чёрного моря, которые играют наибольшую роль в процессах водообмена Севастопольской бухты. Многолетние исследования показали, что чаще всего минимальные уровни моря наблюдаются в октябре — ноябре [Горячкин, Иванов, 2006]. В это время снижается поступление более чистых вод открытого моря в бухту, что может приводить к общему уменьшению биомассы и численности зоопланктонных организмов [Репетин и др., 2003].

Вывод. Летом в поверхностном слое вод открытого побережья численность метазойного микрозоопланктона (ММ) характеризовалась относительной стабильностью и составляла от 310×10^3 до 330×10^3 экз. \cdot м⁻³. Колебания численности ММ в устье бухты в этом слое были значительно больше — от 140×10^3 до 700×10^3 экз. \cdot м⁻³. Максимальная численность была отмечена на поверхности в глубине Севастопольской бухты и являлась рекордной за весь период 10-летних наблюдений в ней. Численность ММ по вертикали в открытом море и устье бухты была более выравненной, тогда как в глубине бухты различия между слоями достигали в определённые моменты 5–700 раз. В осенний период зафиксировано снижение общей численности ММ в столбе воды для всех исследованных станций. Вертикальная структура в большинстве случаев характеризовалась уменьшением обилия от поверхности к более глубоким слоям воды.

Направленность изменений видового разнообразия сообщества ММ характеризовалась уменьшением в градиенте открытое взморье — устье бухты — внутренняя её часть в соответствии с возрастающей загрязнённостью и трофностью вод бухты вследствие повышения антропогенного воздействия на биоту. Эта закономерность сохранялась и в летний, и в осенний сезон. Наиболее информативными из использованных оказались индекс Шеннона, индекс полидоминантности Симпсона и индекс выравненности Пиелу. Они хорошо отражали сезонные изменения видового разнообразия и направленность в градиенте трофности локальных акваторий бухты. Средневзвешенные показатели индекса биоразнообразия для всего столба воды свидетельствовали о том, что статус открытых вод характеризовался чаще всего как олиготрофный, в устье бухты — мезотрофный, а в её глубине — как переходный от мезо- к гипертрофному.

Невысокие значения индекса выравненности Пиелу указывали в целом на выраженную степень доминирования массовых видов в сообществе ММ побережья города Севастополя, в частности копеподы *Oithona davisae* — недавнего вселенца в Чёрное море. Вид обладает биоиндикаторными свойствами, и его количественные характеристики могут быть использованы в оценке трофического статуса акваторий. Его вклад в показатель сходства структуры сообщества в исследованном градиенте от открытых вод до глубины бухты увеличивался от 73,7 % на ст. 1 (в открытом взморье) до 79,3 % на ст. 2 (в устье бухты) и до 84,3 % на ст. 3 (в глубине бухты). Одновременно по градиенту снижалась доля влияния акарциид (7,9 – 6,7 – 4,3 % соответственно) и велигеров двустворчатых моллюсков (6,5 – 5,6 – 2,6 %).

Ситуации значительного изменения структуры сообщества ММ характерны для придонного слоя вод в глубине и устье бухты. Основным фактором, определяющим периодическую деградацию видового состава и обилия ММ в этих местообитаниях, является, по всей видимости, низкая насыщенность вод кислородом, которая вызвана повышенной трофностью вод и нарушениями процесса водообмена в бухте.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по темам «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (№ гос. регистрации 121041400077-1) и «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана» (№ гос. регистрации 121030100028-0).

Благодарность. Выражаем искреннюю благодарность Т. А. Богдановой за определение солёности в пробах морской воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Горячкин Ю. Н., Иванов В. А. *Уровень Чёрного моря: прошлое, настоящее и будущее* / под ред. В. Н. Еремеева ; НАН Украины, Мор. гидрофиз. ин-т. Севастополь : [ЭКОСИ-Гидрофизика], 2006. 210 с. [Goryachkin Yu. N., Ivanov V. A. *Uroven' Chernogo morya: proshloe, nastoyashchee i budushchee* / V. N. Eremeev (Ed.) ; NAS of Ukraine, Marine Hydrophysical Institute. Sevastopol : [EKOSI-Gidrofizika], 2006, 210 p. (in Russ.)]
2. Губанов В. И., Стельмах Л. В., Клименко Н. П. Комплексные оценки качества вод сева­стопольского взморья (Чёрное море) // *Экология моря*. 2002. Вып. 62. С. 76–80. [Gubanov V. I., Stelmah L. V., Klimenko N. P. Complex assessments of the Sevastopol offshore water quality (the Black Sea). *Ekologiya morya*, 2002, iss. 62, pp. 76–80. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/4565>
3. Дятлов С. Е. Роль и место биотестирования в комплексном мониторинге загрязнения морской среды // *Экология моря*. 2000. Вып. 51. С. 83–87. [Dyatlov S. Ye. Role and position of bioassays in complex monitoring of pollution of marine environment. *Ekologiya morya*, 2000, iss. 51, pp. 83–87. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/4306>
4. Иванов В. А., Овсяный Е. И., Репетин Л. Н., Романов А. С., Игнатъева О. Г. *Гидролого-химический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов* / НАН Украины, Мор. гидрофиз. ин-т. Севастополь, 2006. 90 с. [Ivanov V. A., Ovsyany E. I., Repetin L. N., Romanov A. S., Ignatyeva O. G. *Hydrological and Hydrochemical Regime of the Sebastopol Bay and Its Changing Under Influence of Climatic and Anthropogenic Factors* / NAS of Ukraine, Marine Hydrophysical Institute. Sevastopol, 2006, 90 p. (in Russ.)]
5. Климова Т. Н., Вдодович И. В., Игнатъев С. М., Серегин С. А., Кузьминова Н. С., Пустоварова Н. И., Попова Е. В. Состояние ихтиопланктона в устьевой части Севастопольской бухты (Чёрное море) // *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*. 2017. Т. 10, № 1. С. 74–86. [Klimova T. N., Vdodovich I. V., Ignatiev S. M., Seregin S. A., Kuzminova N. S., Pustovarova N. I., Popova E. V. The ichthyoplankton state in the Sevastopol Bay mouth (Black Sea). *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 74–86. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0009>
6. Кондратьев С. И., Видничук А. В. Локальная сезонная гипоксия и образование сероводорода в придонных водах Севастопольской бухты в 2009–2019 годах // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 2. С. 107–121. [Kondratev S. I., Vidnichuk A. V. Local seasonal hypoxia and hydrogen sulphide formation in the bottom waters of the Sevastopol Bay in 2009–2019. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya*, 2020, no. 2, pp. 107–121. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-2-107-121>
7. Лемешко Е. М., Морозов А. Н., Шутов С. А., Зима В. В., Чепыженко А. А. Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений, ноябрь 2014 г. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2014. № 28. С. 25–30. [Lemeshko E. M., Morozov A. N., Shutov S. A., Zima V. V., Chepyzhenko A. A. Tcheniya v Sevastopol'skoi bukhte po dannym ADCP-nablyudeni, noyabr' 2014 g. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, 2014, no. 28, pp. 25–30. (in Russ.)]
8. Мельников В. В., Климова Т. Н., Игнатъев С. М., Вдодович И. В., Серегин С. А., Попова Е. В. Состояние ихтио-, микро- и макропланктонного комплексов Чёрного моря в районе Крымского полуострова в июле 2013 г. // *Системы контроля окружающей среды*. 2015. № 1 (21). С. 94–102. [Melnikov V. V., Klimova T. N., Ignatiev S. M., Vdodovich I. V., Popova E. V., Seregin S. A. Conditions of the ichthyo-, microzoo-, and macroplanktonic complexes in the Crimean Peninsula area in July 2013. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*, 2015, no. 1 (21), pp. 94–102. (in Russ.)]
9. *Метод оценки качества вод и состояния водных экосистем в схемах КИОВР* : презентация. [Metod otsenki kachestva vod i sostoyaniya

- vodnykh ekosistem v skhemakh KIOVR* : presentation. (in Russ.)). URL: <https://ppt4web.ru/ehkologija/metod-ocenki-kachestva-vod-i-sostojaniya-vodnykh-ehkosistem-v-skhemakh-kiovr.html> [accessed: 09.02.2021].
10. Мэгарран Э. *Экологическое разнообразие и его измерение* : пер. с англ. Москва : Мир, 1992. 181 с. [Magurran A. E. *Ecological Diversity and Its Measurement* : transl. from English. Moscow : Mir, 1992, 181 p. (in Russ.)]
 11. Песенко Ю. А. *Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях*. Москва : Наука, 1982. 288 с. [Pesenko Yu. A. *Printsipy i metody kolichestvennogo analiza v faunisticheskikh issledovaniyakh*. Moscow : Nauka, 1982, 288 p. (in Russ.)]
 12. Пузнецките К. С., Марушкина Е. В. Применение индексов альфа-разнообразия зоопланктонных сообществ для оценки трофического статуса водоёмов (на примере некоторых озёр чебаркульской группы) // *Вестник Челябинского государственного университета. Серия 12. Экология. Природопользование*. 2005. Т. 12, № 1. С. 22–25. [Puznetskite K. S., Marushkina E. V. *Primenenie indeksov al'fa-raznoobraziya zooplanktonnykh soobshchestv dlya otsenki troficheskogo statusa vodoemov (na primere nekotorykh ozer chebarkul'skoi gruppy)*. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 12. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2005, vol. 12, no. 1, pp. 22–25. (in Russ.)]
 13. Репетин Л. Н., Гордина А. Д., Павлова Е. В., Романов А. С., Овсяный Е. И. Влияние океанографических факторов на экологическое состояние Севастопольской бухты (Чёрное море) // *Морской гидрофизический журнал*. 2003. № 2. С. 66–80. [Repetin L. N., Gordina A. D., Pavlova E. V., Romanov A. S., Ovsyany E. I. *Effect of oceanographic factors upon the ecological state of the Sevastopol Bay (the Black Sea)*. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2003, no. 2, pp. 66–80. (in Russ.)]
 14. Сажина Л. И. *Науплиусы массовых видов пелагических копепод Мирового океана*. Киев : Наукова думка, 1985. 238 с. [Sazhina L. I. *Naupliusy massovykh vidov pelagicheskikh copepod Mirovogo okeana*. Kyiv : Naukova dumka, 1985, 238 p. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5670>
 15. Серегин С. А., Попова Е. В. Бактериопланктон и метазойный микрозоопланктон в водах Чёрного моря у побережья Крыма летом 2010 г. // *Морской экологический журнал*. 2012. Т. 11, № 2. С. 65–74. [Seregin S. A., Popova E. V. *Bacterioplankton and metazoan microzooplankton in the Black Sea waters near Crimea coast in summer 2010*. *Morskoi ekologicheskij zhurnal*, 2012, vol. 11, no. 2, pp. 65–74. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1214>
 16. Серегин С. А., Попова Е. В. Короткопериодная изменчивость метазойного микрозоопланктона в прибрежье Чёрного моря: закономерности и определяющие факторы // *Морской биологический журнал*. 2017. Т. 2, № 1. С. 56–65. [Seregin S. A., Popova E. V. *Short-term variation of metazoan microzooplankton in a coastal area of the Black Sea: The regularities and determining factors*. *Morskoi biologicheskij zhurnal*, 2017, vol. 2, no. 1, pp. 56–65. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.1.06>
 17. Слепчук К. А., Хмара Т. В., Маньковская Е. В. Сравнительная оценка уровня трофности Севастопольской и Южной бухт с использованием индекса E-TRIX // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 5 (197). С. 67–78. [Slepchuk K. A., Khmara T. V., Man'kovskaya E. V. *Comparative assessment of the trophic level of the Sevastopol and Yuzhnaya bays using E-TRIX index*. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2017, no. 5 (197), pp. 67–78. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-5-67-78>
 18. Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Слепчук К. А. Сравнение ассимиляционной ёмкости и индекса трофности различных частей акватории Севастопольской бухты // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 3. С. 63–76. [Sovga E. E., Mezentseva I. V., Slepchuk K. A. *Comparison of assimilative capacity and trophic index for various parts of the Sevastopol Bay water area*. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya*, 2020, no. 3, pp. 63–76. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-3-63-76>
 19. Финенко З. З., Мансурова И. М., Суслин В. В. Динамика концентрации хлорофилла *a* в Чёрном море по спутниковым измерениям // *Морской биологический журнал*.

2019. Т. 4, № 2. С. 87–95. [Finenko Z. Z., Mansurova I. M., Suslin V. V. Dynamics of chlorophyll *a* concentration in the Black Sea on satellite data. *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2019, vol. 4, no. 2, pp. 87–95. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2019.04.2.09>
20. Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. *Количественная гидроэкология: методы системной идентификации*. Тольятти : ИЭБВ РАН, 2003. 463 с. [Shitikov V. K., Rozenberg G. S., Zinchenko T. D. *Kolichestvennaya gidroekologiya: metody sistemnoi identifikatsii*. Tolyatti : IEBV RAN, 2003, 463 p. (in Russ.)]
21. Calbet A. The trophic roles of microzooplankton in marine systems. *ICES Journal of Marine Science*, 2008, vol. 65, iss. 3, pp. 325–331. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsn013>
22. Cardinale B. J., Duffy J. E., Gonzalez A., Hooper D. U., Perrings Ch., Venail P., Narwani A., Mace G. M., Tilman D., Wardle D. A., Kinzig A. P., Daily G. C., Loreau M., Grace J. B., Larigauderie A., Srivastava D. S., Naeem Sh. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 2012, vol. 486, pp. 59–67. <https://doi.org/10.1038/nature11148>
23. Clarke K. R., Gorley R. N., Somerfield P. J., Warwick R. M. *Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation*. 3rd ed. Plymouth : PRIMER-E, 2014, 260 p.
24. Drira Z., Kmiha-Megdiche S., Sahnoun H., Tedetti M., Pagano M., Ayadi H. Copepod assemblages as a bioindicator of environmental quality in three coastal areas under contrasted anthropogenic inputs (Gulf of Gabes, Tunisia). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2018, vol. 98, spec. iss. 8, pp. 1889–1905. <https://dx.doi.org/10.1017/S0025315417001515>
25. *ICES Zooplankton Methodology Manual* / R. P. Harris, P. H. Wiebe, J. Lenz, H. R. Skjoldal, M. Huntley (Eds). Bodmin, Cornwall : Academic Press, 2000, 684 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-327645-2.X5000-2>
26. Hooper D. U., Adair E. C., Cardinale B. J., Byrnes J. E. K., Hungate B. A., Matulich K. L., Gonzalez A., Duffy J. E., Gamfeldt L., O'Connor M. I. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature*, 2012, vol. 486, pp. 105–108. <https://doi.org/10.1038/nature11118>
27. Rabalais N. N., Cai W.-J., Carstensen J., Conley D. J., Fry B., Hu X., Quiñones-Rivera Z., Rosenberg R., Slomp C. P., Turner R. E., Voss M., Wissel B., Zhang J. Eutrophication-driven deoxygenation in the coastal ocean. *Oceanography*, 2014, vol. 27, no. 1, pp. 172–183. <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2014.21>
28. Seregin S. A., Popova E. V. Different-scale variations in the abundance and species diversity of metazoan microzooplankton in the coastal zone of the Black Sea. *Water Resources*, 2019, vol. 46, no. 5, pp. 769–779. <https://doi.org/10.1134/S009780781905018X>
29. Seregin S. A., Popova E. V. Long-term dynamics of abundance of the copepod-invader, *Oithona davisae*, in the coastal waters of the Black Sea. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 374–382. <https://doi.org/10.1134/S207511171604007X>
30. Serranito B., Aubert A., Stemmann L., Rossi N., Jamet J. L. Proposition of indicators of anthropogenic pressure in the Bay of Toulon (Mediterranean Sea) based on zooplankton time-series. *Continental Shelf Research*, 2016, vol. 121, pp. 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.01.016>
31. Svetlichny L. S., Hubareva E. S., Khanaychenko A. N., Gubanova A. D., Altukhov D. A., Beşiktepe S. Adaptive strategy of thermophilic *Oithona davisae* in the cold Black Sea environment. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2016, vol. 16, pp. 77–90. https://doi.org/10.4194/1303-2712-v16_1_09
32. Vollenweider R. A., Giovanardi F., Montanari G., Rinaldi A. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: Proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*, 1998, vol. 9, iss. 3, pp. 329–357. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-095X\(199805/06\)9:3%3C329::AID-ENV308%3E3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:3%3C329::AID-ENV308%3E3.0.CO;2-9)

**ABUNDANCE, SPECIES DIVERSITY,
AND STRUCTURE OF THE METAZOAN MICROZOOPLANKTON COMMUNITY
IN THE BAY–SEASIDE GRADIENT
(ON THE EXAMPLE OF THE SEVASTOPOL BAY)**

S. A. Seregin and E. V. Popova

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: serg-seryogin@yandex.ru

The aim of the research is to identify regular changes in the abundance, species diversity, and structure of metazoan microzooplankton (MM) communities under gradient conditions of the sea coast on a relatively small spatial scale. The relevance of the work lies in the paucity of such studies, which allow to assess indirectly the anthropogenic load (pollution, eutrophication) on marine biota and to apply species diversity indices to evaluate the trophic status of local water areas. The investigation covered three coastal areas of the city of Sevastopol: the open seaside, the mouth of the Sevastopol Bay, and its inner area. The localization of sampling stations reflects the gradient of environmental conditions, which is characterized by various degrees of the effect of natural and anthropogenic factors on the biota. The study was carried out in summer and autumn seasons. MM was sampled on three horizons of the water column: surface, 0–5-m, and 0–10-m layers. In the open seaside and at the bay mouth, MM abundance along the vertical was characterized by a greater evenness; in the inner bay area, the differences between the layers could reach 5–700 times. Maximum MM abundance (1,837.1 thousand ind. \cdot m⁻³) was registered in early August in the surface layer in the inner bay area. Since the late summer, the abundance decreased in all the studied water areas. The species diversity of the MM community, which was assessed applying the Shannon, Simpson, Pielou, and other indices, decreases from the open seashore towards the inner bay area. This pattern persisted in both seasons. The most informative indices were the Shannon, Simpson, and Pielou ones. Those reflected well both seasonal changes in species diversity and direction of changes in the trophic gradient of the local bay waters. Applying multivariate analysis, cases of significant alterations in the MM community structure were revealed for the bottom water layer in the inner bay area. The main probable cause of these local changes is the occurrence of hypoxic conditions in the lower water horizons of the polluted bay areas, which leads to the degradation of the abundance and species composition of the studied zooplankton community.

Keywords: metazoan microzooplankton, abundance, species diversity, community structure, bay–seaside gradient, trophic status of the water area

УДК [582.26/.27:57.013]:542.943*78

ОЦЕНКА АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ ЭКСТРАКТОВ ИЗ МОРСКИХ ВОДОРΟΣЛЕЙ ЯПОНСКОГО МОРЯ *IN VITRO* И *IN VIVO*

© 2023 г. С. Е. Фоменко, Н. Ф. Кушнерова, В. Г. Спрыгин, Е. С. Другова,
Л. Н. Лесникова, В. Ю. Мерзляков

Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичёва ДВО РАН,
Владивосток, Российская Федерация
E-mail: sfomenko@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 12.01.2022; после доработки 25.05.2022;
принята к публикации 16.02.2023; опубликована онлайн 31.05.2023.

Морские водоросли являются источником важных биологически активных соединений — липидов, аминокислот, фенолов, полисахаридов и др. Перспективную группу веществ морского происхождения составляют полифенольные соединения, обладающие высокой антиоксидантной активностью, которые играют ключевую роль в жизнедеятельности морских макрофитов, что позволяет им быстро реагировать на внешний стресс и выполнять защитные функции. В то же время многокомпонентный состав фенольной фракции экстракта из водорослей обуславливает широкий спектр её фармакологической активности, включающей регулирующее влияние на многочисленные нарушения гомеостаза при патологических процессах в организме животных и человека. При этом имеющиеся возможности практического использования экстрактов из водорослей ещё не исчерпаны, что представляет несомненный интерес для современной науки. Цель работы — выполнить сравнительную оценку антиоксидантной активности водно-спиртовых экстрактов, выделенных из талломов представителей трёх классов водорослей [бурых (*Sargassum pallidum*), зелёных (*Ulva lactuca*) и красных (*Ahnfeltia fastigiata* var. *tobuchiensis*)], а также проанализировать их влияние на показатели антиоксидантной защиты печени и плазмы крови мышей при экспериментальном стрессе. Водоросли собирали в летние месяцы в прибрежных водах залива Петра Великого Японского моря, затем сушили при температуре около +50 °С, измельчали на лабораторной мельнице до частиц размером 0,5–1 мм и экстрагировали 70%-ным этиловым спиртом методом реперколяции. Наибольшее количество полифенолов отмечено в экстракте бурой водоросли *S. pallidum* — (218,2 ± 20,3) мг-экв ГК·г⁻¹ сухого веса. В экстракте зелёной водоросли *U. lactuca* значение этого показателя составляло (16,2 ± 1,8) мг-экв ГК·г⁻¹ сухого веса, в экстракте красной водоросли *A. fastigiata* var. *tobuchiensis* — (9,1 ± 1,6) мг-экв ГК·г⁻¹ сухого веса. Соответственно, антирадикальная активность экстракта *S. pallidum* по отношению к катион-радикалу 2,2'-азино-бис(3-этилбензотиазолин-6-сульфоновой кислоты) (ABTS⁺) и алкилпероксильному радикалу была существенно выше, чем таковая экстрактов *U. lactuca* и *A. fastigiata* var. *tobuchiensis*. Проведена экспериментальная проверка с целью определить влияние исследуемых экстрактов водорослей на показатели антиоксидантной защиты печени и плазмы мышей в условиях острого стресса. В задачи эксперимента входило установление весовых показателей (вес животных, индекс массы внутренних органов) и биохимических параметров (уровень антирадикальной активности, содержание малонового диальдегида и восстановленного глутатиона, активность антиоксидантных ферментов). Эксперимент по стрессовому воздействию проводили на белых беспородных мышцах-самцах массой 20–30 г. Острый стресс моделировали путём вертикальной фиксации животных за дорсальную шейную складку на 24 ч. Освобождённые от спирта экстракты водорослей вводили в виде водной взвеси в дозе

100 мг общих полифенолов на кг массы тела в желудок мышам через зонд дважды — непосредственно перед вертикальной фиксацией и спустя 6 ч. Животным контрольной группы и группы «стресс» вводили дистиллированную воду в объёме, равном объёму вводимых препаратов. В данной модели проявились все атрибуты стресса: гипертрофия надпочечников, инволюция тимуса и селезёнки, изъязвления слизистой желудка и кишечника. Также были отмечены нарушения системы антиоксидантной защиты, которые выражались в снижении активности антиоксидантных ферментов в плазме крови, уменьшении содержания восстановленного глутатиона в печени и увеличении уровня малонового диальдегида. Под действием экстрактов во всех группах животных на фоне стресса прослежена тенденция к стабилизации исследуемых показателей антиоксидантной защиты. При этом показатели у мышей, получавших экстракты из *U. lactuca* и *A. fastigiata* var. *tobuchiensis*, уступали аналогичным параметрам в группе животных, получавших экстракт *S. pallidum*. В группе животных, получавших экстракт *S. pallidum*, в показателях антиоксидантной защиты не было выявлено достоверных отличий от контрольных значений. Данный факт обусловлен тем, что основными компонентами полифенольных фракций зелёных и красных водорослей являются мономерные флавоноиды, тогда как в бурых водорослях присутствуют высокомолекулярные флоротаннины, которые проявляют более высокую антиоксидантную активность, чем низкомолекулярные полифенольные фракции зелёных и красных водорослей.

Ключевые слова: морские водоросли, полифенолы, антиоксидантная активность, стресс, мышцы

Важным компонентом морских экосистем и основным звеном в пищевых цепях многих видов морских организмов являются водоросли, служащие источником органического вещества и энергии. Благодаря своему разнообразному составу морские водоросли нашли применение как сырьё для получения целого ряда веществ, обладающих полезными свойствами. Так, в состав водорослей входят легкоусвояемые белки, аминокислоты, липиды, полисахариды, каротиноиды, минеральные вещества, полифенольные соединения и др. [Michalak, Chojnacka, 2015].

Важной группой веществ среди вторичных метаболитов, которые входят в состав морских водорослей, являются полифенольные соединения, обладающие выраженными антиоксидантными свойствами. Эти соединения продуцируются морскими водорослями и морскими травами для выполнения защитных, структурных и репродуктивных функций [Pradhan et al., 2021]. Полифенолы участвуют в процессах роста и репродукции клеток водорослей, а также в формировании и раннем развитии клеточной стенки, образуя комплекс с альгиновой кислотой, структурным полисахаридом клеточной стенки водорослей [Имбс, Звягинцева, 2018]. Полифенолы способны защищать макрофиты от поражения патогенными бактериями, выедания травоядными животными и воздействия УФ-излучения. В соответствии с международной классификацией, полифенольные соединения включают различные подклассы: фенольные кислоты, флавоноиды, лигнаны, стильбены и др. [Zhong et al., 2020]. В составе бурых водорослей и некоторых видов красных водорослей обнаружена особая группа фенольных соединений — флоротаннины, которые представляют собой олигомеры флороглюцина (1,3,5-тригидроксибензола) [Ragan, Glombitza, 1986]. Флоротаннины являются основными цитоплазматическими компонентами водорослей и содержатся в особых органеллах — физодах [Ragan, Glombitza, 1986]. В отличие от других полифенольных соединений, флоротаннины характеризуются тем, что около 90 % от их общего количества находится в свободном состоянии [Боголицын и др., 2018]. Эти соединения аккумулируются преимущественно в наружных слоях эпидермиса и в кортикальном слое таллома [Shibata et al., 2004], что позволяет им быстро реагировать на внешний стресс и выполнять защитные функции.

Повышенный интерес к морским водорослям обусловлен содержанием в них биоактивных компонентов, которые могут найти применение в качестве фармацевтических средств, нутрицевтиков, добавок в пищевые продукты. Известно, что полученные из водорослей препараты проявляют широкий спектр фармакологических свойств: антибактериальные, противоопухолевые, антивирусные, антимикробные, гепатопротекторные и др. [Cotas et al., 2020; Manach et al., 2004].

Положительное влияние морских водорослей на здоровье человека и животных во многом связано со способностью входящих в их состав полифенольных соединений улавливать свободные радикалы, что может содействовать снижению оксидативного стресса [Zhong et al., 2020]. Механизм активного связывания свободных радикалов, которые участвуют в развитии ряда патологических процессов в организме, основан на наличии разветвлённой структуры сопряжённых двойных связей высокой подвижности и большого количества свободных гидроксильных групп в полифенолах макрофитов.

В предыдущих исследованиях нами было установлено, что экстракты, выделенные из ряда морских макрофитов, которые относятся к разным классам [бурые — *Sargassum pallidum* (Turner) C. Agardh, 1820; зелёные — *Ulva lactuca* Linnaeus, 1753; красные — *Ahnfeltia fastigiata* var. *tobuchiensis* (Kanno & Matsubara) Skriptsova & Zhigadlova, 2022], характеризовались наличием выраженного защитного эффекта в условиях различных экспериментальных моделей. В частности, экстракт из бурой водоросли *S. pallidum*, обогащённый полифенольными соединениями, оказывал гепатопротекторное действие при моделировании гепатоза у крыс [Спрыгин и др., 2017]. Липидная фракция экстракта из зелёной водоросли *U. lactuca* проявляла профилактическое действие при остром стрессе, что выражалось в сохранении углеводно-липидного обмена печени и снижении уровня перекисного окисления липидов [Фоменко и др., 2019]. Фармакологический эффект экстракта из красной водоросли *A. fastigiata* var. *tobuchiensis* выражался в способности восстанавливать липидный состав крови и соотношение фосфолипидных фракций в мембранах эритроцитов [Кушнерова и др., 2020]. В качестве продолжения проведённых исследований представляются актуальными получение новых знаний о биологической активности изученных водорослевых экстрактов и выяснение перспектив их использования как антиоксидантных средств.

Цель работы — сравнить антиоксидантную активность водно-спиртовых экстрактов, выделенных из талломов бурой водоросли *Sargassum pallidum*, зелёной *Ulva lactuca* и красной *Ahnfeltia fastigiata* var. *tobuchiensis*, и определить их влияние на показатели антиоксидантной защиты печени и плазмы крови мышей при экспериментальном стрессе.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследования стали морские водоросли:

- *Ulva lactuca* [= *Ulva fenestrata*] — ульва латук (салатная), отдел Chlorophyta, класс Ulvophyceae, порядок Ulvales, семейство Ulvaceae;
- *Sargassum pallidum* — саргассум бледный, отдел Phaeophyta, класс Cyclosporphyceae, порядок Fucales, семейство Sargassaceae;
- *Ahnfeltia fastigiata* var. *tobuchiensis* [= *Ahnfeltia tobuchiensis*] — анфельция тобучинская равновершинная, отдел Rhodophyta, класс Florideophyceae, порядок Ahnfeltiales, семейство Ahnfeltiaceae [Skriptsova, Zhigadlova, 2022].

Выбранные водоросли наиболее широко распространены в морях Дальнего Востока и являются основными, массовыми видами.

Водоросли собирали в августе — сентябре 2021 г. в прибрежных водах залива Петра Великого (Японское море). Выборка — по 20 талломов каждого вида. Слоевища очищали от эпифитов и зообентоса, промывали сначала морской, затем дистиллированной водой, далее высушивали. Таллом в суховоздушном состоянии измельчали с помощью лабораторной мельницы до частиц размером 0,5–1 мм и экстрагировали 70%-ным этиловым спиртом методом реперколяции. Выход экстракта составлял 1 л на 1 кг сухого сырья. Экстрагирование этанолом — эффективный способ переработки водорослей: в процессе извлекается основная часть минеральных

и органических веществ, проявляющих биологическую активность, а этиловый спирт, благодаря своей низкой токсичности, из всех растворителей является наиболее предпочтительным для экстракции фенольных соединений [Cotas et al., 2020].

Экстракты водорослей выпаривали в вакууме до полного удаления этанола и экстрагировали хлороформом для устранения липофильных веществ и пигментов — в соответствии с методом, описанным ранее [Спрыгин и др., 2013]. Полученную водную фракцию, содержащую полифенолы, выпаривали в вакууме досуха и ресуспендировали в воде для получения исходных растворов ($10 \text{ мг}\cdot\text{мл}^{-1}$), в которых предварительно определяли общее содержание полифенолов (далее — ПФ) и антирадикальную активность (далее — АРА). Все биохимические исследования проводили на спектрофотометре Shimadzu UV-2550 (Япония). Общее содержание ПФ определяли с использованием реактива Фолина — Чокалтеу при длине волны 765 нм [Parys et al., 2007]. В качестве стандарта сравнения при определении общего содержания ПФ использовали галловую кислоту (ГК). Общее содержание ПФ выражали в $\text{мг}\cdot\text{экв}\text{ГК}\cdot\text{г}^{-1}$ сухого экстракта. Уровень АРА оценивали также спектрофотометрически по отношению к катион-радикалу 2,2'-азино-бис(3-этилбензотиазолин-6-сульфоновой кислоты) (ABTS^+) ($\lambda = 734 \text{ нм}$) [Re et al., 1999] и алкилпероксильному радикалу ($\lambda = 414 \text{ нм}$) [Bartosz et al., 1998]. При определении АРА в качестве стандарта сравнения использовали тролокс — водорастворимый аналог витамина Е. АРА выражали в $\text{мкмоль тролокса}\cdot\text{мг}^{-1}$ ПФ. Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета прикладных программ InStat 3.0, а также статистической программы GraphPad Prism, включающей функцию проверки соответствия выборки закону нормального распределения. Для определения статистической значимости различий в зависимости от параметров распределения применяли параметрический *t*-критерий Стьюдента или непараметрический *U*-критерий Манна — Уитни.

Эксперимент проводили на белых беспородных мышках-самцах массой 20–30 г, содержащихся в условиях вивария в клетках по 5 особей на стандартном рационе питания, при естественном освещении и постоянной температуре воздуха $+20\dots+22 \text{ }^\circ\text{C}$.

Острый стресс моделировали путём вертикальной фиксации животных за дорсальную шейную складку на 24 ч. Эту модель стресса применяют на лабораторных животных в экспериментальных исследованиях [Кушнерова и др., 2005]. Освобождённые от спирта экстракты водорослей вводили в виде водной взвеси в дозе 100 мг общих полифенолов на кг массы тела в желудок мышам через зонд дважды — непосредственно перед вертикальной фиксацией и спустя 6 ч. Данная концентрация соответствует известной терапевтической дозе для полифенольных гепатопротекторов [Венгеровский и др., 1999]. Животным контрольной группы и группы «стресс» вводили дистиллированную воду в объёме, равном объёму вводимых препаратов.

В ходе исследования были выделены пять групп животных по 10 мышей в каждой: 1-я — контрольная (интактные); 2-я — «стресс» (вертикальная фиксация за дорсальную шейную складку); 3-я — «стресс + экстракт саргассума»; 4-я — «стресс + экстракт ульвы»; 5-я — «стресс + экстракт анфельдии». Животных выводили из эксперимента декапитацией под лёгким эфирным наркозом с соблюдением правил и международных рекомендаций Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях [European Convention, 1986].

После воздействия острого стресса определяли вес животного, индекс массы внутренних органов ($\text{мг}\text{ массы органа на } 100 \text{ г}\text{ массы тела}$) и количество язв на слизистой оболочке желудка, которые учитывали визуально путём подсчёта образовавшихся язвенных поражений. Дизайн исследования одобрен комиссией по вопросам этики Тихоокеанского океанологического института имени В. И. Ильичёва ДВО РАН.

Кровь для исследований собирали из шейной вены животных в вакуэты с 1%-ным раствором гепарина. Для отделения плазмы кровь центрифугировали 10 мин при 3000 об·мин⁻¹, затем образцы плазмы замораживали при температуре –80 °С для дальнейшего определения биохимических показателей. Печень после извлечения промывали в физиологическом растворе и также замораживали в рефрижераторе при температуре –80 °С. Состояние антиоксидантной системы оценивали в плазме крови животных спектрофотометрическим методом по величине общей АРА ($\lambda = 734$ нм) [Re et al., 1999], уровню малонового диальдегида (далее — МДА) ($\lambda = 532$ нм) [Buege, Aust, 1978], активности супероксиддисмутазы (далее — СОД) ($\lambda = 550$ нм) [Paoletti et al., 1986] и ферментов глутатионового звена — глутатионредуктазы (далее — ГР) [Goldberg, Spooone, 1983] и глутатионпероксидазы (далее — ГП) ($\lambda = 340$ нм) [Burk et al., 1980], а также по уровню восстановленного глутатиона (далее — Г-SH) в ткани печени ($\lambda = 412$ нм) [Ellman, 1959].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Перед проведением эксперимента по изучению состояния системы антиоксидантной защиты организма животных в условиях стресс-воздействия в образцах экстрактов исследуемых макрофитов определяли общее содержание ПФ и АРА. Оценка количественного состава ПФ в экстрактах показала, что их содержание существенно варьирует у разных видов макрофитов (табл. 1). Наибольшее содержание ПФ обнаружено в экстракте бурой водоросли *S. pallidum*, причём значение было в 13,5 раза выше, чем в *U. lactuca*, и в 24 раза выше, чем в *A. fastigiata* var. *tobuchiensis*.

Таблица 1. Содержание полифенолов и антирадикальная активность в экстрактах из морских водорослей ($M \pm m$)

Table 1. Polyphenol content and antiradical activity of the seaweed extracts ($M \pm m$)

Морская водоросль	Общие полифенолы, мг-экв ГК·г ⁻¹ сухого экстракта	Антирадикальная активность к АВТС ⁺ , μmol тролокса·мг ⁻¹ ПФ	Антирадикальная активность к алкилпероксильным радикалам, μmol тролокса·мг ⁻¹ ПФ
<i>Sargassum pallidum</i>	218,2 ± 20,3	1,62 ± 0,04	0,64 ± 0,02
<i>Ulva lactuca</i>	16,2 ± 1,8	0,32 ± 0,03	0,15 ± 0,02
<i>Ahnfeltia fastigiata</i> var. <i>tobuchiensis</i>	9,1 ± 1,6	0,13 ± 0,03	0,06 ± 0,01

Важным аспектом изучения антиоксидантного потенциала исследуемых препаратов из водорослей является оценка их АРА по отношению к катион-радикалу АВТС⁺ и алкилпероксильному радикалу. Уровень АРА в экстрактах макрофитов существенно различался, как и содержание ПФ. Так, экстракт *S. pallidum* характеризовался более высоким уровнем АРА по отношению к АВТС⁺: значение в 5 раз превышало соответствующие показатели у *U. lactuca* и в 12,5 раза — у *A. fastigiata* var. *tobuchiensis*. Аналогичная тенденция прослеживалась для показателей АРА по отношению к алкилпероксильному радикалу. Алкилпероксильные радикалы образуются в организме в процессе перекисидации липидов и являются одними из основных инициаторов свободнорадикальных реакций. В экстракте *S. pallidum* этот показатель в 4 раза превышал соответствующее значение для *U. lactuca*. Ещё более низкий уровень АРА по отношению к алкилпероксильному радикалу зафиксирован у *A. fastigiata* var. *tobuchiensis*: его значение было в 2,5 раза меньше такового у *U. lactuca* и в 10 раз меньше, чем у *S. pallidum*.

Следующий этап экспериментальных исследований состоял в изучении влияния экстрактов из морских водорослей на состояние системы антиоксидантной защиты животных в условиях стресс-воздействия. Вертикальная фиксация животных за дорсальную шейную складку в течение 24 ч сопровождалась проявлением всех известных атрибутов стресса, таких как гипертрофия надпочечников, инволюция тимуса и селезёнки, изъязвления слизистой желудка и кишечника. Данные изменения зафиксированы у всех животных, подвергнутых стрессовому воздействию (2–5-я группы), однако по степени выраженности между группами имелись существенные различия. Так, во 2-й группе («стресс») вес животных снизился на 23 % ($p < 0,01$) при одновременном уменьшении индекса массы внутренних органов (печень, селезёнка) в среднем на 19–23 % ($p < 0,05$) (рис. 1). Во 2-й группе под действием стресса количество зафиксированных изъязвлений слизистой желудка составило $(2,6 \pm 0,1)$ шт./животное, в контроле — 0.

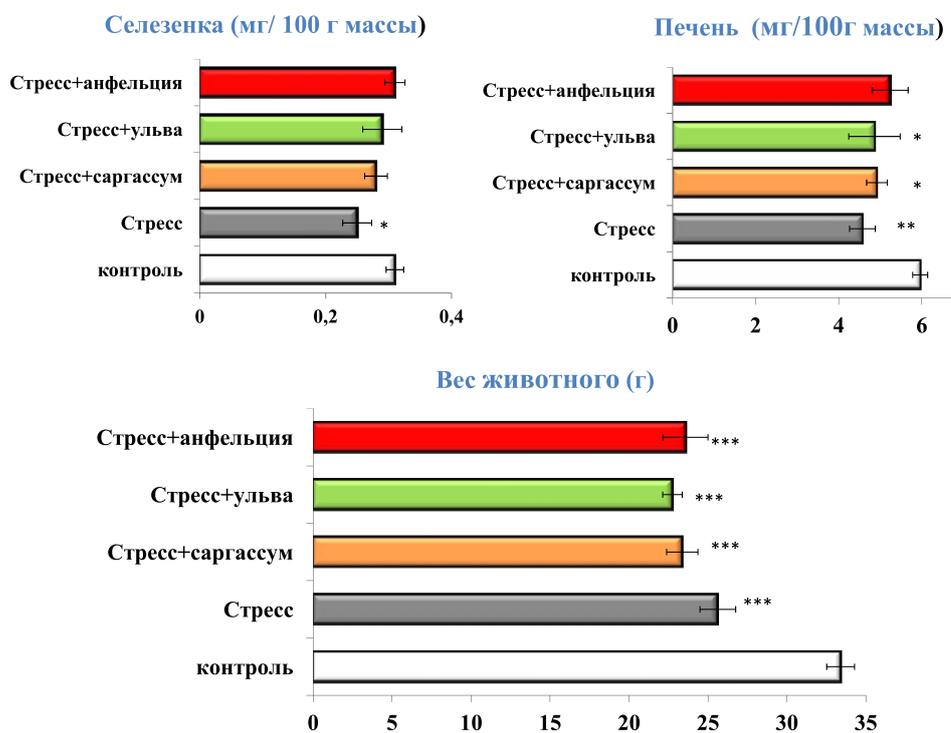


Рис. 1. Влияние экстрактов из морских водорослей на общий вес мышей и весовые коэффициенты их внутренних органов при стрессе. Различия статистически значимы по сравнению с контролем: $p < 0,05$ (*); $p < 0,01$ (**); $p < 0,001$ (***)

Fig. 1. The effect of the seaweed extracts on the total weight of mice and weight coefficients of their internal organs under stress. Differences are statistically significant compared to the control: $p < 0.05$ (*); $p < 0.01$ (**); $p < 0.001$ (***)

При оценке состояния антиоксидантной системы животных при стрессовом воздействии выявлено уменьшение величины АРА плазмы крови на 46 % ($p < 0,001$) по сравнению со значением в контроле. Одновременно отмечено снижение активности одного из ключевых ферментов антиоксидантной защитной системы, СОД, на 40 % ($p < 0,001$) (рис. 2). Уровень Г-SH в печени сократился почти в 2 раза (рис. 3), при этом активность ГР — фермента, играющего главную роль в поддержании определённой концентрации Г-SH внутри клетки, уменьшилась на 26 % ($p < 0,001$). Активность другого ключевого фермента глутатионового звена — ГП, катализирующей восстановление гидропероксида (H_2O_2) и органических перекисей при наличии восстановленного глутатиона, была снижена на 35 % ($p < 0,001$). Такие изменения в показателях системы антиоксидантной защиты можно определить как её ослабление.

Нарушения в функционировании системы антиоксидантной защиты в условиях стресса проявлялись также в увеличении содержания МДА на 68 % ($p < 0,001$) (рис. 3), что является биомаркером оксидативного стресса.

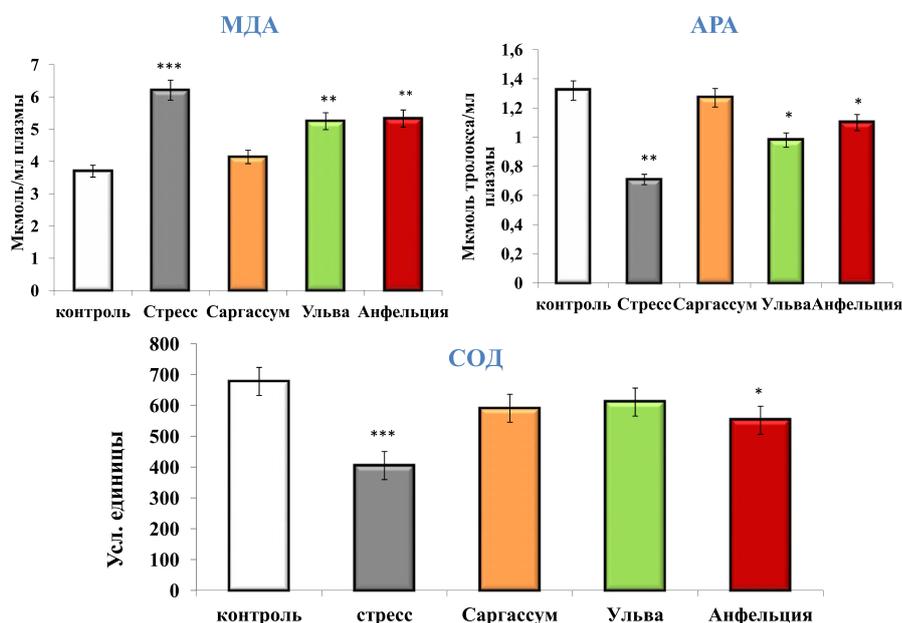


Рис. 2. Влияние экстрактов из морских водорослей на показатели системы антиоксидантной защиты мышей при стрессе. МДА — малоновый диальдегид; АРА — антирадикальная активность; СОД — супероксиддисмутаза. Различия статистически значимы по сравнению с контролем: $p < 0,05$ (*); $p < 0,01$ (**); $p < 0,001$ (***)

Fig. 2. The effect of the seaweed extracts on the antioxidant defense indices of mice under stress. МДА, malondialdehyde; АРА, antiradical activity; СОД, superoxide dismutase. Differences are statistically significant compared to the control: $p < 0.05$ (*); $p < 0.01$ (**); $p < 0.001$ (***)

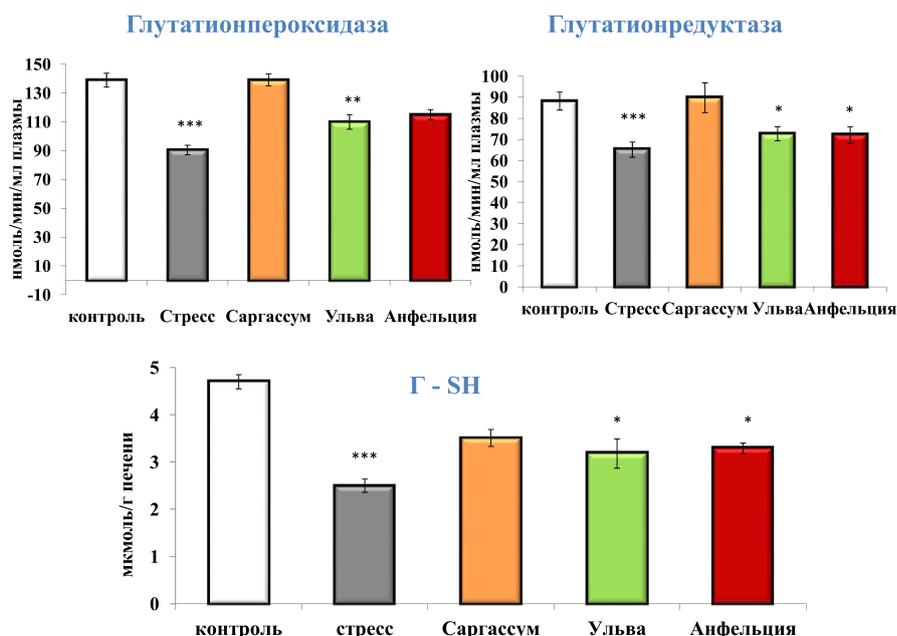


Рис. 3. Влияние экстрактов из морских водорослей на показатели глутатионовой системы у мышей при стрессе. Различия статистически значимы по сравнению с контролем: $p < 0,05$ (*); $p < 0,01$ (**); $p < 0,001$ (***)

Fig. 3. The effect of the seaweed extracts on the glutathione system indices in mice under stress. Differences are statistically significant compared to the control: $p < 0.05$ (*); $p < 0.01$ (**); $p < 0.001$ (***)

Введение на фоне острого стресса экстрактов водорослей (3–5-я группы) сопровождалось тенденцией к уменьшению выраженности инволюционных изменений внутренних органов по сравнению с их выраженностью во 2-й группе («стресс»). Так, в группах мышей, получавших экстракты *U. lactuca* и *S. pallidum*, относительная масса печени возросла в среднем на 6–8 % ($p < 0,05$), в то время как в 5-й группе под действием экстракта *A. fastigiata* var. *tobuchiensis* данный показатель был выше на 15 % ($p < 0,05$). Также у мышей, получавших экстракты водорослей, увеличилась относительная масса селезёнки — в среднем на 12–24 % ($p < 0,001$). Отмечено, что применение водорослевых экстрактов ещё не приводило к полному восстановлению относительной массы внутренних органов, но способствовало достоверному повышению значений этих показателей по сравнению с таковыми во 2-й группе (см. рис. 1). В отношении параметров массы тела мышей в 3–5-й группах данные показатели достоверно отличались от контроля; важно отметить, что у них не было зафиксировано изъязвлений слизистых оболочек желудка.

Во всех группах животных, получавших препараты из водорослей на фоне стрессового воздействия, прослеживалась тенденция к стабилизации исследуемых показателей системы антиоксидантной защиты (рис. 2, 3). Так, в 3-й группе животных (экстракт *S. pallidum*), показатели соответствовали контрольным значениям. Сравнение со 2-й группой («стресс») выявило: у этих мышей снизился уровень МДА в плазме крови на 33 % ($p < 0,001$) при одновременном повышении величины АРА в 1,8 раза ($p < 0,001$) и увеличении активности СОД на 46 % ($p < 0,001$). Также под действием экстракта *S. pallidum* отмечено повышение уровня Г-SH в ткани печени на 40 % ($p < 0,001$); при этом активность антиоксидантных ферментов (ГП и ГР) в плазме крови возросла в среднем на 38–54 % ($p < 0,001$).

Состояние антиоксидантной системы у животных 4-й и 5-й групп (мыши, получавшие экстракты из *U. lactuca* и *A. fastigiata* var. *tobuchiensis* на фоне острого стресса) тоже характеризовалось положительной динамикой, но исследуемые биохимические показатели всё ещё имели достоверные отличия от контроля. В то же время при сравнении с группой «стресс» определено, что в плазме крови мышей из 4-й и 5-й групп произошло повышение уровня АРА на 37 % ($p < 0,001$) и 54 % ($p < 0,001$) соответственно. Активность СОД у животных 4-й группы (*U. lactuca*) увеличилась на 51 % ($p < 0,001$), а у представителей 5-й группы (*A. fastigiata* var. *tobuchiensis*) — на 36 % ($p < 0,001$); при этом содержание МДА в плазме крови данных животных снизилось в среднем на 14–16 % ($p < 0,001$). В отношении уровня Г-SH в ткани печени и активности ферментов глутатионового звена также зафиксирована положительная динамика. В частности, применение экстрактов *U. lactuca* и *A. fastigiata* var. *tobuchiensis* сопровождалось повышением содержания Г-SH на 27 и 32 % соответственно ($p < 0,05$). В свою очередь, активность ГП у животных в этих группах возросла в среднем на 22–27 % ($p < 0,05$), активность ГР — на 12–20 % ($p < 0,05$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Из полученных результатов следует, что в условиях острого стресса нарушается комплексное функциональное равновесие органов и систем целостного организма. Об этом свидетельствует уменьшение относительной массы внутренних органов (печень, селезёнка). Между тем достоверное снижение индекса массы селезёнки происходит в результате инволюции лимфатической системы, что связано с усиленной секрецией корой надпочечников стероидных гормонов, вызывающих распад лимфоцитов и угнетение метаболических процессов в клетках [Chrousos, 2009]. В системе антиоксидантной защиты происходит напряжение из-за избыточного образования свободных радикалов под действием стресса [Şahin, Gümüşlü, 2007]. В результате антиоксидантная система организма не в состоянии справиться с их чрезмерной продукцией, при этом снижаются активность антиоксидантных ферментов (СОД, ГП, ГР) и величина Г-SH. Данное явление лежит

в основе нарушений многих метаболических реакций организма. Свидетельством повышенной генерации свободных радикалов является достоверное уменьшение значения АРА наряду с повышением уровня МДА в плазме крови мышей, что характеризуется высокой активностью перекисного окисления жирных кислот, входящих в состав мембранных липидов, и сопровождается повышением проницаемости клеточных мембран в различных тканях [Şahin, Gümüşlü, 2007]. Впоследствии недостаточность факторов антиоксидантной защиты приводит к неконтролируемому усилению процессов липопероксидации и к развитию оксидативного стресса.

Введение экстрактов из морских водорослей на фоне стресса сопровождалось увеличением активности антиоксидантных ферментов и содержания восстановленного глутатиона при одновременном снижении концентрации МДА. Между тем в 4-й и 5-й группах животных, как было отмечено выше, значения показателей антиоксидантной системы (МДА, Г-SH, ГП и ГР) всё ещё отличались от контрольных. При этом значения параметров антиоксидантной защиты у мышей, получавших экстракты из *U. lactuca* и *A. fastigiata* var. *tobuchiensis*, уступали аналогичным показателям в 3-й группе (*S. pallidum*). Подтверждением данному факту является расчёт статистической достоверности между величинами изученных биохимических показателей в плазме крови и ткани печени мышей 3–5-й групп. Так, показатели активности ГП и ГР плазмы крови у животных, получавших экстракты из *U. lactuca* и *A. fastigiata* var. *tobuchiensis* (4-я и 5-я группа соответственно), были ниже в среднем на 17–21 % ($p < 0,05$), чем в 3-й группе (экстракт *S. pallidum*). Достоверные отличия между этими группами выявлены и по другим показателям: уровень МДА был выше на 27–28 % ($p < 0,01$), содержание Г-SH оказалось ниже на 7–9 % ($p < 0,05$), АРА — ниже на 13–23 % ($p < 0,001$).

Данный эффект обусловлен, по нашему мнению, тем, что метаболическая активность полифенолов в экстракте бурой водоросли *S. pallidum* существенно выше, чем в экстрактах *U. lactuca* и *A. fastigiata* var. *tobuchiensis*. Соответственно, экстракт *S. pallidum* характеризуется более высоким уровнем АРА, что подтверждают полученные данные (см. табл. 1). Известно, что основными компонентами полифенольных фракций зелёных и красных водорослей являются мономерные флавоноиды [Alagan et al., 2017; de Quirós et al., 2010]. В свою очередь, высокомолекулярные флоротаннины бурых водорослей и их экстракты, обогащённые флоротаннинами, проявляют высокую антиоксидантную активность [Ferrerres et al., 2012; Wang et al., 2012], в отличие от низкомолекулярных полифенольных фракций зелёных и красных водорослей. По мнению исследователей [Agregán et al., 2018], экстракты морских водорослей с высоким содержанием полифенольных соединений обладают выраженным антиоксидантным потенциалом.

На основании полученных данных можно заключить, что при стрессовом воздействии введение экстрактов из морских водорослей способствовало восстановлению показателей системы антиоксидантной защиты, которая играет ключевую роль в протекании большинства жизненно важных процессов.

Выводы:

1. В условиях экспериментального острого стресса у мышей отмечено нарушение метаболических реакций организма, которое сопровождалось инволюцией лимфатической системы, появлением изъязвлений слизистой оболочки желудка, уменьшением веса внутренних органов, а также напряжением в системе антиоксидантной защиты и активированием реакций перекисного окисления липидов.
2. Введение экстрактов из морских водорослей способствовало стабилизации системы антиоксидантной защиты, которая участвует в протекании большинства жизненно важных процессов.
3. Профилактическое применение при стрессе экстрактов водорослей, обогащённых полифенольными соединениями, способствовало восстановлению весовых коэффициентов внутренних органов животных (печень, селезёнка), а также отсутствию язв слизистой желудка.

4. Морские водоросли *S. pallidum*, *U. lactuca* и *A. fastigiata* var. *tobuchiensis* являются перспективным видом сырья для создания препаратов, способных повышать потенциал эндогенной системы антиоксидантной защиты организма в условиях стрессиндуцированных расстройств.
5. Преимущественный эффект экстракта из бурой водоросли *S. pallidum* в условиях стресса определяется высокомолекулярным строением флоротаннинов, что обеспечивает более высокую антиоксидантную активность по сравнению с таковой мономерных флавоноидов в экстрактах *U. lactuca* и *A. fastigiata* var. *tobuchiensis*.

Работа выполнена в рамках государственного задания Тихоокеанского океанологического института имени В. И. Ильичёва ДВО РАН по теме «Эколого-биогеохимические процессы в морских экосистемах: роль природных и антропогенных факторов» (0211-2021-0014, № гос. регистрации 121-21500052-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Боголицын К. Г., Дружинина А. С., Овчинников Д. В., Каплицин П. А., Шульгина Е. В., Паршина А. Э. Полифенолы бурых водорослей // *Химия растительного сырья*. 2018. № 3. С. 5–21. [Bogolitsyn K. G., Druzhinina A. S., Ovchinnikov D. V., Kaplitsyn P. A., Shulgin E. V., Parshina A. E. Polyphenols of brown algae. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2018, no. 3, pp. 5–21. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018031898>
2. Венгеровский А. И., Маркова И. В., Саратиков А. С. Доклиническое изучение гепатозащитных средств // *Ведомости фармакологического комитета*. 1999. № 2. С. 9–12. [Vengerovsky A. I., Markova I. V., Saratikov A. S. Doklinicheskoe izuchenie gepatozashchitnykh sredstv. *Vedomosti farmakologicheskogo komiteta*, 1999, no. 2, pp. 9–12. (in Russ.)]
3. Имбс Т. И., Звягинцева Т. Н. Флоротаннины – полифенольные метаболиты бурых водорослей // *Биология моря*. 2018. Т. 44, № 4. С. 217–227. [Imbs T. I., Zvyagintseva T. N. Phlorotannins are polyphenolic metabolites of brown algae. *Biologiya morya*, 2018, vol. 44, no. 4, pp. 217–227. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.1134/S0134347518040010>
4. Кушнерова Н. Ф., Спрыгин В. Г., Фоменко С. Е., Рахманин Ю. А. Влияние стресса на состояние липидного и углеводного обмена печени, профилактика // *Гигиена и санитария*. 2005. № 5. С. 17–21. [Kushnerova N. F., Sprygin V. G., Fomenko S. Ye., Rakhmanin Yu. A. Impact of stress on hepatic lipid and carbohydrate metabolism, prevention. *Gigiena i sanitariya*, 2005, no. 5, pp. 17–21. (in Russ.)]
5. Кушнерова Н. Ф., Фоменко С. Е., Спрыгин В. Г., Момот Т. В. Влияние липидного комплекса экстракта из морской красной водоросли *Ahnfeltia tobuchiensis* (Kanno et Matsubara) Makienko на биохимические показатели плазмы крови и мембран эритроцитов при экспериментальном стрессе // *Биология моря*. 2020. Т. 46, № 4. С. 269–276. [Kushnerova N. F., Fomenko S. E., Sprygin V. G., Momot T. V. The effects of the lipid complex of extract from the marine red alga *Ahnfeltia tobuchiensis* (Kanno et Matsubara) Makienko on the biochemical parameters of blood plasma and erythrocyte membranes during experimental stress exposure. *Biologiya morya*, 2020, vol. 46, no. 4, pp. 269–276. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S0134347520040051>
6. Спрыгин В. Г., Кушнерова Н. Ф., Фоменко С. Е., Сизова Л. А., Момот Т. В. Гепатопротекторные свойства экстракта из бурой водоросли *Saccharina japonica* // *Биология моря*. 2013. Т. 39, № 1. С. 50–54. [Sprygin V. G., Kushnerova N. F., Fomenko S. E., Sizova L. A., Momot T. V. The hepatoprotective properties of an extract from the brown alga *Saccharina japonica*. *Biologiya morya*, 2013, vol. 39, no. 1, pp. 50–54. (in Russ.)]
7. Спрыгин В. Г., Кушнерова Н. Ф., Фоменко С. Е., Другова Е. С., Лесникова Л. Н., Мерзляков В. Ю., Момот Т. В. Влияние экстракта из морской бурой водоросли *Sargassum pallidum* (Turner) C. Agardh, 1820 на метаболические реакции печени при экспериментальном токсическом гепатите // *Биология моря*. 2017. Т. 43, № 6. С. 444–449. [Sprygin V. G., Kushnerova N. F., Fomenko S. E., Drugova E. S., Lesnikova L. N., Merzlyakov V. Y., Momot T. V. The influence of an extract from the marine brown alga *Sargassum pallidum* on the metabolic

- reactions in the liver under experimental toxic hepatitis. *Biologiya morya*, 2017, vol. 43, no. 6, pp. 444–449. (in Russ.)]
8. Фоменко С. Е., Кушнерова Н. Ф., Спрыгин В. Г., Другова Е. С., Лесникова Л. Н., Мерзляков В. Ю. Липидный состав и мембранопротекторное действие экстракта из морской зелёной водоросли *Ulva lactuca* (L.) // *Химия растительного сырья*. 2019. № 3. С. 41–51. [Fomenko S. E., Kushnerova N. F., Sprygin V. G., Drugova E. S., Lesnikova L. N., Merzlyakov V. Yu. Lipid composition and membranoprotective action of extract from marine green algae *Ulva lactuca* (L.). *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2019, no. 3, pp. 41–51. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019035116>
 9. Agregán R., Munekata P. E. S., Franco D., Carballo J., Barba F. J., Lorenzo J. M. Antioxidant potential of extracts obtained from macroalgae (*Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus* and *Bifurcaria bifurcata*) and microalgae (*Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis*) assisted by ultrasound. *Medicines*, 2018, vol. 5, iss. 2, art. no. 33 (9 p.). <https://doi.org/10.3390/medicines5020033>
 10. Alagan V. T., Valsala R. N., Rajesh K. D. Bioactive chemical constituent analysis, *in vitro* antioxidant and antimicrobial activity of whole plant methanol extracts of *Ulva lactuca* Linn. *British Journal of Pharmaceutical Research*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 1–14. <https://doi.org/10.9734/BJPR/2017/31818>
 11. Bartosz G., Janaszewska A., Ertel D., Bartosz M. Simple determination of peroxy radical-trapping capacity. *Biochemistry and Molecular Biology International*, 1998, vol. 46, iss. 3, pp. 519–528. <https://doi.org/10.1080/15216549800204042>
 12. Buege J. A., Aust S. D. Microsomal lipid peroxidation. In: *Biomembranes. Part C, Biological Oxidants, Microsomal, Cytochrome P-450, and Other Hemoprotein Systems* / F. Sidney, P. Lester (Eds). New York : Academic Press, 1978, pp. 302–310. (Methods in Enzymology ; vol. 52). [https://doi.org/10.1016/s0076-6879\(78\)52032-6](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(78)52032-6)
 13. Burk R. F., Lawrence R. A., Lane J. M. Liver necrosis and lipid peroxidation in the rat as the result of paraquat and diquat administration: Effect of selenium deficiency. *The Journal of Clinical Investigation*, 1980, vol. 65, iss. 5, pp. 1024–1031. <https://doi.org/10.1172/JCI109754>
 14. Chrousos G. P. Stress and disorders of the stress system. *Nature Reviews Endocrinology*, 2009, no. 5, pp. 374–381. <https://doi.org/10.1038/nrendo.2009.106>
 15. Cotas J., Leandro A., Monteiro P., Pacheco D., Figueirinha A., Gonçalves A. M. M., da Silva G. J., Pereira L. Seaweed phenolics: From extraction to applications. *Marine Drugs*, 2020, vol. 18, iss. 8, pp. 384–431. <https://doi.org/10.3390/md18080384>
 16. de Quirós A. R.-B., Lage-Yusty M. A., López-Hernández J. Determination of phenolic compounds in macroalgae for human consumption. *Food Chemistry*, 2010, vol. 121, iss. 2, pp. 634–638. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.12.078>
 17. Ellman G. L. Tissue sulfhydryl group. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1959, vol. 82, iss. 1, pp. 70–77. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(59\)90090-6](https://doi.org/10.1016/0003-9861(59)90090-6)
 18. *European Convention for the Protection of Vertebrate Animals Used for Experimental and Other Scientific Purposes*. Strasbourg : Council of Europe, 1986, 11 p. (European Treaty Series ; no. 123). URL: <https://rm.coe.int/168007a67b> [accessed: 28.12.2021].
 19. Ferreres F., Lopes G., Gil-Izquierdo A., Andrade P. B., Sousa C., Mouga T., Valentão P. Phlorotannin extracts from Fucales characterized by HPLC-DAD-ESI-MSn: Approaches to hyaluronidase inhibitory capacity and antioxidant properties. *Marine Drugs*, 2012, vol. 10, iss. 12, pp. 2766–2781. <https://doi.org/10.3390/md10122766>
 20. Goldberg D. M., Spooner R. J. Assay of glutathione reductase. In: *Methods of Enzymatic Analysis*. Vol. 3: Enzymes 1. Oxidoreductases, transferases. 3rd edition / H. U. Bergmeyer (Ed.). Weinheim : Verlag Chemie, 1983, pp. 258–265.
 21. Manach C., Scalbert A., Morand C., Rémésy C., Jiménez L. Polyphenols: Food sources and bioavailability. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2004, vol. 79, iss. 5, pp. 727–747. <https://doi.org/10.1093/ajcn/79.5.727>
 22. Michalak I., Chojnacka K. Algae as production systems of bioactive compounds. *Engineering in Life Sciences*, 2015, vol. 15, iss. 2, pp. 160–176. <https://doi.org/10.1002/elsc.201400191>
 23. Paoletti F., Aldinucci D., Mocali A., Cappellini A. A sensitive spectrophotometric

- method for the determination of superoxide-dismutase activity in tissue extracts. *Analytical Biochemistry*, 1986, vol. 154, iss. 2, pp. 536–541. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(86\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0003-2697(86)90026-6)
24. Parys S., Rosenbaum A., Kehraus S., Reher G., Glombitza K.-W., König G. M. Evaluation of quantitative methods for the determination of polyphenols in algal extracts. *Journal of Natural Products*, 2007, vol. 70, iss. 12, pp. 1865–1870. <https://doi.org/10.1021/np070302f>
 25. Pradhan B., Patra S., Behera C., Nayak R., Jit B. P., Ragusa A., Jena M. Preliminary investigation of the antioxidant, anti-diabetic, and anti-inflammatory activity of *Enteromorpha intestinalis* extracts. *Molecules*, 2021, vol. 26, iss. 4, pp. 1171–1187. <https://doi.org/10.3390/molecules26041171>
 26. Ragan M. A., Glombitza K. W. Phlorotannins, brown algal polyphenols. In: *Progress in Phycological Research*. Bristol : Biopress Ltd, 1986, vol. 4, pp. 129–241.
 27. Re R., Pellegrini N., Proteggente A., Pannala A., Yang M., Rice-Evans C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 1999, vol. 26, iss. 9–10, pp. 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/s0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(98)00315-3)
 28. Şahın E., Gümüştü S. Stress-dependent induction of protein oxidation, lipid peroxidation and anti-oxidants in peripheral tissues of rats: Comparison of three stress models (immobilization, cold and immobilization–cold). *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 2007, vol. 34, iss. 5–6, pp. 425–431. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1681.2007.04584.x>
 29. Shibata T., Kawaguchi S., Hama Y., Inagaki M., Yamaguchi K., Nakamura T. Local and chemical distribution of phlorotannins in brown algae. *Journal of Applied Phycology*, 2004, vol. 16, pp. 291–296. <https://doi.org/10.1023/B:JAPH.0000047781.24993.0a>
 30. Skriptsova A. V., Zhigadlova G. G. A revision of the red algal genus *Ahnfeltia* on the Russian coast of the North Pacific. *Phycologia*, 2022, vol. 61, iss. 4, pp. 396–402. <https://doi.org/10.1080/00318884.2022.2061154>
 31. Wang T., Jónsdóttir R., Liu H., Gu L., Kristinsson H. G., Raghavan S., Ólafsdóttir G. Antioxidant capacities of phlorotannins extracted from the brown algae *Fucus vesiculosus*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, vol. 60, iss. 23, pp. 5874–5883. <https://doi.org/10.1021/jf3003653>
 32. Zhong B., Robinson N. A., Warner R. D., Barrow C. J., Dunshea F. R., Suleria H. A. R. LC-ESI-QTOF-MS/MS characterization of seaweed phenolics and their antioxidant potential. *Marine Drugs*, 2020, vol. 18, iss. 6, pp. 331–352. <https://doi.org/10.3390/md18060331>

**ASSESSMENT OF ANTIOXIDANT ACTIVITY
OF SEAWEED EXTRACTS FROM THE SEA OF JAPAN
IN VITRO AND IN VIVO**

**S. E. Fomenko, N. F. Kushnerova, V. G. Sprygin, E. S. Drugova,
L. N. Lesnikova, and V. Yu. Merzlyakov**

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation
E-mail: sfomenko@poi.dvo.ru

Seaweeds are a source of important biologically active substances: lipids, amino acids, phenolic compounds, polycarbohydrates, *etc.* Polyphenolic compounds are one of the perspective groups of constituents of marine origin with high antioxidant activity; those play a key role in the life of marine macrophytes, allowing them to quickly respond to external stress and to perform protective functions. At the same time, the multicomponent composition of the phenolic fraction of the seaweed extract provides a wide spectrum of its pharmacological activity, *inter alia* a regulatory effect on numerous homeostasis disorders occurring during pathological processes in humans and animals. Wherein, the available opportunities for the practical use of seaweed extracts have not yet been depleted,

and this is of undoubted interest for modern science. The aim of the work was to carry out a comparative assessment of the antioxidant activity of hydroalcoholic extracts isolated from the thalli of three classes of algae [brown (*Sargassum pallidum*), green (*Ulva lactuca*), and red (*Ahnfeltia fastigiata* var. *tobuchiensis*)] and to analyze their effect on indices of the endogenous antioxidant system of liver and blood in mice under experimental stress. Seaweeds were sampled in summer in the coastal waters of the Peter the Great Bay (the Sea of Japan). Sampled seaweeds were dried at a temperature of about +50 °C, grinded in a laboratory mill to particles 0.5–1 mm in size, and extracted with 70% ethanol *via* repercolation. In the extract of the brown alga *S. pallidum*, the highest content of polyphenols was recorded – (218.2 ± 20.3) mg-Eq GA·g⁻¹ dry weight. In the extract of the green alga *U. lactuca*, the value was (16.2 ± 1.8) mg-Eq GA·g⁻¹ dry weight; in the extract of the red alga *A. fastigiata* var. *tobuchiensis*, (9.1 ± 1.6) mg-Eq GA·g⁻¹ dry weight. Accordingly, the antiradical activity of *S. pallidum* extract towards the cation radical ABTS⁺ and the alkyl peroxy radical was significantly higher than that of *U. lactuca* and *A. fastigiata* var. *tobuchiensis* extracts. The effect of these seaweed extracts on the antioxidant defense indices of liver and plasma in mice under acute stress was studied experimentally. Weight indicators (weight of animals and weight coefficients of their internal organs) and biochemical indices (level of antiradical activity, malondialdehyde and reduced glutathione content, and activity of antioxidant enzymes) were established. The experiment was carried out on white outbred male mice (weight of 20–30 g). To model conditions of acute stress, mice were fixed vertically by the dorsal neck crease for 24 h. Alcohol-free seaweed extracts were injected into mice stomachs as an aqueous suspension (a dose of 100 mg of total polyphenols *per* kg of body weight) through a tube twice: right before vertical fixation and in 6 h. Into stomachs of the animals of the control and the “stress” groups, distilled water was injected in a volume equal to that of the injected extracts. In this model, all the attributes of stress manifested themselves: adrenal hypertrophy, involution of the thymus and spleen, and ulceration of the gastric and intestinal mucosa. Moreover, disturbances of the antioxidant defense system were recorded: a decrease of antioxidant enzymes activity in blood plasma, a drop in reduced glutathione content in liver, and an increase of the malondialdehyde level. Under the effect of the extracts, in all the groups of animals under stress, a tendency to stabilization of the studied antioxidant defense indices was observed. Interestingly, the values in mice receiving *U. lactuca* and *A. fastigiata* var. *tobuchiensis* extracts were inferior to those in the group of animals receiving *S. pallidum* extract. In the latter group of mice, there were no significant differences from the control values in terms of antioxidant defense indices. This is due to the fact the main components of the polyphenolic fractions of green and red algae are monomeric flavonoids, while brown algae contain high molecular weight phlorotannins. The latter ones are characterized by higher antioxidant activity than low molecular weight polyphenolic fractions of green and red algae.

Keywords: seaweeds, polyphenols, antioxidant activity, stress, mice

ЗАМЕТКИ

УДК [597.556.31-14+575.21](262.5)

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ МОРСКОГО ЕРША
SCORPAENA PORCUS LINNAEUS, 1758 (SCORPAENIDAE)
ИЗ ДВУХ МЕСТООБИТАНИЙ В ЧЁРНОМ МОРЕ**

© 2023 г. О. Д. Расчислов, И. В. Довгаль¹

¹ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Российская Федерация
E-mail: dovgal-1954@mail.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020; после доработки 22.03.2022;
принята к публикации 16.02.2023; опубликована онлайн 31.05.2023.

Проведено сравнительное исследование морфологической изменчивости скорпены *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758 из двух отдалённых черноморских местообитаний — посёлков Форос (Крымский полуостров) и Малый Утриш (Краснодарский край). Из-за полового диморфизма у морского ерша и малого количества самцов в пробах для анализа использовали только половозрелых самок. Всего обследовано 54 скорпены (29 из Фороса и 25 из Малого Утриша). Использованы 5 меристических и 26 морфометрических признаков. По меристическим признакам региональные различия между самками скорпены из Фороса и Малого Утриша не отмечены, тогда как по морфометрическим (максимальная высота тела, длина первого спинного плавника, расстояние между грудными и брюшными плавниками, длина рыла, диаметр глаза и длина нижней челюсти) различия были статистически значимы. Канонический дискриминантный анализ показал, что самки *S. porcus* из Фороса правильно классифицируются с точностью 97 %, а самки из Малого Утриша — 100 %. Высказано предположение, что полученные результаты являются проявлением модификационной изменчивости. Между тем существенных различий между самками морского ерша из двух местонахождений по общей длине и массе тела не зарегистрировано, что могло быть обусловлено различиями в трофических условиях и в численности рыб. Это обстоятельство может свидетельствовать о наличии комплекса модификационной и межпопуляционной изменчивости у скорпены из исследованных черноморских биотопов. Несмотря на то, что пелагическая икра *S. porcus* может переноситься морскими течениями, пространственная изоляция и ограниченность миграций способны привести к формированию локальных популяций морского ерша. Однако для проверки предположения необходим анализ генетических маркеров.

Ключевые слова: *Scorpaena porcus*, морфологическая изменчивость, межпопуляционная изменчивость, изоляция, Чёрное море

Целью настоящего исследования является сравнительный морфологический анализ морского ерша *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758 из двух удалённых местообитаний Чёрного моря — прибрежной зоны у посёлка Форос (полуостров Крым) и побережья у посёлка Малый Утриш (Краснодарский край).

Рыбы были выловлены крючковыми орудиями лова (спиннинги с разными видами оснастки) в прибрежной зоне посёлка Форос (44°38'82.88"N, 33°78'17.94"E) в июле — августе 2019 г. и вблизи посёлка Малый Утриш (44°70'48.25"N, 37°47'04.52"E) в сентябре 2019 г. В связи с низкой численностью самцов в выборках и возможным половым диморфизмом по размерным характеристикам [Peskov, Manilo, 2016], изучали только самок морского ерша.

Морфометрические измерения проводили по схеме И. Ф. Правдина [1966], при этом использовали 5 меристических и 26 пластических признаков; также регистрировали массу тела (m).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Абсолютная длина самок в выборках составляла от 14 до 26 см, масса — от 46 до 304 г. Изученные особи морского ерша из Фороса и Малого Утриша не отличались по меристическим признакам, тогда как различия по ряду пластических признаков были значимыми (табл. 1). Следует отметить, что во всех случаях средние значения признаков были выше у особей из побережья Малого Утриша, чем у экземпляров у посёлка Форос.

Таблица 1. Параметры пластических признаков самок *Scorpaena porcus* [средняя величина (mean), стандартное отклонение (standard deviation) и значение *t*-критерия] из двух местообитаний в Чёрном море, по которым выявлены статистически значимые различия

Table 1. Significantly different measurement means, standard deviations, and *t*-test results for *Scorpaena porcus* females from two Black Sea localities

Признак	Местонахождение						<i>t</i> -критерий
	Форос (<i>n</i> = 29)			Малый Утриш (<i>n</i> = 25)			
	Mean	Standard deviation	Standard error	Mean	Standard deviation	Standard error	
gh	4,56	0,89	0,17	5,13	0,73	0,15	2,56
tu	2,15	0,35	0,06	3,12	1,61	0,32	3,17
vz	1,99	0,46	0,09	2,27	0,39	0,08	2,37
an	1,39	0,31	0,06	1,62	0,23	0,05	3,04
np	1,37	0,18	0,03	1,53	0,16	0,03	3,26
k111	1,99	0,38	0,07	2,24	0,36	0,07	2,53

Примечание: gh — максимальная высота тела; tu — максимальная высота спинного плавника; vz — расстояние между грудным и брюшным плавником; an — длина рыла; np — диаметр глаза; k111 — длина нижней челюсти.

Note: gh, maximum body height; tu, maximum height of dorsal fin; vz, distance between pectoral and abdominal fin; an, length of snout; np, eye diameter; k111, length of lower jaw.

В свою очередь, по результатам дискриминантного анализа, который проводили по всему комплексу пластических признаков, были получены 98 % правильных классификаций особей морского ерша по регионам. При этом 28 особей, собранных у посёлка Форос, оказались в своей группе (97 %); только 1 особь по значению дискриминантной функции классифицировалась с особями из Малого Утриша. Что касается особей морского ерша из Малого Утриша, то все 25 самок (100 %) по значениям дискриминантной функции классифицировались в своей группе.

Отметим, что наблюдаемую высокую степень дискриминации морских ершей из посёлков Форос и Малый Утриш обеспечивали те же признаки, различия между средними значениями которых были статистически значимыми. Нельзя исключить, что это является проявлением модификационной изменчивости. Однако стоит указать следующее: по нашим данным, отсутствуют статистически значимые различия по длине и массе тела самок морского ерша из побережья Фороса и Малого Утриша, которые в первую очередь можно было бы связать с различиями в трофических условиях и в плотности популяций вида в данных местообитаниях.

Известно, что *S. porcus* ведёт малоподвижный образ жизни [Смирнов, 1986]. Несмотря на наличие у этого вида пелагической икры [Смирнов, 1986], которая может распространяться с течениями, мы считаем, что пространственная изоляция способна играть существенную роль в формировании локальных популяций морского ерша, что частично подтверждают выявленные морфологические различия. Вполне возможно, что в данном случае мы имеем дело с сочетанием модификационной и межпопуляционной изменчивости. Однако для проверки данного предположения необходим анализ молекулярно-генетических маркеров.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Фундаментальные исследования популяционной биологии морских животных, их морфологического и генетического разнообразия» (№ гос. регистрации 121040500247-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Правдин И. Ф. *Руководство по изучению рыб*. Москва : Пищевая промышленность, 1966. 370 с. [Pravdin I. F. *Rukovodstvo po izucheniyu ryb*. Moscow : Pishchevaya promyshlennost', 1966, 370 p. (in Russ.)]
2. Смирнов А. И. *Фауна Украины*. Т. 8. Рыбы. Вып. 5. *Окунеобразные (бычкovidные), скорпенообразные, камбалообразные, присоскоперообразные, удильщицообразные*. Киев : Наукова думка, 1986. 320 с. [Smirnov A. I. *Fauna Ukrainy*. Vol. 8. *Ryby*. Iss. 5. *Okuneobraznye (bychkovidnye), skorpenoobraznye, kambaloobraznye, prisoskoperoobraznye, udil'shchikoobraznye*. Kyiv : Naukova dumka, 1986, 320 p. (in Russ.)]
3. Peskov V. N., Manilo L. G. Sex differences and sex identification in the small-scaled scorpionfish, *Scorpaena porcus* (Scorpaenidae, Scorpaeniformes). *Vestnik zoologii*, 2016, vol. 50, no. 4, pp. 355–362.

VARIABILITY OF THE BLACK SCORPIONFISH, *SCORPAENA PORCUS* LINNAEUS, 1758 (SCORPAENIDAE), FROM TWO BLACK SEA LOCALITIES

O. D. Raschyslov and I. V. Dovgal¹

¹A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: dovgal-1954@mail.ru

Comparative investigation of morphological variability of the black scorpionfish, *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758, from two distant Black Sea localities – Foros village (Crimean Peninsula) and Malyi Utrish village (Krasnodar Krai) – was carried out. Due to sexual dimorphism in the black scorpionfish and small abundance of males in the samples, only mature females were analyzed. A total of 54 individuals were examined (29 from Foros and 25 from Malyi Utrish). We used 5 meristic and 26 morphometric characters. In the meristic characters, there were no region-related differences between black scorpionfish females from Foros and Malyi Utrish; in the morphometric characters (maximum body height, length of the first dorsal fin, distance between pectoral and abdominal fin, length of snout, eye diameter, and length of lower jaw), the differences were statistically significant. The canonical discriminant analysis showed that *S. porcus* females from Foros were correctly classified with an accuracy of 97%, while females from Malyi Utrish – with an accuracy of 100%. It was suggested that the obtained results are a manifestation of modification variability. However, there were no significant differences between black scorpionfish females from two localities in the total length and body mass, which could result from differences in trophic conditions and fish abundance. This may indicate the existence of a complex of modification and interpopulation variability in *S. porcus* from the investigated Black Sea localities. Though black scorpionfish pelagic eggs can be transported *via* sea currents, spatial isolation and limited migrations may lead to the formation of local populations of *S. porcus*. Nevertheless, analysis of genetic markers is required to test the hypothesis.

Keywords: *Scorpaena porcus*, morphological variability, interpopulation variability, isolation, Black Sea

УДК 597.556.333.1(262.5)

**ОБНАРУЖЕНИЕ ЗОЛОТИСТОГО БЫЧКА
Gobius xanthocephalus (GOBIIDAE)
В РАЙОНЕ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА
(ЧЁРНОЕ МОРЕ)**

© 2023 г. **В. В. Шаганов¹, П. И. Дончик²**

¹ Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Российская Федерация

² ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,

Севастополь, Российская Федерация

E-mail: vshaganov@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.02.2021; после доработки 04.07.2021;
принята к публикации 16.02.2023; опубликована онлайн 31.05.2023.

Приведены сведения об обнаружении золотистого бычка *Gobius xanthocephalus* Neumer & Zander, 1992 (Gobiidae, Perciformes) в районе юго-восточного побережья Крыма (Чёрное море), где ранее данный вид не находили. Особь этого вида отмечена при проведении подводных ихтиологических исследований в акватории Двужорной бухты, у северо-восточной оконечности полуострова Киик-Атлама (44°57' с. ш., 35°23' в. д.). Бычок зарегистрирован на глубине 8,5 м у подножия подводной части скалистого склона, в затенённой нише среди скопления глыб. Обнаружение золотистого бычка в районе Юго-Восточного Крыма свидетельствует о расширении его ареала в полигалинных акваториях северной части Чёрного моря.

Ключевые слова: ареал, Двужорная бухта, полуостров Киик-Атлама

Золотистый бычок *Gobius xanthocephalus* Neumer & Zander, 1992 (Gobiidae, Perciformes) является представителем восточно-атлантическо-средиземноморского фаунистического комплекса [Манило, 2014; Манило и др., 2013]. Распространён в Восточной Атлантике вдоль берегов Португалии и Канарских островов. В Средиземном море обычен у побережья Франции [Манило, 2014]. В Чёрном море золотистый бычок впервые отмечен в 1967 г. в акватории бухты Круглая (город Севастополь), где было выловлено 6 экз. Первоначально данный вид ошибочно идентифицирован как *Cabotia schmidti* de Buen, 1930, затем — как *Gobius auratus* Risso, 1810 [Гордина, 1976]. В дальнейшем переопределение показало, что эти особи относятся к виду *Gobius xanthocephalus* [Болтачев и др., 2009; Васильева, Богородский, 2004]. Последующие находки золотистого бычка в Чёрном море были сделаны в юго-западной [Карпова, Саксаганский, 2011] и западной [Болтачев и др., 2009; Манило и др., 2013] частях побережья Крыма, а также у берегов Кавказа, в районе Абхазии [Васильева, Богородский, 2004]. В водах Юго-Восточного Крыма этот вид ранее зарегистрирован не был.

В акватории Двужорной бухты, у северо-восточной оконечности мыса Киик-Атлама (44°57' с. ш., 35°23' в. д.) (рис. 1) при проведении подводных ихтиологических наблюдений 14.08.2020 нами отмечена единичная особь данного вида. Бычок обнаружен на глубине 8,5 м у подножия подводной части скалистого склона, в затенённой нише среди скопления глыб. Внутренняя часть ниши была покрыта песком и створками крупных мидий, по периферии располагались глыбы с разреженным растительным покровом.

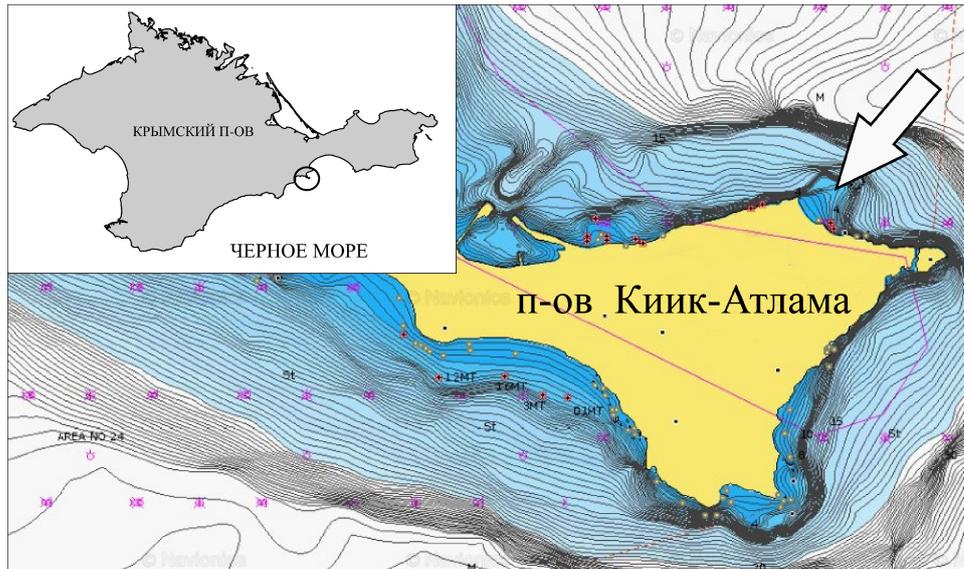


Рис. 1. Место обнаружения (обозначено →) золотистого бычка *Gobius xanthocephalus* в районе Юго-Восточного Крыма

Fig. 1. Spot of finding (marked with →) of the golden goby *Gobius xanthocephalus* in the Southeastern Crimea

Золотистый бычок характеризуется наличием яркой окраски, которая отличает его от других бычковых рыб данного района; это послужило основой при видовой идентификации особи под водой и при последующем анализе полученных фотоснимков. Общий фон окраски экземпляра бледно-жёлтый, более светлый на брюхе. Вдоль всего туловища проходят узкие продольные полосы, образованные мелкими, напоминающими пунктир красноватыми пятнами. Голова до затылка золотисто-жёлтого цвета. Вдоль глаз проходят две параллельные красные полосы: одна — по верхней вертикали глаза, вторая — через зрачок. От передней вертикали глаза до середины верхней челюсти есть v-образная полоска. Грудные плавники прозрачные, с чёрными пятнами у основания. На спинных плавниках пятнышки образуют параллельные прерывистые линии. Анальный и хвостовой плавники у основания голубоватого оттенка (рис. 2). В целом окраска особи соответствует описанной ранее [Васильева, 2007; Манило, 2014; Villegas-Ríos, Vañón, 2010].



Рис. 2. Золотистый бычок *Gobius xanthocephalus*; бухта Двужкорная, полуостров Киик-Атлама (оригинальное фото П. И. Дончика)

Fig. 2. The golden goby *Gobius xanthocephalus*; the Dvuyakornaya Bay, the Kiik-Atlama Peninsula (original photo by P. Donchik)

Рыба держалась в толще воды вблизи дна, перемещаясь короткими, резкими рывками. Во время фотосъёмки проявляла крайнюю осторожность, не подпуская дайвера на близкое расстояние; по мере его приближения, постепенно скрывалась в глубине ниши.

На основании факта обнаружения золотистого бычка в водах Юго-Восточного Крыма можно судить о расширении ареала данного вида в полигалинных участках северной части Чёрного моря.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана» (№ гос. регистрации 121030100028-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Болтачев А. Р., Карпова Е. П., Данилюк О. Н. Находки новых и редких видов рыб в прибрежной зоне Крыма (Чёрное море) // *Вопросы ихтиологии*. 2009. Т. 49, № 3. С. 318–332. [Boltachev A. R., Karpova E. P., Danilyuk O. N. Findings of new and rare fish species in the coastal zone of the Crimea (the Black Sea). *Voprosy ikhtiologii*, 2009, vol. 49, no. 3, pp. 318–332. (in Russ.)]
2. Васильева Е. Д. *Рыбы Чёрного моря. Определитель морских, солоноватоводных, эвригалинных и проходных видов с цветными иллюстрациями, собранными С. В. Богородским*. Москва : ВНИРО, 2007. 238 с. [Vasil'eva E. D. *Ryby Chernogo morya. Opredelitel' morskikh, solonovatovodnykh, evrigalinykh i prokhodnykh vidov s tsvetnymi illyustratsiyami, sobrannymi S. V. Bogorodskim*. Moscow : VNIRO, 2007, 238 p. (in Russ.)]
3. Васильева Е. Д., Богородский С. В. Два новых вида бычков (Gobiidae) в ихтиофауне Чёрного моря // *Вопросы ихтиологии*. 2004. Т. 44, № 5. С. 599–606. [Vasilyeva E. D., Bogorodskii S. V. Two new species of gobies (Gobiidae) in the ichthyofauna of the Black Sea. *Voprosy ikhtiologii*, 2004, vol. 44, no. 5, pp. 599–606. (in Russ.)]
4. Гордина А. Д. Распределение и сезонные изменения численности взрослых рыб в зарослевых биоценозах Чёрного моря // *Биология моря*. 1976. Вып. 39. С. 78–92. [Gordina A. D. Raspredelenie i sezonnye izmeneniya chislennosti vzroslykh ryb v zaroslevykh biotsenozakh Chernogo morya. *Biologiya morya*, 1976, iss. 39, pp. 78–92. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/2153>
5. Карпова Е. П., Саксаганский В. В. Распределение рыб семейства бычковых (Gobiidae) у черноморского побережья Крыма // *Сучасні проблеми теоретичної та практичної іхтіології* : тези IV Міжнар. іхтіол. наук.-практ. конф., Одеса, 7–11 вересня 2011 р. Одеса : Одеськ. нац. ун-т ім. І. І. Мечнікова, 2011. С. 117–118. [Karpova E. P., Saksaganskii V. V. Raspredelenie ryb semeistva bychkovykh (Gobiidae) u chernomorskogo poberezh'ya Kryma. In: *Suchasni problemy teoretychnoi ta praktychnoi ikhtiologii* : tezy IV Mizhnar. ikhtiol. nauk.-prakt. konf., Odesa, 7–11 September, 2011. Odesa : Odes'k. nats. un-t im. I. I. Mecnikova, 2011, pp. 117–118. (in Russ.)]
6. Манило Л. Г. *Рыбы семейства Бычковые (Perciformes, Gobiidae) морских и солоноватых вод Украины*. Киев : Наукова думка, 2014. 243 с. [Manilo L. G. *Ryby semeistva Bychkovyve (Perciformes, Gobiidae) morskikh i solonovatykh vod Ukrainy*. Kyiv : Naukova dumka, 2014, 243 p. (in Russ.)]
7. Манило Л. Г., Болтачев А. Р., Карпова Е. П. Бычки-вселенцы морских вод Крыма // *Збірник праць Зоологічного музею*. 2013. № 44. С. 50–69. [Manilo L. G., Boltachev A. R., Karpova E. P. Gobiidae invasive species of the Crimean marine waters. *Zbirnyk prats Zoolohichnoho muzeiu*, 2013, no. 44, pp. 50–69. (in Russ.)]
8. Villegas-Ríos D., Bañón R. First record and new meristic data of *Gobius xanthocephalus* (Gobiidae) from Galician waters (NW Spain). *Cybium*, 2010, vol. 34, no. 3, pp. 311–314. <https://doi.org/10.26028/cybium/2010-343-010>

**FINDING OF THE GOLDEN GOBY
Gobius xanthocephalus (GOBIIDAE)
OFF THE SOUTHEASTERN COAST OF CRIMEA (THE BLACK SEA)**

V. V. Shaganov¹ and P. I. Donchik²

¹Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

²A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation

E-mail: vshaganov@yandex.ru

Information is given on the finding of the golden goby *Gobius xanthocephalus* Heymer & Zander, 1992 (Gobiidae, Perciformes) off the southeastern coast of Crimea (the Black Sea), where this species was not previously recorded. An individual was registered during underwater ichthyological studies in the Dvuyakornaya Bay water area, in the vicinity of the northeastern tip of the Kiik-Atlama Peninsula (44°57'N, 35°23'E). The golden goby was recorded at a depth of 8.5 m at the foot of the underwater part of the rocky slope, in a shaded niche among a cluster of boulders. The finding of this species in the Southeastern Crimea indicates the expansion of its range in polyhaline water areas of the northern Black Sea.

Keywords: range, Dvuyakornaya Bay, Kiik-Atlama Peninsula

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

**К 90-ЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ ПРОФЕССОРА ОЛЕГА ГЛЕБОВИЧА МИРОНОВА
(1933–2022)**



9 марта 2023 г. исполнилось 90 лет со дня рождения Олега Глебовича Миронова — известного гидробиолога, кандидата медицинских (1963) и доктора биологических наук (1971), профессора, организатора первой в СССР (1964) лаборатории морской санитарной гидробиологии, преобразованной в 1971 г. в отдел.

Практически вся трудовая деятельность Олега Глебовича была связана с Севастопольской биологической станцией (до 1963 г.) и Институтом биологии южных морей. Ещё до учёбы в вузе он работал здесь библиотекарем. В 1952 г. он поступил в Военно-медицинскую академию (Ленинград) и начал специализироваться по санитарной экологии моря. В частности, он выполнил комплекс научных работ, направленных на решение медико-экологических вопросов на Черноморском флоте. В период преподавания на кафедре общей гигиены Гродненского государственного мединститута О. Г. Миронов развернул активные исследо-

вания уровней радиоактивности объектов внешней среды Гродненской области. Изучение радиоактивности было продолжено в ИнБЮМ, где был выполнен цикл работ по биомиграции искусственных радионуклидов с моря на сушу (по переносу стронция-90 и цезия-137 промышленными гидробионтами в организм человека).

В 1963 г., после защиты кандидатской диссертации, он был принят по конкурсу в ИнБЮМ АН УССР на должность младшего научного сотрудника. В 1964 г., после принятия учёным советом института решения о развитии исследований по санитарной биологии моря, Олег Глебович организовал и возглавил соответствующую лабораторию. В 1970 г., после защиты докторской диссертации, он развернул экспериментальные и полевые исследования, результаты которых до сих пор представляют большой научный и практический интерес.

Сконцентрировав свои научные изыскания на опаснейшем загрязнителе морей и океанов (нефти и нефтепродуктах), О. Г. Миронов уже к середине 1970-х гг. обосновал фундаментальную концепцию «взаимодействия морских организмов и их сообществ с загрязнением как части общеприродного процесса трансформации вещества и передачи энергии в морской среде». Эта концепция не только определила на десятилетия основные направления исследований отдела морской санитарной биологии ИнБЮМ, но и была положена в основу международной программы по биомониторингу нефтяного загрязнения Средиземноморского бассейна (Совместное изучение Средиземного моря, СИСМ). Актуальность сформулированных им положений

была подтверждена привлечением сотрудников отдела к выполнению ключевых государственных программ и проектов, среди которых «Мировой океан», ГИЗМ, «Среда» и GESAMP. Исследования наших коллег охватили акватории Чёрного, Каспийского и Баренцева морей, в том числе отдельные районы Тихоокеанского побережья.

Под руководством Олега Глебовича впервые изучено воздействие нефти и нефтепродуктов на массовые виды морских организмов Чёрного моря — на представителей фито- и зоопланктона, на рыб и бентос. В экспедиционных условиях получены новые данные о закономерностях распространения, о численности, биохимических особенностях и видовом составе нефтеокисляющих микроорганизмов в Чёрном, Средиземном и Красном морях, а также в различных районах Тихого, Атлантического и Индийского океанов. Обширные исследования деструкционной активности нефтеокисляющей микрофлоры позволили впервые рассчитать потенциальную способность Чёрного моря к самоочищению от нефтяного загрязнения.

О. Г. Миронову принадлежит экспериментально обоснованная концепция целенаправленного использования морских организмов и их сообществ для очистки нефтесодержащих (загрязнённых) морских вод и для санации прибрежных акваторий. Её реализация (в форме размещения технических гидробиологических систем в некоторых антропогенно напряжённых прибрежных районах Севастополя) неоднократно подтверждала прикладную значимость фундаментальных исследований отдела морской санитарной гидробиологии. В настоящее время заложенные Олегом Глебовичем направления развиваются и изучение влияния нефти и нефтепродуктов на окружающую среду продолжается в лаборатории хемэкологии отдела радиационной и химической биологии ФИЦ ИнБЮМ.

Он внёс неоценимый вклад в становление системы долгосрочных мониторинговых исследований прибрежно-морских зон Севастополя. Комплексные химико-биологические съёмки практически всех бухт нашего города, впервые организованные по его инициативе в 1973 г., проводятся до сих пор.

Результаты исследований О. Г. Миронова обобщены в ряде монографий под его редакцией: «Взаимодействие морских организмов с нефтяными углеводородами» (1985), «Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке» (2003), «Санитарно-биологические исследования в прибрежной акватории региона Севастополя» (2009), «Санитарно-биологические исследования прибрежных акваторий юго-западного Крыма в начале XXI века» (2018). Они представляют собой уникальную, научно обоснованную «антропогенную историю» региона. Олег Глебович стал автором более чем 400 публикаций. Его работы получили широкое признание не только у российских коллег, но и у зарубежных исследователей.

О. Г. Миронов, выдающийся учёный и прекрасный организатор, создал школу морских санитарных гидробиологов — экологов. Под его руководством защищены более 20 кандидатских диссертаций и 1 докторская. Он был активным популяризатором науки: неоднократно выступал по телевидению и давал комментарии в других СМИ по актуальным экологическим проблемам нашего города и страны. Его статьи опубликованы в ряде газет и научно-популярных изданий: «Родная природа», «Химия и жизнь», «Природа», «Человек и стихия» и др.

Светлая память о замечательном учёном и удивительном человеке навсегда сохранится в сердцах его учеников, коллег и друзей.

ON THE 90th ANNIVERSARY OF PROFESSOR OLEG MIRONOV (1933–2022)

9 March, 2023, marks the 90th anniversary of the birth of D. Sc., Prof. Oleg Mironov. He organized the first marine sanitary hydrobiology laboratory in the USSR and became the author of more than 400 scientific publications.

ПАМЯТИ УЧЁНОГО: К 80-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ПРОФЕССОРА ЮРИЯ НИКОЛАЕВИЧА ТОКАРЕВА



19 августа 2023 г. исполнилось бы 80 лет Юрию Николаевичу Токареву — заместителю директора по научной работе Института биологии южных морей имени А. О. Ковалевского, научному руководителю института, лауреату Государственной премии Украины в области науки и техники, заслуженному деятелю науки и техники Республики Крым, доктору биологических наук, профессору, заведующему отделом биофизической экологии.

Юрий Николаевич родился в городе Потти Грузинской ССР в семье военнослужащего. В 1945 г. переехал вместе с семьёй в Севастополь. Здесь он в 1950 г. пошёл в школу, а в 1960 г. окончил её с серебряной медалью. В том же году он стал студентом факультета радиоэлектроники Севастопольского филиала Одесского политехнического института (с 1963 г. — Севастопольский приборостроительный институт), который окончил с отличием в 1965 г., получив квалификацию «радиоинженер». В 1967 г. Ю. Н. Токарев был приглашён на должность старшего инженера в кабинет биолюминесценции отдела планктона ИнБЮМ Академии наук УССР. В 1972 г. он был избран по конкурсу на должность младшего научного сотрудника в этом отделе, а в 1976 г. — назначен заместителем директора ИнБЮМ по общим вопросам. С 2002 г. он возглавлял отдел биофизической экологии, с 2015 г. являлся также научным руководителем института.

В 1990 г. Юрий Николаевич защитил кандидатскую, а в 2001 г. — докторскую диссертацию. Обе работы были посвящены биофизическим аспектам экологии пелагиали.

Он опубликовал свыше 250 научных трудов в престижных отечественных и зарубежных изданиях, а также 8 монографий. Ю. Н. Токарев принимал активное участие в десятках научных проектов, от региональных до международных, и был руководителем некоторых из них. Его деятельность отмечена знаком «За научные достижения» Национальной академии наук Украины (2006 г.) и Государственной премией Украины в области науки и техники (2007 г.). Также ему присвоено звание заслуженного деятеля науки и техники Автономной Республики Крым (2011 г.).

За период с 1969 г., участвуя в многочисленных научных экспедициях на различных судах и выступая с докладами на международных конференциях, форумах и симпозиумах, Юрий Николаевич посетил более 50 стран. Он работал в Тихом, Индийском и Атлантическом океанах в качестве начальника научного отряда, а также учёного секретаря, заместителя начальника и начальника экспедиции.

Ю. Н. Токаревым предложено новое направление в морских исследованиях — биофизическая экология, то есть изучение экологических вопросов с помощью биофизических методов. Трудно перечислить все достижения этого учёного и сотрудников возглавляемого им отдела

в важном и перспективном направлении современной гидробиологии — в области биофизической экологии гидробионтов. Основными же являются: установление на мелкомасштабном уровне закономерностей формирования структуры биологических полей, которые играют важную роль в повышении эффективности рыболовного промысла; разработка рекомендаций и новых подходов к оценке и рациональному использованию биологических ресурсов Мирового океана; развитие современной гидробиологической терминологии и новых представлений о нетрофических взаимодействиях сообществ пелагиали, имеющих большое общебиологическое и практическое значение.

Сочетание высокой требовательности к себе и другим, принципиальности в научных исследованиях, доброжелательности, эрудиции, интеллигентности, порядочности и выдающегося таланта учёного, педагога и руководителя, а также исключительные человеческие качества снискали Юрию Николаевичу заслуженное уважение его коллег и учеников — аспирантов и молодых специалистов. Под его руководством защищён ряд диссертаций соискателей и аспирантов, ещё несколько работ подготовлены к защите. Будучи одним из наиболее уважаемых и опытных профессоров института, он читал курс биофизики в Севастопольском национальном техническом университете, вёл активную просветительскую и педагогическую деятельность, был куратором Малой академии наук города Севастополя.

Ю. Н. Токарев был разносторонне талантливым человеком с тонким чувством юмора и глубоким знанием истории, искусства, литературы, музыки и спорта. Он любил и понимал поэзию и сам писал стихи, в которых всегда звучали неутолимая жажда жизни, неиссякаемый оптимизм и любовь ко всему прекрасному.

Ещё не время подводить итоги!
Ещё мне хочется неутолённым быть,
Ещё влекут волшебные дороги —
Хочу страдать, надеяться, любить!

Любить безумно, страстно, вдохновенно,
Как будто бы исчезло навсегда
Что нас гнетёт, увы, обыкновенно:
Печаль, тоска, безденежье, года...

Ещё волнуют трепетные взоры,
Ещё влечёт и манит жар ланит,
Ещё больны любимых мне укоры,
Ещё порок как музыка звучит!

Итогов нет, не наступило время!
Унылым будням мой порыв не погасить!
Коня! Коня! Подайте, други, стремя!
Я отправляюсь жаждать и любить!

Ю. Н. Токарев, 19 августа 1998 г.

ON THE 80th ANNIVERSARY OF PROFESSOR YURIY TOKAREV

On 19 August, 2023, Yuriy Tokarev, IBSS deputy director for research and head of the biophysical ecology department, would have turned 80. He became the author of more than 260 publications and was an active participant in scientific expeditions.

Учредитель и издатель журнала:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт биологии южных морей
имени А. О. Ковалевского РАН»
(ОГРН 1159204018478)

Соиздатель журнала:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Зоологический институт РАН

Рекомендовано к печати решением учёного совета
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра
«Институт биологии южных морей
имени А. О. Ковалевского РАН»
(протокол № 2 от 16.02.2023).

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
(свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС 77 - 76872 от 24.09.2019).

Выпускающий редактор номера:

д. б. н. Неврова Е. Л.

Корректор:

Копытова О. Ю.

Перевод:

Тренкеншу Т. А., Надточенко И. А.

Компьютерная вёрстка:

Баяндин А. С.

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

Материалы журнала доступны на условиях лицензии
Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).



Подп. к печати 16.02.2023	Дата выхода в свет 31.05.2023	Заказ № 77359	Тираж 100 экз.
Формат 60 × 84/8	Уч.-изд. листов 9,3	Усл. печ. листов 13,25	Печать цифровая

Отпечатано в типографии: ИП Ермолов М. П., ОГРНИП 314920436710081 от 26.12.2014;
ул. Кулакова, д. 59, г. Севастополь, 299011;
тел.: +7 978 70-45-111; e-mail: print-e@yandex.ru.



Вниманию читателей!

*Институт биологии южных морей
имени А. О. Ковалевского РАН,
Зоологический институт РАН*

*издают
научный журнал*

*Морской биологический журнал
Marine Biological Journal*

- МБЖ — периодическое издание открытого доступа. Подаваемые материалы проходят независимое двойное слепое рецензирование. Журнал публикует обзорные и оригинальные научные статьи, краткие сообщения и заметки, содержащие новые данные теоретических и экспериментальных исследований в области морской биологии, материалы по разнообразию морских организмов, их популяций и сообществ, закономерностям распределения живых организмов в Мировом океане, результаты комплексного изучения морских и океанических экосистем, антропогенного воздействия на морские организмы и экосистемы.
- Целевая аудитория: биологи, экологи, биофизики, гидро- и радиобиологи, океанологи, географы, учёные других смежных специальностей, аспиранты и студенты соответствующих научных и отраслевых профилей.
- Статьи публикуются на русском и английском языках.
- Периодичность — четыре раза в год.
- Подписной индекс в каталоге «Пресса России» — Е38872. Цена свободная.

Заказать журнал

можно в научно-информационном отделе ИнБЮМ.
Адрес: ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», пр-т Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация.
Тел.: +7 8692 54-06-49.
E-mail: mbj@imbr-ras.ru.

*A. O. Kovalevsky Institute of Biology
of the Southern Seas of RAS,
Zoological Institute of RAS*

*publish
scientific journal*

*Морской биологический журнал
Marine Biological Journal*

- MBJ is an open access, peer reviewed (double-blind) journal. The journal publishes original articles as well as reviews and brief reports and notes focused on new data of theoretical and experimental research in the fields of marine biology, diversity of marine organisms and their populations and communities, patterns of distribution of animals and plants in the World Ocean, the results of a comprehensive studies of marine and oceanic ecosystems, anthropogenic impact on marine organisms and on the ecosystems.
- Intended audience: biologists, ecologists, biophysicists, hydrobiologists, radiobiologists, oceanologists, geographers, scientists of other related specialties, graduate students, and 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. The price is free.

You may order the journal

in the scientific information department of IBSS.
Address: A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, 2 Nakhimov avenue, Sevastopol, 299011, Russian Federation.
Tel.: +7 8692 54-06-49.
E-mail: mbj@imbr-ras.ru.