



ISSN 2499-9768 print

МОРСКОЙ
БИОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ
MARINE BIOLOGICAL JOURNAL

Том 9 № 3
2024



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

Sanzharova 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

2024 Том 9 № 3

Основан в феврале 2016 г.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит 4 раза в год

СОДЕРЖАНИЕ

Научные сообщения

- Боровков А. Б., Гудвиллов И. Н., Жондарева Я. Д.*
Рост культур морских микроводорослей *Porphyridium purpureum* и *Tetraselmis viridis*
на модифицированных питательных средах 3–15
- Кабасакал Х., Узер У., Каракулак Ф. С.*
Цветовой узор морской лисицы *Raja clavata* Linnaeus, 1758 из Мраморного моря,
из-за которого возможны ошибки идентификации нескольких скатов в регионе (in Eng.) 16–23
- Капанова Л. Л., Дикарева Ю. Д., Капанов С. В., Рябушко В. И.*
Содержание химических элементов в тканях и раковинах двустворчатого моллюска
Anadara kagoshimensis (Tokunaga, 1906) из Чёрного и Азовского морей 24–33
- Касаткина А. П., Васильева Л. Е.*
Новый вид щетинкочелюстных *Sagitta dimitryi* sp. nov. (Chaetognatha, Sagittoidea)
из Охотского моря (Северо-Западный Сахалин) 34–43
- Кацев А. М., Сазыкин И. С., Хмелевцова Л. Е., Сафронюк С. Л., Карчава Ш. К.,
Климова М. В., Хаммами М. И., Сазыкина М. А.*
Биолюминесцентные бактерии Чёрного и Азовского морей (in Eng.) 44–55
- Селиверстова Т. В.*
Индексы в оценке функциональной активности клеток крови
дельфина-афалины *Tursiops truncatus* (Montagu, 1821) 56–65
- Смолькова О. В.*
Современное состояние популяции и особенности распространения
двустворчатых моллюсков *Mya arenaria* Linnaeus, 1758 в Кольском заливе Баренцева моря 66–83
- Ясакова О. Н.*
Видовой состав, численность и биомасса фитопланктона
в Керченском проливе в 2009–2019 гг. 84–103
- #### Заметки
- Вехов Д. А., Живоглядова Л. А., Елфимова Н. С., Афанасьев Д. Ф.*
Бассейн реки Кубань — новая страница в экспансии азиатского моллюска
Corbicula fluminea (O. F. Müller, 1774) (Bivalvia: Cyrenidae) 104–107
- Гринцов В. А.*
Первые находки новых видов амфипод в Азовском море 108–112
- Лисицкая Е. В., Попов М. А., Челядина Н. С.*
О нахождении *Polydora websteri* Hartman in Loosanoff & Engle, 1943 (Annelida: Spionidae)
в Азовском море 113–117
- #### Рецензии
- Болога А. Ш.*
Обзор статьи *Cystoseira phytocenosis as a biological barrier for heavy metals
and organochlorine compounds in the SPNA Cape Martyan marine area (the Black Sea)* 118–120

МОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

MARINE BIOLOGICAL JOURNAL

2024 Vol. 9 no. 3

Established in February 2016

SCIENTIFIC JOURNAL

4 issues per year

CONTENTS

Scientific communications

Borovkov A., Gudvilovich I., and Zhondareva Ya.

Growth of cultures of marine microalgae *Porphyridium purpureum* and *Tetraselmis viridis* on modified nutrient media (in Russ.) 3–15

Kabasakal H., Uzer U., and Karakulak F. S.

Color patterns of the thornback skate, *Raja clavata* Linnaeus, 1758, from the Sea of Marmara suggesting possible misidentifications of several rajids in the region 16–23

Kapranova L., Dikareva J., Kapranov S., and Ryabushko V.

The element contents in soft tissues and shells of the bivalve *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) from the Black Sea and Sea of Azov (in Russ.) 24–33

Kasatkina A. and Vasileva L.

A new species of arrow worms, *Sagitta dimitryi* sp. nov. (Chaetognatha, Sagittoidea), from the Sea of Okhotsk (Northwest Sakhalin) (in Russ.) 34–43

Katsev A., Sazykin I., Khmelevtsova L., Safronyuk S., Karchava Sh.,

Klimova M., Khammami M., and Sazykina M.

Bioluminescent bacteria of the Black Sea and Sea of Azov 44–55

Seliverstova T.

Indices in the evaluation of the functional activity of blood cells of the bottlenose dolphin *Tursiops truncatus* (Montagu, 1821) (in Russ.) 56–65

Smolkova O.

Current state of the population and features of the distribution of the soft-shell clams *Mya arenaria* Linnaeus, 1758 in the Kola Bay of the Barents Sea (in Russ.) 66–83

Yasakova O.

Species composition, abundance, and biomass of phytoplankton in the Kerch Strait in 2009–2019 (in Russ.) 84–103

Notes

Vekhov D., Zhivoglyadova L., Elfimova N., and Afanasyev D.

The Kuban River basin, a new page in the expansion of the Asian clam *Corbicula fluminea* (O. F. Müller, 1774) (Bivalvia: Cyrenidae) (in Russ.) 104–107

Grintsov V.

The first findings of new species of amphipods in the Sea of Azov (in Russ.) 108–112

Litskaya E., Popov M., and Chelyadina N.

About finding *Polydora websteri* Hartman in Loosanoff & Engle, 1943 (Annelida: Spionidae) in the Sea of Azov (in Russ.) 113–117

Reviews

Bologa A. Ş.

Cystoseira phytocenosis as a biological barrier for heavy metals and organochlorine compounds in the SPNA Cape Martyan marine area (the Black Sea): Review of the article (in Russ.) 118–120

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 579.8.017.6.083.134

**РОСТ КУЛЬТУР МОРСКИХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ
PORPHYRIDIUM PURPUREUM И *TETRASELMIS VIRIDIS*
НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПИТАТЕЛЬНЫХ СРЕДАХ**

© 2024 г. А. Б. Боровков, И. Н. Гудвиллович, Я. Д. Жондарева

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Российская Федерация
E-mail: gudirina2008@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.01.2024; после доработки 19.02.2024;
принята к публикации 27.08.2024; опубликована онлайн 09.09.2024.

Морские виды микроводорослей, которые способны синтезировать широкий спектр биологически активных веществ, в настоящее время считают наиболее перспективными источниками таких соединений. Большинство питательных сред для культивирования микроводорослей приготавливают на основе природной или искусственной морской воды. Представляется перспективной модификация питательной среды для выращивания морских микроводорослей путём замены её водной основы с природной морской воды на пресную. Альгологически чистые культуры морских микроводорослей *Porphyridium purpureum* и *Tetraselmis viridis* выращивали, заменяя стерильную морскую воду на пресную, в которую добавляли морскую соль до концентрации 18 и 28 г·л⁻¹ для *T. viridis* и *P. purpureum* соответственно. На основании полученных экспериментальных данных определены продукционные характеристики накопительных культур *P. purpureum* и *T. viridis* при их выращивании на пресной и морской водной основе питательной среды. В целом изменение плотности культур *P. purpureum* и *T. viridis* при накопительном культивировании как на пресной, так и на морской воде имело однонаправленный характер (коэффициенты корреляции в обоих случаях 0,99), а водная основа питательной среды не оказывала существенного влияния на скорость их роста. Показано, что выход биомассы *P. purpureum* и *T. viridis* при использовании пресной воды в качестве основы питательной среды составляет 3,2–3,4 г с 1 л культуры (в пересчёте на сухое вещество) и в основном соответствует аналогичному параметру культур, выращенных с применением морской воды. Несмотря на то, что средняя скорость роста *T. viridis* при выращивании на пресной воде существенно не отличалась от скорости роста культуры на морской воде, отмечены повышенные средние скорости синтеза пигментов и их суммарное накопление у культуры, выращиваемой на морской воде. Для *P. purpureum* водная основа питательной среды не оказывала заметного влияния на такие характеристики, как скорость синтеза В-фикоэритрина и содержание этого пигмента в культуре и в биомассе микроводоросли. Результаты работы показывают, что культуры морских микроводорослей *P. purpureum* и *T. viridis* можно успешно выращивать без использования природной морской воды, что существенно снижает трудозатраты и себестоимость получаемой биомассы, а также расширяет географические перспективы их массового культивирования.

Ключевые слова: морские микроводоросли, *Porphyridium purpureum*, *Tetraselmis viridis*, пресная вода, продуктивность, биомасса, пигменты

Морские виды микроводорослей в настоящее время считают одними из наиболее перспективных источников биологически активных веществ благодаря их способности синтезировать широкий спектр соединений, оказывающих выраженное положительное влияние на организм человека и животных [Минюк и др., 2008]. В их числе — полиненасыщенные жирные кислоты, сульфатированные полисахариды, фотосинтетические пигменты (хлорофиллы, каротиноиды и фикобилипротеины), витамины и другие вещества, обладающие противовоспалительными, противогрибковыми, иммуномодулирующими и антиоксидантными свойствами [Borowitzka, 2013; Chauton et al., 2015; Gaignard et al., 2019; Geada et al., 2021; Li S. et al., 2019]. Всё это позволяет использовать биомассу морских микроводорослей и продукты биосинтеза в качестве биологически активных добавок, а также применять их в косметологии, фармакологии и производстве продуктов питания.

Потребность в полиненасыщенных жирных кислотах возросла в связи с развитием аквакультуры; для всех водных животных основным источником полезных длинноцепочечных омега-3 жирных кислот служат микроводоросли [Borowitzka, 2013]. Также морские микроводоросли нашли применение в качестве добавки к корму для рыб как источник необходимых аминокислот, жирных кислот, полисахаридов, антиоксидантов, витаминов и минералов: эти соединения стимулируют рост и выживаемость личинок рыб, а также повышают качество конечной продукции [Chauton et al., 2015; Gargouch et al., 2018; Ma, Hu, 2024; Tredici et al., 2009].

Выращивание морских микроводорослей в прибрежных зонах, как правило, менее затратно из-за меньших инвестиционных, логистических и эксплуатационных расходов. Однако существование ряда ограничений из-за конкуренции с зонами рекреации, рыболовства и рыбоводства, а также развитие городов вынуждают переносить комплексы по выращиванию морских водорослей в отдалённые от берега районы.

Большинство питательных сред для выращивания микроводорослей приготавливают на основе природной или искусственной морской воды. Описаны различные питательные среды для выращивания морских водорослей: F/2, Artificial Seawater Medium, Pm и другие [Fuentes-Grunewald et al., 2015; Gargouch et al., 2018; Kathiresan et al., 2006; Lelekov et al., 2016; Raes et al., 2013; Strizh et al., 2004]. Состав этих сред позволяет поддерживать клетки микроводорослей в вегетативном состоянии. Тем не менее скорость роста культуры и выход биомассы могут значительно отличаться из-за различной стартовой концентрации элементов минерального питания и условий выращивания культуры.

Культивирование морских микроводорослей становится невыгодным вдали от береговой линии в случае использования питательных сред на основе природной морской воды. Её минеральный состав уникален, его невозможно полностью воспроизвести в искусственных условиях: кроме минеральных солей и микроэлементов, в морской воде содержится большое количество свободных ионов. Одним из путей снижения себестоимости получаемой биомассы микроводорослей является их культивирование с использованием питательных сред на основе искусственной морской воды, однако это предполагает дополнительные материальные затраты и трудозатраты на её приготовление. Замена основы питательной среды на пресную воду с добавлением природной морской соли позволяет получить основу, близкую по своим характеристикам к натуральной морской воде. Такая модификация исключает зависимость от природного источника морской воды и снижает себестоимость получаемой биомассы, что является определяющим фактором для повышения эффективности и для территориального расширения интенсивного культивирования микроводорослей.

Красная микроводоросль *Porphyridium purpureum* (Bory) K. M. Drew & R. Ross, 1965 представляет интерес как источник сульфатированных экзополисахаридов, эссенциальных жирных кислот и пигментов, относящихся к группе фикобилипротеинов, биотехнологический

потенциал которых используется в нутрицевтике, фармацевтике, пищевой и косметической промышленности, а также в биомедицинских исследованиях и клинической диагностике [Gaignard et al., 2019; Li S. et al., 2019; Manirafasha et al., 2016]. Зелёная микроводоросль *Tetraselmis viridis* (Rouchijajnen) R. E. Norris, Hori & Chihara, 1980 является одним из видов, способных накапливать значительные количества полиненасыщенных жирных кислот, которые играют важнейшую роль в организме человека, участвуя в обменных процессах. Высокая продуктивность и питательная ценность делают её перспективной для производства биологически активных веществ, а также пищевых добавок для людей и животных [Borowitzka, 2013; Raes et al., 2013]. Микроводоросли рода *Tetraselmis* нашли широкое применение в аквакультуре как высокоценные корма, обогащённые полиненасыщенными жирными кислотами и белком [Borowitzka, 2013; Ma, Hu, 2024; Tredici et al., 2009], причём значительные концентрации липидов (до 22 %) могут накапливаться у этих видов даже при относительно высоком уровне белка (31–36 %) [Barka, Blecker, 2016].

В связи с этим может быть перспективным выращивание данных биотехнологически ценных видов морских микроводорослей на модифицированной питательной среде путём замены её водной основы с природной морской воды на пресную с добавлением морской соли. Поэтому целью настоящей работы являлась апробация культивирования морских микроводорослей *Tetraselmis viridis* и *Porphyridium purpureum* на модифицированной питательной среде на основе пресной воды.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись альгологически чистые культуры морских микроводорослей *P. purpureum* (Rhodophyta) и *T. viridis* (Chlorophyta) из ЦКП «Коллекция гидробионтов Мирового океана» ФИЦ ИнБЮМ.

Выращивание осуществляли на питательных средах следующего состава [Тренкеншу и др., 1981]:

- Для *P. purpureum*: NaNO_3 — 1,2 г·л⁻¹; $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ — 0,45 г·л⁻¹; EDTA- Na_2 — 0,037 г·л⁻¹; $\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7 \times 3\text{H}_2\text{O}$ — 0,0265 г·л⁻¹; $\text{MnCl}_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ — 0,004 г·л⁻¹; $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ — 0,0031 г·л⁻¹; $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \times 4\text{H}_2\text{O}$ — 0,0009 г·л⁻¹; $\text{K}_2\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ — 0,0017 г·л⁻¹.
- Для *T. viridis*: NaNO_3 — 1,8 г·л⁻¹; $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ — 0,3 г·л⁻¹; EDTA- Na_2 — 0,037 г·л⁻¹; $\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7 \times 3\text{H}_2\text{O}$ — 0,042 г·л⁻¹; $\text{MnCl}_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ — 0,008 г·л⁻¹; $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ — 0,00625 г·л⁻¹; $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \times 4\text{H}_2\text{O}$ — 0,00183 г·л⁻¹; $\text{K}_2\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ — 0,00238 г·л⁻¹.

Питательную среду для каждого вида готовили на стерильной черноморской воде (для *P. purpureum* дополнительно вносили 10 г·л⁻¹ морской соли). При её модификации морскую воду заменяли на пресную, в которую добавляли морскую соль (производитель ПК «Галит») до концентрации 18 и 28 г·л⁻¹ для *T. viridis* и *P. purpureum* соответственно.

Культуры микроводорослей выращивали в стеклянных фотобиореакторах плоскопараллельного типа размерами 25 × 50 см. Рабочая толщина — 2 и 5 см, объём — 1 и 3 л для *T. viridis* и *P. purpureum* соответственно. Объём поддерживали на протяжении всего эксперимента, ежедневно доливая перед отбором проб дистиллированную воду, чтобы компенсировать испарение. В качестве осветителя использовали световую решётку из 18-ваттных люминесцентных ламп; средняя интенсивность освещения на поверхности фотобиореакторов составляла 20 и 40 Вт·м⁻² для *P. purpureum* и *T. viridis* соответственно. Интенсивность освещения на поверхности фотобиореакторов регистрировали при помощи измерителя LI-250A с пиранометрическим датчиком (LI-COR, США). Температуру поддерживали на уровне +26...+28 °C; pH среды в процессе культивирования изменялся от 8 до 10. Барботаж культур осуществляли воздухом с помощью компрессора Hailea ACO-308; скорость подачи воздуха составляла около 0,5 л·л⁻¹ культуры в минуту. Для повышения растворимости углекислого газа атмосферного воздуха барботаж

осуществляли через распылитель, представляющий собой пластиковую трубку длиной 5 см и диаметром 5 мм, у которой диаметр пор не превышал 0,1 мм. Продолжительность эксперимента — 18 и 10 сут для *P. purpureum* и *T. viridis* соответственно.

Оптическую плотность культур (D_{750}) измеряли на фотометре Unicо 2100 в кюветах с рабочей длиной 5 мм на длине волны 750 нм. Содержание сухого вещества (СВ) в культурах определяли фотометрическим методом [Методы физиолого-биохимического исследования водорослей, 1975] с использованием уравнения $СВ = k \times D_{750}$, предварительно определив эмпирические коэффициенты перехода от оптической плотности культур к сухому веществу (1,4 и 0,8 для *P. purpureum* и *T. viridis* соответственно) [Боровков, Геворгиз, 2005; Borovkov et al., 2023].

Максимальную продуктивность (P_m) рассчитывали аппроксимацией эмпирических данных линейной фазы накопительной кривой микроводорослей, используя уравнение (1):

$$B = B_l + P_m \cdot t, \quad (1)$$

где B_l — плотность культуры в начале линейной фазы роста, г·л⁻¹;

t — время, сутки.

Содержание пигментов устанавливали спектрофотометрическим методом. Пробы для определения концентрации пигментов отбирали на различных фазах роста накопительной культуры после тщательного перемешивания. Суспензию центрифугировали в течение 10 мин, надосадочную жидкость сливали, осаждённую биомассу использовали для определения пигментов. Спектры экстрактов пигментов измеряли на спектрофотометре СФ-2000 (Россия). Для количественного определения В-фикоэритрина (далее — В-ФЭ) проводили экстракцию биомассы *P. purpureum* фосфатным буфером (0,05 М; рН 7–7,5). Оптическую плотность полученных экстрактов регистрировали в области характеристических максимумов поглощения В-ФЭ (545 нм), R-фикоцианина (615 нм) и аллофикоцианина (650 нм), а также при 750 нм (для учёта неспецифического поглощения раствора). Концентрацию В-ФЭ в водном экстракте рассчитывали по [Стадничук, 1990], используя значения оптической плотности для соответствующих длин волн:

$$B\text{-}\Phi\text{Э} = 0,1 \times D_{545} - 0,063 \times D_{615} + 0,023 \times D_{650}. \quad (2)$$

Хлорофиллы и каротиноиды экстрагировали из клеток 100%-ным ацетоном. Расчёт концентраций хлорофиллов и общих каротиноидов проводили по формулам, предложенным [Wellburn, 1994], по значениям оптической плотности на длинах волн, которые соответствуют максимумам поглощения аналогичных пигментов:

$$\text{Chl } a = 11,75 \times D_{662} - 2,35 \times D_{645};$$

$$\text{Chl } b = 18,61 \times D_{645} - 3,96 \times D_{662};$$

$$\text{Carotenoids} = (1000 \times D_{470} - 2,27 \times \text{Chl } a - 81,4 \times \text{Chl } b) / 227.$$

Рассчитывали средние арифметические (\bar{x}), стандартные отклонения (S), основные ошибки средних и доверительные интервалы для средних ($\Delta\bar{x}$). Все вычисления проводили в программах LibreOffice и SciDAVis для уровня значимости $\alpha = 0,05$. Во избежание загромождения графиков статистические показатели, характеризующие вариабельность исследуемых признаков, опускали без ущерба для восприятия результатов работы. В таблицах представлены средние значения и рассчитанные доверительные интервалы ($\bar{x} \pm \Delta\bar{x}$) для трёх повторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первоначальная плотность культуры для каждого из двух вариантов (основой питательной среды была морская и пресная вода) у *P. purpureum* составляла около $0,2 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$, а у *T. viridis* — $0,13 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$. За весь период культивирования биомасса *P. purpureum* по сравнению с первоначальной увеличилась более чем в 15 раз, а *T. viridis* — в 25 раз (рис. 1).

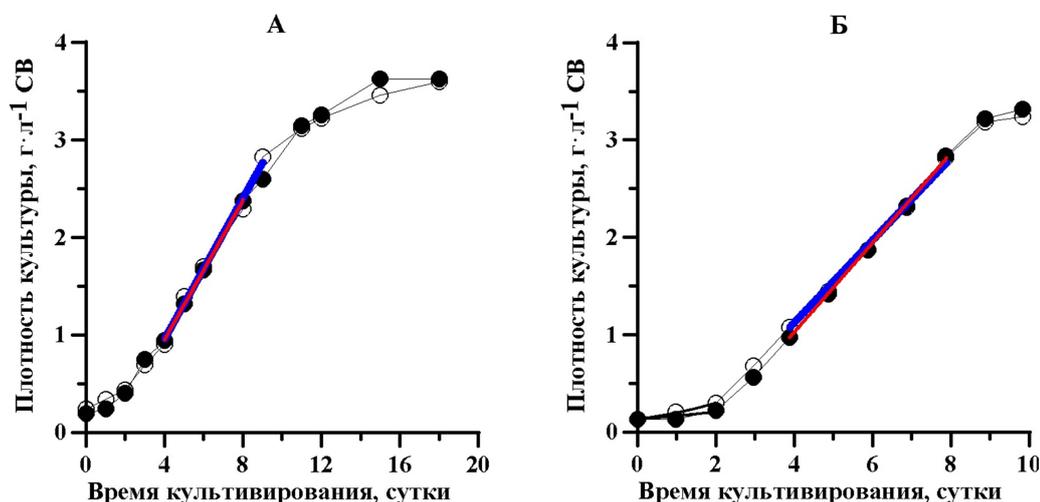


Рис. 1. Динамика плотности накопительной культуры *Porphyridium purpureum* (А) и *Tetraselmis viridis* (Б) при выращивании на питательной среде: ● — на основе пресной воды; ○ — на основе морской воды. Сплошные линии — аппроксимация линейной фазы уравнением (1) (красные — основой является пресная вода; синие — морская вода). Значения коэффициентов (максимальной продуктивности) приведены в табл. 1

Fig. 1. Dynamics of *Porphyridium purpureum* (А) and *Tetraselmis viridis* (Б) batch culture density when grown on a nutrient medium: ●, based on freshwater; ○, based on seawater. Solid lines are an approximation of the linear phase by equation (1) (red, based on freshwater; blue, based on seawater). The values of the coefficients (maximum productivity) are given in Table 1

При накопительном режиме выращивания поддержание клеток культур водорослей в вегетативном состоянии обеспечивается за счёт первоначального запаса элементов минерального питания, при этом плотность культур постепенно увеличивается и достигает максимального значения, что определяет общий выход биомассы микроводорослей. На протяжении всего периода выращивания *P. purpureum* и *T. viridis* характер изменения накопительных кривых культур на морской и пресной воде был почти идентичен и характеризовался высокой корреляцией (коэффициент корреляции равен 0,99 как для *P. purpureum*, так и для *T. viridis*). Суммарный прирост биомассы у вариантов эксперимента также не имел существенных отличий (рис. 1). На основании полученных данных определены продукционные характеристики накопительных культур *P. purpureum* и *T. viridis* по биомассе на пресной и морской водной основе питательной среды (табл. 1).

Питательные среды, которые были использованы для выращивания *P. purpureum* и *T. viridis*, рассчитаны на получение около 4 г биомассы с 1 л культуры [Тренкеншу и др., 1981; Упитис и др., 1989]. Расчётный прирост биомассы культур за весь период выращивания, с учётом концентрации азота в среде и разбавления, мог составлять около $3\text{--}3,5 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$, что соответствовало данным, полученным в эксперименте (табл. 1).

Продуктивность *P. purpureum* и *T. viridis* по биомассе на линейной стадии роста при их выращивании на пресной воде существенно не отличалась от продуктивности соответствующих культур на морской воде. Как максимальная, так и средняя скорость роста у *T. viridis* несколько выше, чем у *P. purpureum*, что объясняется, по-видимому, индивидуальными особенностями культуры. Однако удельная скорость роста *T. viridis* при выращивании на пресной воде ниже

почти в 2 раза, чем аналогичный параметр роста культуры на морской воде (табл. 1). Поскольку культуру *T. viridis* предварительно выращивали на среде без модификации, можно предположить, что в течение первых двух суток клетки водоросли адаптировались к новым условиям; это подтверждается некоторыми отличиями формы накопительной кривой (рис. 1Б). В целом изменение плотности культур *P. purpureum* и *T. viridis* при накопительном культивировании как на пресной, так и на морской воде имело однонаправленный характер, а на продуктивность культур водная основа питательной среды не оказывала существенного влияния.

Таблица 1. Продукционные характеристики накопительных культур *Porphyridium purpureum* и *Tetraselmis viridis* при их выращивании на питательной среде на основе пресной и морской воды

Table 1. Production characteristics of *Porphyridium purpureum* and *Tetraselmis viridis* batch cultures when grown on freshwater-based and seawater-based nutrient media

Культура	Водная основа питательной среды	Удельная скорость роста, сут ⁻¹	Максимальная продуктивность, г·л ⁻¹ ·сут ⁻¹	Продуктивность на линейной стадии роста, г·л ⁻¹ ·сут ⁻¹	Общий прирост биомассы, г·л ⁻¹
<i>Porphyridium purpureum</i>	Пресная	0,45	0,36	0,27 ± 0,02	3,44 ± 0,23
	Морская	0,35	0,36	0,29 ± 0,01	3,36 ± 0,02
<i>Tetraselmis viridis</i>	Пресная	0,23	0,46	0,43 ± 0,01	3,19 ± 0,02
	Морская	0,42	0,46	0,42 ± 0,006	3,11 ± 0,01

При накопительном выращивании биохимический состав получаемой биомассы микроводорослей определяется многими параметрами, важнейшими из которых являются концентрация элементов минерального питания и условия культивирования. Поэтому также исследовано влияние замены водной основы питательной среды на пресную воду на скорость синтеза и суммарное накопление пигментов в культурах *P. purpureum* и *T. viridis*. Рост *P. purpureum* в этих условиях сопровождался изменением содержания В-ФЭ как в культуре, так и в её клетках (рис. 2).

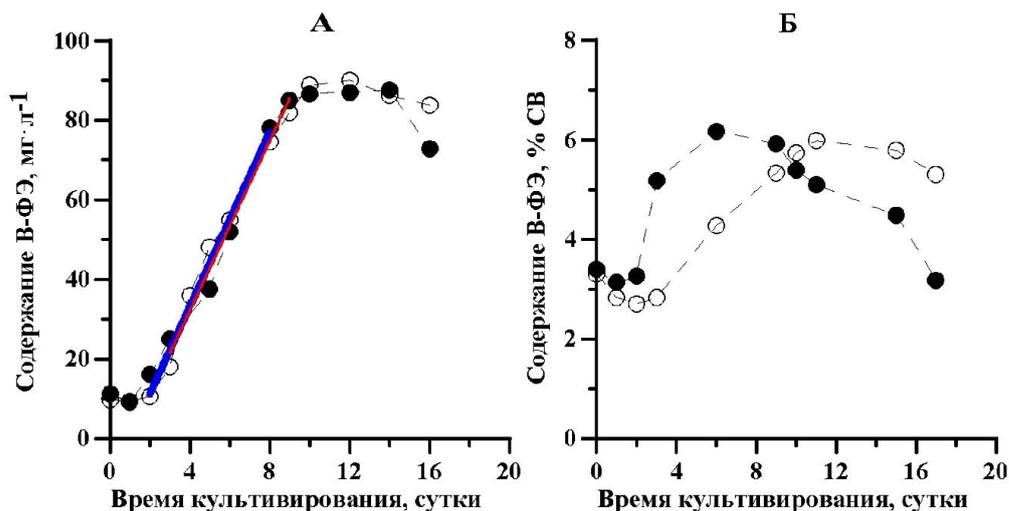


Рис. 2. Содержание В-фикоэритрина (В-ФЭ) в накопительной культуре (А) и в клетках (Б) *Porphyridium purpureum* при выращивании на питательной среде: ● — на основе пресной воды; ○ — на основе морской воды. Сплошные линии — аппроксимация линейной фазы (красная — основой является пресная вода; синяя — морская вода). Значения коэффициентов (максимальной скорости синтеза) приведены в табл. 2

Fig. 2. B-phycoerythrin (B-ФЭ) content in a batch culture (A) and in cells (Б) of *Porphyridium purpureum* when grown on a nutrient medium: ●, based on freshwater; ○, based on seawater. Solid lines are an approximation of the linear phase (red, based on freshwater; blue, based on seawater). The values of the coefficients (maximum synthesis rate) are given in Table 2

Содержание пигмента В-ФЭ в процессе культивирования *P. purpureum* как на пресной, так и на морской воде постепенно увеличивалось (в 9,2–9,5 раза) и достигало максимальных значений в культуре ($88\text{--}90\text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) на 10–14-е сутки от начала эксперимента (рис. 2А). Изменение концентрации В-ФЭ в культуре имело однонаправленный характер для двух вариантов среды, а коэффициент корреляции был равен 0,98. Увеличение содержания В-ФЭ в клетках *P. purpureum* менее выражено: за семь суток оно составило около 2 раз, достигнув в среднем 6 % сухого вещества для каждого из вариантов (рис. 2Б). Уменьшение концентрации В-ФЭ в клетках *P. purpureum* во второй половине накопительного культивирования, зафиксированное в проведённом эксперименте, отмечено многими исследователями и объясняется прямой зависимостью концентрации этого пигмента от содержания азота в среде, которое может снижаться до минимальных значений к конечному этапу выращивания [Fuentes-Grunewald et al., 2015; Li T. et al., 2019]. Данные, характеризующие скорость накопления В-ФЭ в культуре водоросли при её выращивании на пресной и морской водной основе питательной среды, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Продукционные характеристики накопительной культуры *Porphyridium purpureum* по В-фикоэритрину (В-ФЭ) при её выращивании на питательной среде на основе пресной и морской воды

Table 2. В-phycoerythrin (В-ФЭ) production characteristics of *Porphyridium purpureum* batch culture when grown on freshwater-based and seawater-based nutrient media

Водная основа питательной среды	Удельная скорость синтеза (0-е – 3-и сут), сут^{-1}	Максимальная скорость синтеза В-ФЭ, $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{сут}^{-1}$	Средняя скорость синтеза В-ФЭ (2–9-е сут), $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{сут}^{-1}$	Общее накопление В-ФЭ, $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$
Пресная	0,3	12,1	$9,8 \pm 1,75$	$77,9 \pm 4,7$
Морская	0,2	12,3	$10,2 \pm 2,3$	$80,5 \pm 5,4$

Результаты расчётов показали, что максимальная скорость синтеза В-ФЭ в культуре *P. purpureum* как на пресной, так и на морской воде практически одинакова. Средняя скорость синтеза В-ФЭ на линейной стадии и уровень накопления пигмента несколько выше у культуры, выращиваемой на морской воде, однако эти различия незначительны (табл. 2). Несмотря на близкие значения скорости роста культуры (табл. 1), а также наблюдаемой скорости синтеза В-ФЭ у двух вариантов эксперимента, отмечено некоторое временное несоответствие динамики содержания В-ФЭ в биомассе *P. purpureum* (рис. 2Б). Это можно объяснить существенным различием между удельными скоростями синтеза пигмента у двух вариантов в первые трое суток эксперимента. В этот период скорость синтеза пигмента у культуры, выращиваемой на пресной воде с добавлением морской соли, в 1,5 раза выше соответствующих параметров культуры на морской воде. В данном случае накопление В-ФЭ в клетках *P. purpureum* могло идти значительно быстрее не только в первые сутки, но и в следующие несколько дней.

Рост культуры *T. viridis* на среде с использованием как морской, так и пресной воды также сопровождался изменением содержания пигментов в процессе выращивания (рис. 3). Содержание хлорофилла *a* и хлорофилла *b* при культивировании *T. viridis* (с четвёртых по десятые сутки) как на пресной, так и на морской воде постепенно увеличивалось и достигало максимальных значений в культуре к окончанию эксперимента: был отмечен рост в 2,4–3 и 1,7–2,2 раза для хлорофилла *a* и хлорофилла *b* соответственно (рис. 3А, Б). Изменение концентрации этих пигментов в культуре также имело однонаправленный характер для двух вариантов среды, а коэффициент корреляции составлял 0,99. Для суммарных каротиноидов тоже отмечено увеличение концентрации пигментов в культуре, однако эти изменения выражены в меньшей степени, чем изменения содержания хлорофиллов (рис. 3В). При сопоставимой плотности культуры *T. viridis* для двух вариантов концентрация пигментов на протяжении всего периода эксперимента выше в культуре, выращиваемой на морской воде.

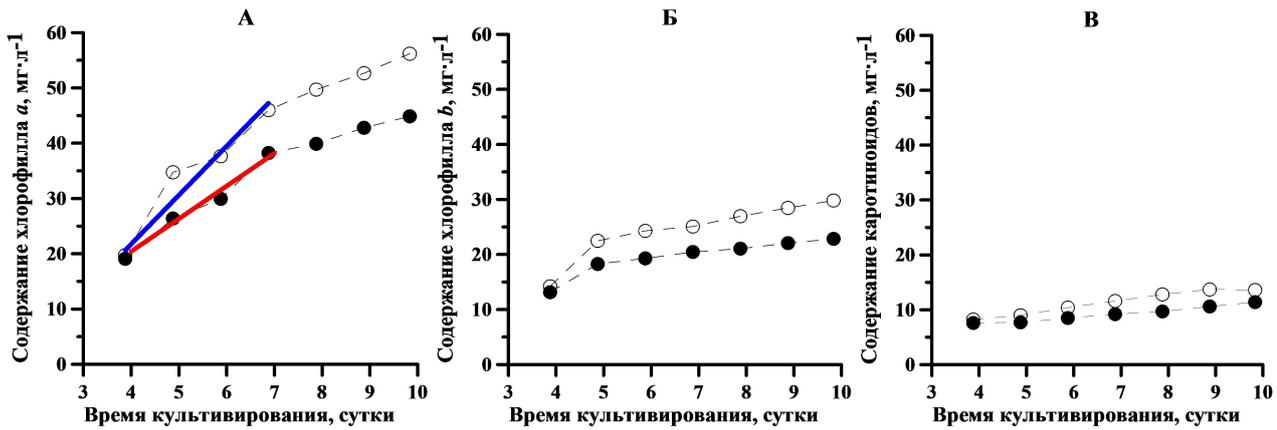


Рис. 3. Содержание хлорофилла *a* (А), хлорофилла *b* (Б) и суммарных каротиноидов (В) в накопительной культуре *Tetraselmis viridis* при выращивании на питательной среде: ● — на основе пресной воды; ○ — на основе морской воды. Сплошные линии — аппроксимация линейной фазы (красная — основой является пресная вода; синяя — морская вода). Значения коэффициентов (максимальной скорости синтеза) приведены в табл. 3

Fig. 3. Content of chlorophyll *a* (A), chlorophyll *b* (Б), and carotenoids (B) in *Tetraselmis viridis* batch culture when grown on a nutrient medium: ●, based on freshwater; ○, based on seawater. Solid lines are an approximation of the linear phase (red, based on freshwater; blue, based on seawater). The values of the coefficients (maximum synthesis rate) are given in Table 3

Данные, характеризующие особенности накопления пигментов в культуре *T. viridis* при выращивании с использованием пресной и морской воды, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Продукционные характеристики накопительной культуры *Tetraselmis viridis* по хлорофиллу *a* и *b* (chl *a* и chl *b*) и суммарным каротиноидам (car) при её выращивании на питательной среде на основе пресной и морской воды

Table 3. Production characteristics of *Tetraselmis viridis* batch culture for chlorophyll *a*, chlorophyll *b* (chl *a* and chl *b*), and total carotenoids (car) when grown on freshwater-based and seawater-based nutrient media

Водная основа питательной среды	Максимальная скорость синтеза пигментов, мг·л ⁻¹ ·сут ⁻¹			Скорость синтеза пигментов на линейной стадии, мг·л ⁻¹ ·сут ⁻¹			Общее накопление пигментов, мг·л ⁻¹		
	chl <i>a</i>	chl <i>b</i>	car	chl <i>a</i>	chl <i>b</i>	car	chl <i>a</i>	chl <i>b</i>	car
Пресная	6,38	—	—	2,16 ± 0,53	0,96 ± 0,11	0,71 ± 0,12	25,77 ± 0,08	9,74 ± 0,62	3,44 ± 0,22
Морская	8,76	—	—	3,41 ± 0,34	1,47 ± 0,29	1,23 ± 0,21	36,46 ± 1,27	15,60 ± 1,47	5,50 ± 0,04

Максимальная и средняя скорости синтеза хлорофилла *a*, а также скорости синтеза хлорофилла *b* и суммарных каротиноидов в культуре *T. viridis* при выращивании на питательной среде с морской водой более чем в 1,5 раза выше, чем на среде с пресной водой. Такие существенные отличия привели к увеличению уровня накопления пигментов в 1,4–1,6 раза у *T. viridis*, выращиваемой на морской воде, по сравнению с культурой на пресной воде. Таким образом, хотя средняя скорость роста *T. viridis* при выращивании на пресной воде существенно не отличалась от скорости роста культуры на морской воде, более высокие скорости синтеза пигментов и их суммарное накопление отмечены у культуры, выращиваемой на морской воде.

ОБСУЖДЕНИЕ

Морские микроводоросли традиционно выращивают на питательных средах, основой которых является морская вода [Fuentes-Grunewald et al., 2015; Kathiresan et al., 2006; Raes et al., 2013; Strizh et al., 2004]. Имеются данные по культивированию некоторых видов морских микроводорослей, при котором в качестве основы питательной среды использована пресная вода [Gargouch et al., 2018; Lelekov et al., 2016]. В частности, описано выращивание морской микроводоросли *Porphyridium marinum* на питательной среде на основе пресной воды [Gargouch et al., 2018]. Наибольшая плотность культуры составила $(4,6 \pm 0,5) \times 10^6$ кл·мл⁻¹, а содержание В-ФЭ в биомассе — 15,9 мг·г⁻¹ в пересчёте на сухое вещество. Максимальное количество В-ФЭ в биомассе (41 мг·г⁻¹) получено на втором этапе — при повышении концентрации NaNO₃ в 2 раза, уменьшении содержания K₂HPO₄ до 0 г·л⁻¹, снижении интенсивности света в 2 раза и увеличении объёма раствора микроэлементов в 1,5 раза. Однако плотность культуры *P. marinum* и её продуктивность, а также количество В-ФЭ в биомассе (при максимальном его содержании) существенно ниже, чем таковые в проведённом эксперименте. Кроме того, использование NaCl потребовало дополнительного внесения Mg и Ca, содержащихся в морской воде, а использование двухэтапного режима культивирования существенно увеличило временной период выращивания культуры [Gargouch et al., 2018].

В нашем эксперименте при выращивании микроводорослей на средах с пресной водой выход биомассы *P. purpureum* и *T. viridis* составил более 3 г сухого вещества с 1 л культуры, а средняя скорость роста — 0,3–0,4 г·л⁻¹·сут⁻¹. Это сопоставимо с данными, полученными ранее при культивировании *P. purpureum* и *Dunaliella salina* (Dunal) Teodoresco, 1905 на морской воде, где средняя продуктивность культур на линейном участке роста составила 0,37 и 0,2 г·л⁻¹·сут⁻¹ соответственно [Гудвилевич, Боровков, 2017; Gudvilovich et al., 2021], а также с результатами, представленными в работе [Li T. et al., 2019]. Данные, полученные в проведённом эксперименте, также сопоставимы с продукционными параметрами *T. viridis* при её выращивании на искусственной морской воде с концентрацией NaCl 29 г·л⁻¹: максимальная плотность культуры к восьмым суткам составляла около 12×10^6 кл·мл⁻¹ [Strizh et al., 2004]. Кроме того, ранее была показана возможность культивирования диатомовой водоросли *Phaeodactylum tricorutum* Bohlin, 1897 на питательной среде на основе пресной воды с добавлением морской соли [Lelekov et al., 2016]. При этом средняя скорость роста культуры составила 0,3 г·л⁻¹·сут⁻¹, что также сопоставимо с результатами, полученными в нашем эксперименте. Следует отметить, что культуры *P. purpureum* и *T. viridis* выращивали без дополнительного внесения углерода; был использован апробированный ранее технологический приём распыления атмосферного воздуха [Гудвилевич, Боровков, 2017; Gudvilovich et al., 2021].

Несмотря на то, что скорость роста *T. viridis* при выращивании на пресной воде существенно не отличалась от скорости роста культуры на морской воде, у этого варианта отмечены более низкие скорости синтеза пигментов и их суммарное накопление, что может свидетельствовать о некоторой неоптимальности условий культивирования. Вероятным фактором, оказавшим негативное влияние на процессы синтеза пигментов *T. viridis* в этом случае, мог быть повышенный уровень pH. На протяжении всего периода выращивания pH у культуры на пресной воде был выше в среднем на 5 %, чем у культуры на морской. Начиная с пятых суток выращивания *T. viridis* на пресной воде, когда значения pH были близки к 10, снижение скорости синтеза и продукции пигментов составило до 30–40 % по сравнению с таковыми культуры, выращенной на морской воде. Известно, что pH среды на протяжении накопительного культивирования микроводорослей повышается, а его уровень является одним из наиболее критичных условий среды при их выращивании, поскольку определяет растворимость и доступность CO₂ и питательных веществ, а также оказывает значительное влияние на метаболизм микроводорослей [Chen, Durbin, 1994; Kumar, Saramma, 2018; López-Elías et al., 2008; Qiu et al., 2017].

В частности, при изучении влияния pH на рост и биохимический состав *Dunaliella bardawil* и *Chlorella ellipsoidea* показано, что изменение pH смещает и направленность биосинтеза в клетках микроводорослей, таким образом влияя на биохимический состав получаемой биомассы [Khalil et al., 2010]. Обе микроводоросли росли в широком диапазоне pH (4–9 для *D. bardawil* и 4–10 для *C. ellipsoidea*), однако продукция биомассы у *D. bardawil* достигала максимальных значений при pH 7,5, а у *C. ellipsoidea* — при pH 9 [Khalil et al., 2010]. Самые высокие значения накопления хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов у двух видов зафиксированы при pH 7,5; по мере увеличения pH (смещения в щелочную сторону) содержание этих трёх пигментов существенно уменьшалось. Следует отметить, что значительное снижение содержания всех пигментов как у *D. bardawil*, так и у *C. ellipsoidea* (более чем в 2 раза и на 30 % соответственно) зарегистрировано при увеличении pH от 9 до 11, что коррелирует с полученными данными для *T. viridis* в проведённом эксперименте.

Для большинства видов, используемых в аквакультуре, требуется pH от 6 до 9, тем не менее разные виды микроводорослей могут иметь собственные оптимальные диапазоны pH для производства биомассы, причём часто узкие и специфичные для каждого штамма [Khalil et al., 2010; Qiu et al., 2017]. Сравнительная оценка продукционных характеристик накопительных культур *P. purpureum* и *T. viridis* не выявила существенных различий по скорости роста при выращивании на питательных средах на основе пресной и морской воды. Кроме того, в проведённом эксперименте при использовании пресной воды в качестве основы питательной среды у *P. purpureum* не установлено значимых различий по максимальной и средней скорости синтеза В-ФЭ, а также по уровню накопления пигмента в культуре. Все эти характеристики в целом соответствуют аналогичным параметрам биосинтеза В-ФЭ у культуры, выращиваемой на морской воде, как в ранее проведённых экспериментах, так и в описанном выше [Gudvilovich et al., 2021; Li T. et al., 2019].

Все вышеизложенные данные по опыту выращивания таких видов, как *P. purpureum* и *T. viridis*, а также *Ph. tricornutum* [Lelekov et al., 2016], принадлежащих к различным систематическим группам, позволяют считать перспективными дальнейшие исследования культивирования и других морских микроводорослей на питательных средах с использованием в качестве основы пресной воды с добавлением морской соли.

Выводы. Показано, что культуры микроводорослей *Porphyridium purpureum* и *Tetraselmis viridis* можно успешно выращивать без использования природной морской воды. При этом водная основа питательной среды не оказывает существенного влияния на продукционные показатели двух видов, а в случае *P. purpureum* — и на такие характеристики, как скорость синтеза В-фикоэритрина и содержание его в культуре и биомассе. При выращивании *T. viridis* следует рассмотреть возможность контроля pH и его корректировки до оптимального уровня. Применение пресной воды вместо природной морской и отсутствие необходимости дополнительного внесения минеральных солей в случае приготовления искусственной морской воды, а также углекислоты позволяют поддерживать скорость роста культур морских микроводорослей на высоком уровне и существенно снижать трудозатраты и себестоимость получаемой биомассы; кроме того, это расширяет географические перспективы их массового культивирования.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по темам «Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов» (№ гос. регистрации 124022400152-1) и «Комплексное исследование экологических и физиолого-биохимических особенностей микроводорослей различных таксономических групп при адаптации к меняющимся условиям среды» (№ гос. регистрации 124021300070-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Боровков А. Б., Геворгиз Р. Г. Продуктивность микроводорослей *Spirulina platensis* и *Tetraselmis viridis* при использовании различных методов культивирования // *Экология моря*. 2005. Вып. 70. С. 9–13. [Borovkov A. B., Gevorgiz R. G. Production of *Spirulina platensis* and *Tetraselmis viridis* by different methods of cultivation. *Ekologiya morya*, 2005, iss. 70, pp. 9–13. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/4698>
2. Гудвилевич И. Н., Боровков А. Б. Продуктивность микроводоросли *Dunaliella salina* Теод. при различных способах внесения углекислого газа в культуру // *Морской биологический журнал*. 2017. Т. 2, № 2. С. 34–40. [Gudvilovich I. N., Borovkov A. B. *Dunaliella salina* Teod. microalgae productivity, when grown under the different addition of carbon dioxide in culture. *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 34–40. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.2.03>
3. Методы физиолого-биохимического исследования водорослей в гидробиологической практике. Киев : Наукова думка, 1975. 247 с. [Metody fiziologo-biokhimicheskogo issledovaniya vodoroslei v gidrobiologicheskoi praktike. Kyiv : Naukova dumka, 1975, 247 p. (in Russ.)]
4. Минюк Г. С., Дробецкая И. В., Чубчикова И. Н., Терентьева Н. В. Одноклеточные водоросли как возобновляемый биологический ресурс: обзор // *Морской экологический журнал*. 2008. Т. 7, № 2. С. 5–23. [Minyuk G. S., Drobetskaya I. V., Chubchikova I. N., Terentyeva N. V. Unicellular algae as renewable biological resource: A review. *Morskoy ekologicheskij zhurnal*, 2008, vol. 7, no. 2, pp. 5–23. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/956>
5. Стадничук И. Н. *Фикобилипротеины*. Москва : ВИНТИ, 1990. 193 с. (Итоги науки и техники. Серия: Биологическая химия ; т. 40). [Stadnichuk I. N. *Fikobiliproteiny*. Moscow : VINITI, 1990, 193 p. (Itogi nauki i tekhniki. Seriya: Biologicheskaya khimiya ; vol. 40). (in Russ.)]
6. Тренкеншу Р. П., Терсков И. А., Сидько Ф. Я. Плотные культуры морских микроводорослей // *Известия Сибирского отделения Академии наук СССР*. 1981. № 5. С. 75–82. (Серия биологических наук ; вып. 1). [Trenkenshu R. P., Terskov I. A., Sidko F. Ya. Plotnye kul'tury morskikh mikrovdoroslei. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk SSSR*, 1981, no. 5, pp. 75–82. (Seriya biologicheskikh nauk ; iss. 1). (in Russ.)]
7. Упитис В. В., Пакалне Д. С., Шульце И. Ф. Оптимизация минерального питания красной морской водоросли *Porphyridium cruentum* // *Известия Академии наук Латвийской ССР*. 1989. Т. 505, № 8. С. 95–104. [Upitis V. V., Pakalne D. S., Shultse I. F. Optimizatsiya mineral'nogo pitaniya krasnoi morskoi vodorosli *Porphyridium cruentum*. *Izvestiya Akademii nauk Latvii skoi SSR*, 1989, vol. 505, no. 8, pp. 95–104. (in Russ.)]
8. Barka A., Blecker C. Microalgae as a potential source of single-cell proteins. A review. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 427–436. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.13132>
9. Borovkov A. B., Gudvilovich I. N., Lelekov A. S., Avsiyan A. L. Effect of specific irradiance on productivity and pigment and protein production of *Porphyridium purpureum* (Rhodophyta) semi-continuous culture. *Bioresource Technology*, 2023, vol. 374, art. no. 128771 (11 p.). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128771>
10. Borowitzka M. A. High-value products from microalgae – their development and commercialization. *Journal of Applied Phycology*, 2013, vol. 25, iss. 3, pp. 743–756. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-9983-9>
11. Chen C. Y., Durbin E. G. Effects of pH on the growth and carbon uptake of marine phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, vol. 109, pp. 83–94. <https://doi.org/10.3354/meps109083>
12. Chauton M. S., Reitan K. I., Norsker N. H., Tveterås R., Kleivdal H. T. A techno-economic analysis of industrial production of marine microalgae as a source of EPA and DHA-rich raw material for aquafeed: Research challenges and possibilities. *Aquaculture*, 2015, vol. 436, pp. 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.10.038>
13. Fuentes-Grunewald C., Bayliss C., Zanain M., Pooley C., Scolamacchia M., Silkina A. Evaluation

- of batch and semi-continuous culture of *Porphyridium purpureum* in a photobioreactor in high latitudes using Fourier transform infrared spectroscopy for monitoring biomass composition and metabolites production. *Biore-source Technology*, 2015, vol. 189, pp. 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.042>
14. Gaignard C., Gargouch N., Dubessay P., Delattre C., Pierre G., Laroche C., Fendri I., Abdelkafi S., Michaud P. New horizons in culture and valorization of red microalgae. *Biotechnology Advances*, 2019, vol. 37, iss. 1, pp. 193–222. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.11.014>
15. Gargouch N., Karkouch I., Elleuch J., Elkahoui S., Michaud P., Abdelkafi S., Laroche C., Fendri I. Enhanced B-phycoerythrin production by the red microalga *Porphyridium marinum*: A powerful agent in industrial applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, vol. 120, pt B, pp. 2106–2114. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.037>
16. Geada P., Moreira C., Silva M., Nunes R., Madureira L., Rocha C. M. R., Pereira R. N., Vicente A. A., Teixeira J. A. Algal proteins: Production strategies and nutritional and functional properties. *Biore-source Technology*, 2021, vol. 332, art. no. 125125 (14 p.). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125125>
17. Gudvilovich I. N., Lelekov A. S., Mal'tsev E. I., Kulikovskii M. S., Borovkov A. B. Growth of *Porphyridium purpureum* (Porphyridiales, Rhodophyta) and production of B-phycoerythrin under varying illumination. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2021, vol. 68, iss. 1, pp. 188–196. <https://doi.org/10.1134/S1021443720060059>
18. Kathiresan S., Sarada R., Bhattacharya S., Ravishankar A. Culture media optimization for growth and phycoerythrin production from *Porphyridium purpureum*. *Biotechnology and Bioengineering*, 2006, vol. 96, iss. 3, pp. 456–463. <https://doi.org/10.1002/bit.21138>
19. Khalil Z. I., Asker M. M. S., El-Sayed S., Kobbia I. A. Effect of pH on growth and biochemical responses of *Dunaliella bardawil* and *Chlorella ellipsoidea*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2010, vol. 26, iss. 7, pp. 1225–1231. <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0292-z>
20. Kumar S. S., Saramma A. V. Effect of salinity and pH ranges on the growth and biochemical composition of marine microalga *Nannochloropsis salina*. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 2018, vol. 11, no. 4, pp. 651–660. <https://doi.org/10.30954/0974-1712.08.2018.6>
21. Lelekov A. S., Gevorgiz R. G., Zhondareva Y. D. Production characteristics of *Phaeodactylum tri-cornutum* Bohlin grown on medium with artificial sea water. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2016, vol. 52, iss. 3, pp. 331–335. <https://doi.org/10.1134/S0003683816030091>
22. Li S., Ji L., Shi Q., Wu H., Fan J. Advances in the production of bioactive substances from marine unicellular microalgae *Porphyridium* spp. *Biore-source Technology*, 2019, vol. 292, art. no. 122048 (16 p.). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122048>
23. Li T., Xu J., Wu H., Jiang P., Chen Z., Xiang W. Growth and biochemical composition of *Porphyridium purpureum* SCS-02 under different nitrogen concentrations. *Marine Drugs*, 2019, vol. 17, iss. 2, art. no. 124 (16 p.). <https://doi.org/10.3390/md17020124>
24. López-Elías J. A., Enriquez-Ocana F., Pablos-Mitre M. N., Huerta-Aldaz N., Leal S., Miranda-Baeza A., Nieves-Soto M., Vásquez-Salgado I. Growth and biomass production of *Chaetoceros muelleri* in mass outdoor cultures: Effect of the hour of the inoculation, size of the inoculum and culture medium. *Revista de Investigaciones Marinas*, 2008, vol. 29, no. 2, pp. 171–177.
25. Ma M., Hu Q. Microalgae as feed sources and feed additives for sustainable aquaculture: Prospects and challenges. *Reviews in Aquaculture*, 2024, vol. 16, iss. 2, pp. 818–835. <https://doi.org/10.1111/raq.12869>
26. Manirafasha E., Ndikubwimana T., Zeng X., Lu Y., Jing K. Phycobiliprotein: Potential microalgae derived pharmaceutical and biological reagent. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, vol. 109, pp. 282–296. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2016.01.025>
27. Qiu R., Gao S., Lopez P. A., Ogden K. L. Effects of pH on cell growth, lipid production and CO₂ addition of microalgae *Chlorella sorokiniana*. *Algal Research*, 2017, vol. 28, pp. 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.11.004>

28. Raes E. J., Isdepsky A., Muylaert K., Borowitzka M. A., Moheimani N. R. Comparison of growth of *Tetraselmis* in a tubular photobioreactor (Biocoil) and a raceway pond. *Journal of Applied Phycology*, 2013, vol. 26, iss. 1, pp. 247–255. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0077-5>
29. Strizh I. G., Popova L. G., Balnokin Yu. V. Physiological aspects of adaptation of the marine microalga *Tetraselmis (Platymonas) viridis* to various medium salinity. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2004, vol. 51, iss. 2, pp. 176–182. <https://doi.org/10.1023/B:RUPP.0000019210.59579.6b>
30. Tredici M. R., Biondi N., Ponis E., Rodolfi L., Chini Zittelli G. Advances in microalgal culture for aquaculture feed and other uses. In: *New Technologies in Aquaculture: Improving Production Efficiency, Quality and Environmental Management* / G. Burnell, G. Allan (Eds). Cambridge : Woodhead Publishing, 2009, pp. 610–676. <https://doi.org/10.1533/9781845696474.3.610>
31. Wellburn A. R. The spectral determination of chlorophylls *a* and *b*, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology*, 1994, vol. 144, iss. 3, pp. 307–313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)

GROWTH OF CULTURES OF MARINE MICROALGAE *PORPHYRIDIUM PURPUREUM* AND *TETRASELMIS VIRIDIS* ON MODIFIED NUTRIENT MEDIA

A. Borovkov, I. Gudvilovich, and Ya. Zhondareva

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: gudirina2008@yandex.ru

Marine species of microalgae are capable of synthesizing a wide range of biologically active substances and are currently considered as the most promising sources of such compounds. Nutrient media for cultivation of microalgae are mostly prepared based on natural or artificial seawater. Modifying the nutrient medium for cultivation of marine microalgae by replacing its natural seawater base with freshwater one seems promising. Unialgal cultures of the marine microalgae *Porphyridium purpureum* and *Tetraselmis viridis* were grown under conditions of replacing sterile seawater with freshwater, with sea salt added up to a concentration of 18 and 28 g·L⁻¹ for *T. viridis* and *P. purpureum*, respectively. Based on experimental data obtained, production characteristics of *P. purpureum* and *T. viridis* batch cultures were determined when grown on freshwater-based and seawater-based nutrient media. In general, a change in the density of *P. purpureum* and *T. viridis* cultures during batch cultivation both on freshwater and seawater had a unidirectional character (correlation coefficients in both cases were 0.99), and the water base of the nutrient medium had no significant effect on their growth rate. As shown experimentally, the biomass yield of *P. purpureum* and *T. viridis* using freshwater as a base of the nutrient medium was 3.2–3.4 g of dry weight per 1 L of the culture and generally corresponded to the similar parameter of cultures grown using seawater. Despite the fact that the mean growth rate of *T. viridis* cultured in freshwater did not differ significantly from the growth rate of the microalga cultured in seawater, higher mean rates of pigment synthesis and their total accumulation were observed in the culture grown in seawater. In the case of *P. purpureum*, the water base of the nutrient medium had no noticeable effect on B-phycoerythrin synthesis rate and content of this pigment in the culture and biomass of the microalga. The obtained results show that cultures of marine microalgae *P. purpureum* and *T. viridis* can be successfully grown without using natural seawater. It significantly reduces labor costs and biomass production costs; also, it expands geographical perspectives for their mass cultivation.

Keywords: marine microalgae, *Porphyridium purpureum*, *Tetraselmis viridis*, freshwater, productivity, biomass, pigments

UDC 597.317:57.082.132

**COLOR PATTERNS OF THE THORNBACK SKATE, *RAJA CLAVATA* LINNAEUS, 1758,
FROM THE SEA OF MARMARA
SUGGESTING POSSIBLE MISIDENTIFICATIONS
OF SEVERAL RAJIDS IN THE REGION**

© 2024 **H. Kabasakal^{1,2}, U. Uzer³, and F. S. Karakulak³**

¹Istanbul University, Institute of Science, Fisheries Technology and Management Program, Istanbul, Türkiye

²WWF Türkiye, Istanbul, Türkiye

³Istanbul University, Faculty of Aquatic Sciences, Department of Fisheries Technology and Management,
Istanbul, Türkiye

E-mail: kabasakal.hakan@gmail.com

Received by the Editor 11.03.2024; after reviewing 25.07.2024;
accepted for publication 27.08.2024; published online 09.09.2024.

Trawl surveys conducted in shelf waters of the northeastern Sea of Marmara revealed for the first time the occurrence of atypically colored thornback skates, *Raja clavata* Linnaeus, 1758 (Rajiformes: Rajidae), in the region. Since atypical coloring may lead to confusion and misidentification of *R. clavata*, an integrated approach of conventional alpha taxonomy and genetic studies is needed to resolve the taxonomic status of *Raja* species occurring in the Sea of Marmara. Accurate taxonomic resolution is the first step to properly differentiate the populations of the aforementioned species *prior* to performing further study and effective conservation.

Keywords: Rajiformes, polychromatism, aberrations, taxonomy, description

The skates (Chondrichthyes: Rajiformes) currently comprise nearly 304 species representing four families: Arhynchobatidae, or softnose skates; Rajidae, or hardnose skates; Anacanthobatidae, or legskates; and Gurgesiellidae, or pygmy skates [Weigmann, Reinecke, 2023]. Members of the family Rajidae which includes approximately 160 validly described species from 16 genera vary in size from small to very large (total length, TL, ranges 33 to 264 cm as adults) and occur in mainly oceans and seas, from shallow waters down to depth of 4,156 m [Last et al., 2016; Weigmann, Reinecke, 2023]. In the Mediterranean Sea, the family is represented by 4 genera (*Dipturus*, *Leucoraja*, *Raja*, and *Rostrolaja*) and 16 species, one of which is the thornback skate, *Raja clavata* Linnaeus, 1758 [Barone et al., 2022]. The thornback skate is one of the first described and best-known members of the family Rajidae which is widespread in the eastern Atlantic and southwestern Indian Ocean, from Iceland to Madagascar, including the Mediterranean Sea, Sea of Marmara, and Black Sea [Last et al., 2016].

The thornback skate is distinguished from other skates in its range by the presence of strong thorny tubercles (bucklers) on both dorsal and ventral surfaces of large specimens and lateral rows of strong hooked thorns along the edge of the tail having dark and light crossbars even in large individuals [Barone et al., 2022; Last et al., 2016]. However, the coloring pattern on the dorsal surface can be remarkably variable which does not correspond to the generally accepted description

of *R. clavata* leading to misidentifications with several other Mediterranean species, such as the spotted skate, *Raja montagui* Fowler, 1910, and the speckled skate, *Raja polystigma* Regan, 1923 [Capapé et al., 2018; Chatzisprou et al., 2019; Mnasri et al., 2009]. Discrimination of these species which are morphologically very similar but have different life cycles [Ebert, Stehmann, 2013; Last et al., 2016] is due to an unavoidable and unmet need for accurate fisheries management and conservation efforts.

In the present article, the authors report on the occurrence of polychromatic specimens of *R. clavata* in the Sea of Marmara and possible implications of unusual color patterns of the thornback skate on accurate identification.

MATERIAL AND METHODS

During recent scientific bottom trawling surveys in the Sea of Marmara (Fig. 1), several thornback skates with atypical dorsal color patterns (Fig. 2) were caught. On 19 February, 2024, a male specimen (hereinafter referred to as RC1) was captured on a muddy-sandy bottom at depths ranging 85.2 to 87.6 m (trawl positions: start, 40°86.343'N, 29°00.997'E; end, 40°85.515'N, 29°04.568'E). Two more males (hereinafter referred to as RC2 and RC3, respectively) were caught on 22 February, 2024, on a similar bottom type at depths ranging 35 to 50 m (trawl positions: start, 40°95.250'N, 28°98.405'E; end, 40°92.498'N, 28°97.550'E). Morphometric measurements of the captured thornback skates presented as percentages of total length (TL) or disc width (DW) of the mean \pm standard deviation (SD) (Table 1) were recorded following the procedure outlined by Hubbs and Ishiyama [1968]: either with a measuring type for distances ≥ 10 cm to the nearest 0.5 mm or with a Vernier caliper for distances < 10 cm to the nearest 0.05 mm. TL is the distance from the tip of the snout to the tip of the tail, and DW is the distance between the outermost tips of the pectoral fins [Barone et al., 2022]. The angle of the snout in front of the level of the spiracles was measured according to Ebert and Stehmann [2013]. Maturity stages of the examined specimens were determined in accordance with MEDITS (the international bottom trawl survey in the Mediterranean) maturity scale for oviparous elasmobranchs [Atlas, 2019]. Studied skates are preserved in a deep-freezer (-20 °C) at the Istanbul University, Faculty of Aquatic Sciences, Department of Fisheries Technology and Management laboratories without providing catalogue numbers. Raw data, photographs, and frozen specimens are available upon request for further examination.

All applicable international, national, and/or institutional guidelines for the care and use of animals were followed. The thornback skates were examined within the scope of the ongoing Stock Identification of Demersal Fishes in the Eastern Sea of Marmara project; ethics committee approval granted by the Local Ethics Committee of Istanbul University Animal Experiments covers the present study as well (project ID: 2714; approval granted on 17.04.2015). Before dissection, the thornback skates were kept in well-aerated seawater tanks. Then, each thornback skate was anesthetized by keeping it in seawater with a sufficient dose of MS-222 for at least an hour, and if it did not show signs of life, the specimen was measured and dissected.

RESULTS

The following morphometric and morphological characteristics were registered in the examined specimens. The angle of the snout in front of the level of the spiracles was 114° (RC1), 112° (RC2), and 116° (RC3). Tail length ranged 52.42 to 55.68% of TL (mean was 53.74% of TL). In the specimens studied, mean interorbital length was 2.34 ± 0.28 times the prenarial length (range of 2.03 to 2.72); mean eye length was 1.25 ± 0.25 times the prenarial length (range of 0.98 to 1.59). Measured morphometric data are provided in Table 1. Buckler thorns were present only on the dorsal surface of RC1 (Fig. 3); however, the dorsal surfaces of all three specimens were entirely prickly and not smooth (Fig. 3). The number of thorns along the midline from nape to the origin of first dorsal

fin and interdorsal thorns were counted as 34/2, 32/1, and 32/2, in specimens RC1, RC2, and RC3, respectively. Widely spaced minute lateral buckler thorns were also observed along the tail, but these were not as prominent as those on large juveniles and adults. The dorsal coloring of the examined specimens was yellowish brown with numerous dark spots of various size, denser in the central parts of the disc and widely spaced at the margins; there were dark and light crossbars on the tail (Fig. 2). Dark crossbars were also observed on the dorsal surface of tails of all three specimens (Fig. 3). On the dorsal surface of RC1, two prominent dark colored eye-spots surrounded by cream-colored small spots were present along the line connecting the tips of the disc, and the eye-spots were closer to the midline extending from the snout to the tip of the tail (Fig. 2). Two small but prominent cream-colored spots irregularly surrounded by small dark spots were also present on the dorsal surfaces of specimens RC2 and RC3, which were also in line with the axis connecting the tips of the disc and were closer to the snout-tail tip axis (Fig. 2). The ventral surface was whitish.

The claspers of three specimens were short not reaching the tips of the pelvic fins, not visible from the dorsal view (Fig. 2), and very soft. Therefore, they were considered immature or at stage 1.

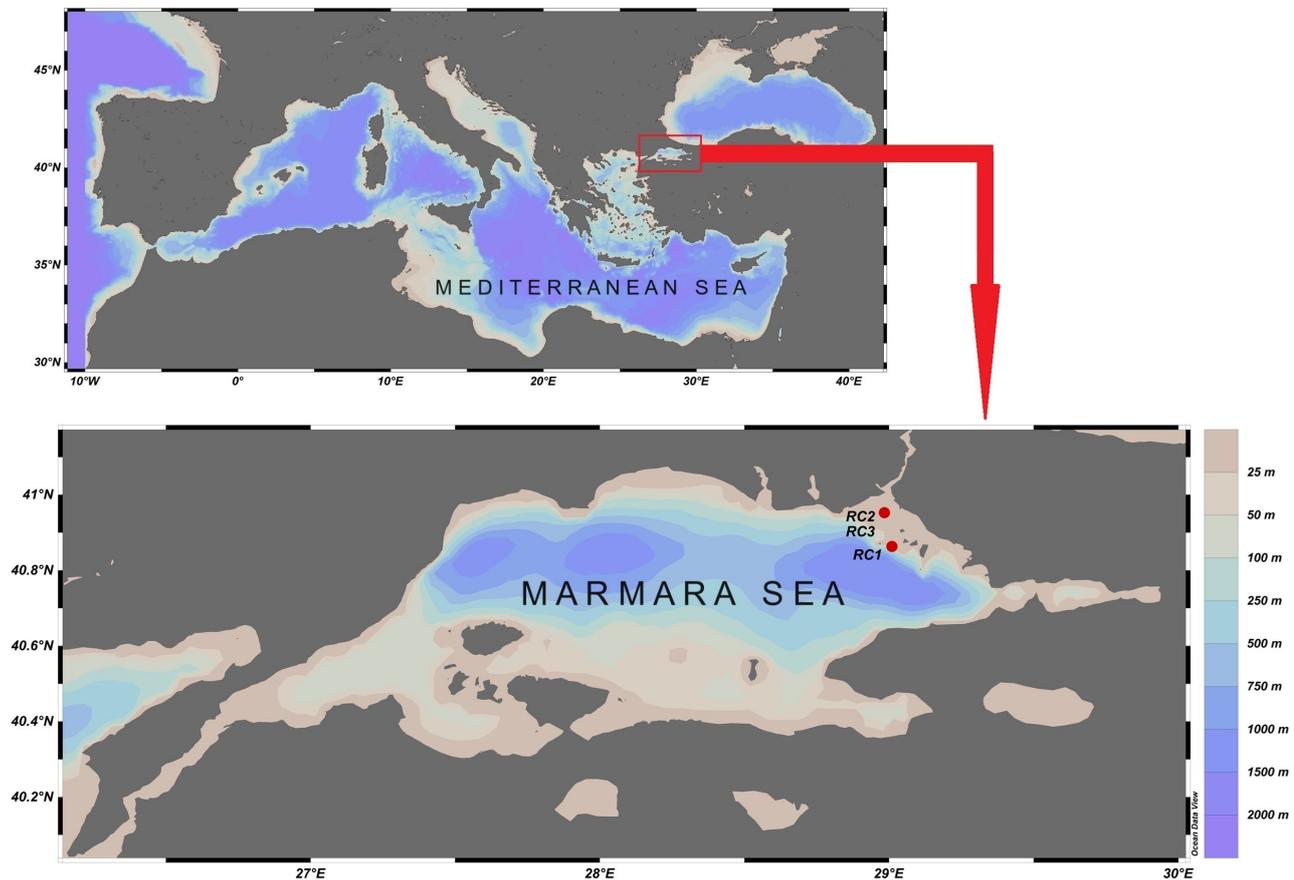


Fig. 1. Small map on the top panel depicts the locality (red rectangle) of the Sea of Marmara in the Mediterranean ecosystem. On the lower panel, approximate localities (red circles) of captures of the examined thornback skates are depicted

Рис. 1. Маленькая карта на верхней панели показывает местоположение (красный прямоугольник) Мраморного моря в средиземноморской экосистеме. На нижней панели отмечены примерные места (красные круги) поимки исследованных морских лисиц

Table 1. Morphometric measurements and meristic counts of the examined *Raja clavata* specimens (N/A denotes missing measurement due to dorsal fin and tail tip aberrations)**Таблица 1.** Морфометрические измерения и меристические подсчёты исследованных экземпляров *Raja clavata* (N/A — отсутствие измерения из-за aberrаций спинного плавника и кончика хвоста)

Measurement, mm	RC1, ♂	RC2, ♂	RC3, ♂	RC1	RC2	RC3	% of TL of the mean	±SD of the mean % of TL
	TL 480 mm	TL 308.9 mm	TL 307.1 mm	DW 310 mm	DW 190 mm	DW 210 mm		
	% of TL			% of DW				
Total length	100	100	100	154.84	162.58	146.24	100	0
Disc width	64.58	61.51	68.38	100.00	100.00	100.00	64.82	2.81
Disc length	47.29	48.24	54.05	73.23	78.42	79.05	49.86	2.99
Trunk length	42.08	43.38	46.08	65.16	70.53	67.38	43.85	1.66
Precaudal length	93.75	51.47	N/A	145.16	83.68	N/A	48.41	38.33
Tail length	53.33	55.68	52.43	82.58	90.53	76.67	53.81	1.37
Predorsal-tail length	33.54	3.12	N/A	51.94	5.08	N/A	12.22	15.13
D1 origin to tail tip	19.78	16.75	N/A	30.63	27.24	N/A	12.18	8.7
D1 basal length	5.39	5.55	5.6	8.34	9.03	8.19	5.51	0.09
D1 height	3.31	2.87	3.45	5.13	4.66	5.05	3.21	0.25
D2 basal length	5.88	5.28	3.94	9.1	8.58	5.76	5.03	0.81
D2 height	2.51	2.95	1.79	3.89	4.79	2.62	2.42	0.48
Distance D1/D2	2.46	2.99	2.74	3.81	4.87	4.00	2.73	0.22
Postdorsal length	1.39	3.82	N/A	2.15	6.21	N/A	1.74	1.58
Head length	26.75	28.63	29.18	41.42	46.55	42.67	28.19	1.04
Preocular length	12.41	12.79	14.65	19.21	20.79	21.43	13.28	0.98
Preoral length	10.61	12.35	13.90	16.44	20.08	20.33	12.29	1.34
Prenarial length	9.41	10.84	11.41	14.56	17.63	16.69	10.55	0.84
Internarial length	7.45	6.38	6.51	11.53	10.37	9.52	6.78	0.48
Nasal-curtain length	4.74	4.13	4.33	7.34	6.71	6.33	4.4	0.25
Nasal-curtain width	3.50	3.93	5.06	5.42	6.39	7.40	4.17	0.66
Mouth width	9.56	10.13	10.86	14.81	16.47	15.88	10.18	0.53
Eyeball length	2.91	4.06	4.25	4.5	6.61	6.21	3.74	0.59
Interorbital width	4.63	3.98	5.03	7.16	6.47	7.36	4.55	0.43
Spiracle length	3.43	2.56	2.96	5.31	4.16	4.33	2.98	0.36
Interspiracular width	6.05	6.98	7.57	9.37	11.34	11.07	6.87	0.62
Orbit + spiracle	5.02	5.97	5.88	7.77	9.71	8.6	5.62	0.43
1 st gill slit length	1.55	1.96	1.81	2.4	3.18	2.64	1.77	0.17
3 rd gill slit length	1.75	1.78	1.99	2.71	2.89	2.90	1.84	0.1
5 th gill slit length	1.72	1.89	1.82	2.66	3.08	2.67	1.81	0.07
1 st interbranchial width	15.73	14.96	15.65	24.35	24.32	22.88	15.44	0.35
3 rd interbranchial width	13.10	12.72	13.04	20.29	20.68	19.07	12.96	0.17
5 th interbranchial width	8.41	9.57	9.65	13.02	15.55	14.12	9.21	0.57
Eye-spot length	4.40	1.93	2.31	6.81	3.13	3.38	2.88	1.08
Eye-spot width	4.81	2.12	1.99	7.45	3.45	2.9	2.97	1.3
Between eye-spots	18.43	12.43	14.1	28.53	20.21	20.62	14.99	2.53
Clasper length	5.21	3.56	5.42	8.06	5.79	7.93	4.73	0.83
Clasper width	1.09	0.86	1.12	1.69	1.39	1.64	1.03	0.12
Weight, g	550	139.5	153.9					
Number of thorns in midline	34	32	32					
Number of interdorsal thorns	2	1	2					
Number of orbital thorns	2	2	3					

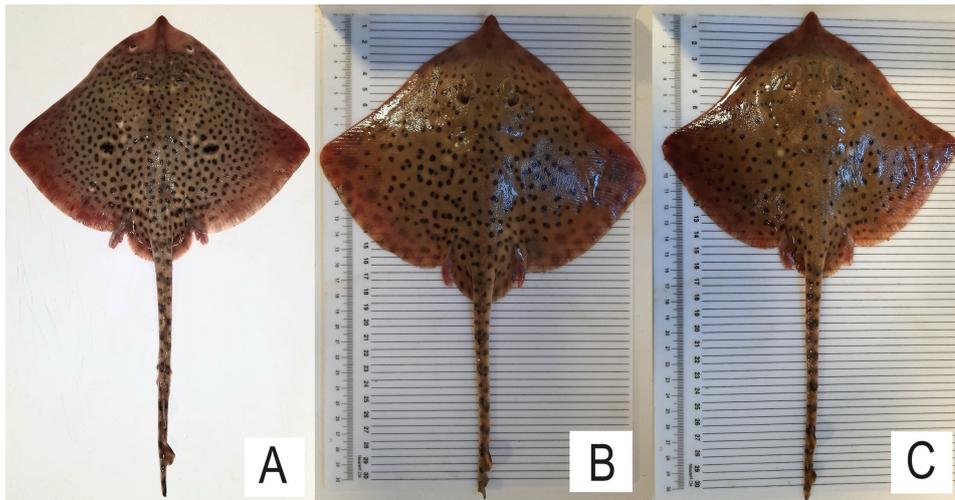


Fig. 2. Examined specimens of *Raja clavata*; A, specimen RC1 (TL 480 mm); B, RC2 (TL 308.9 mm); C, RC3 (TL 307.1 mm)

Рис. 2. Исследованные экземпляры *Raja clavata*; А — экземпляр RC1 (TL 480 мм); В — RC2 (TL 308,9 мм); С — RC3 (TL 307,1 мм)

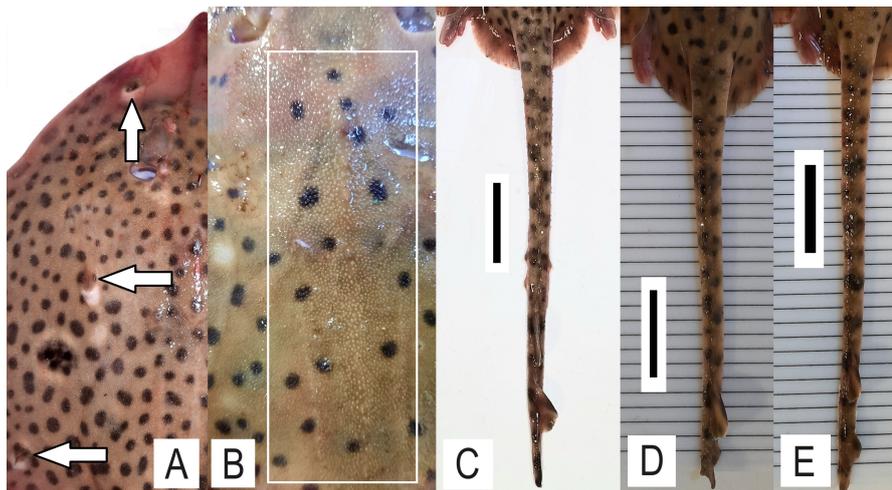


Fig. 3. Squamation and color patterns observed on the examined specimens of *Raja clavata*. A, arrows depict the buckler thorns of specimen RC1; B, rectangle depicts the prickles on dorsal disc of RC2; C, D, and E, dark crossbars on dorsal tails of RC1, RC2, and RC3, respectively. Scale bars are 30 mm

Рис. 3. Чешуйчатость и цветовые узоры исследованных экземпляров *Raja clavata*. А — стрелками обозначены шипы щитка экземпляра RC1; В — прямоугольником выделены шипы на дорсальном диске RC2; С, D и E — тёмные перекладки на дорсальных хвостах RC1, RC2 и RC3 соответственно. Масштабные линейки — 30 мм

DISCUSSION

Ebert and Stehmann [2013] define *R. clavata* as a “chameleon” among its congeners, mainly due to its dorsal ground color and remarkable variety of patterns. The ground color of this species ranges from brown to grey in light to dark shades, variegated or marbled with dark and light spots or blotches, and it may show a pattern, such as eye-spots; however, single-colored thornback skates have also been recorded [Ebert, Stehmann, 2013; Last et al., 2016]. Based on dorsal coloration and patterns, Mnasri et al. [2009] defined 7 types of polychromatism in *R. clavata* specimens caught off the Tunisian coast (the central Mediterranean Sea). Furthermore, 5 out of these 7 types of polychromatism have also been described in thornback skates captured in the eastern Ionian Sea [Chatzisprou et al., 2019].

Recently, Capapé *et al.* [2018] reported one of the atypical coloring patterns (type 7, vermiculated, *sensu* [Mnasri *et al.*, 2009]) on the dorsal surface of the thornback skate captured off Izmir coast (the eastern Aegean Sea). Although the dilemma of polychromatism or atypical coloring which makes it difficult to distinguish *R. clavata* from *R. montagui*, *R. maderensis*, or *R. polystigma* [Capapé *et al.*, 2018; Chatzisprou *et al.*, 2019; Mnasri *et al.*, 2009] has been very well documented for the Mediterranean Sea, the present study is the first to report atypically colored thornback skates from the Sea of Marmara.

The types of polychromatism observed in the examined specimens are consistent with type 2 (ocellated) and type 4 (spotted) described by Mnasri *et al.* [2009]. At first sight, the ocellated dorsal pattern of specimen RC1 could be confused with that of *R. polystigma* which has not been recorded in the Sea of Marmara. Furthermore, in contrast to the smooth dorsal surface of *R. polystigma* [Last *et al.*, 2016], the dorsal surface of RC1 was completely prickly, and very few large buckler thorns were also present. On the other hand, the spotted dorsal pattern of specimens RC2 and RC3 resembled the dorsal coloration of *R. montagui*, and this species has been reported from the Sea of Marmara by Bilecenoğlu *et al.* [2014]. Nevertheless, dorsal surfaces of RC2 and RC3 were observed to be completely prickly, and those are completely smooth in young specimens of *R. montagui*. Therefore, one of the main characteristics that allows distinguishing atypically colored *R. clavata* from its congeners *R. montagui* and *R. polystigma* is the presence (*R. clavata*) or absence (*R. montagui* and *R. polystigma*) of prickles.

According to Last *et al.* [2016], the maximum TLs of *R. clavata*, *R. montagui*, and *R. polystigma* are ~130, ~80, and ~71 cm, respectively. Furthermore, males of *R. clavata*, *R. montagui*, and *R. polystigma* reach maturity at 60–77-cm TL, ~40-cm TL, and ~53-cm TL, respectively. As for TL of the examined skates which ranged 307.1 to 480 cm (Table 1), these are clearly juvenile specimens with respect to the above sizes at which males of *R. clavata* and *R. polystigma* reach maturity. However, as males of *R. montagui* reach maturity at around 40-cm TL, the observed TLs of the studied specimens suggest that they are mature or subadult *R. montagui* specimens. According to Last *et al.* [2016], one of the key descriptive characteristics of *R. montagui* and *R. polystigma* is the dorsal disc of these two species which is largely smooth due to the absence of prickles. However, the dorsal discs of the examined specimens were completely prickly and not smooth (Fig. 3). Furthermore, the presence of dark crossbars on the dorsal surface of the tails of studied skates which is another important descriptive characteristic of the thornback skate [Last *et al.*, 2016] also confirms that the examined specimens are *R. clavata*. Although the presence of large buckler thorns is considered as an essential characteristic for positive identification of *R. clavata* [Barone *et al.*, 2022; Last *et al.*, 2016], they are confined to the snout of juvenile and adult males [Last *et al.*, 2016]; those are seen on the snout area of specimen RC1. Moreover, occasional specimens without thorns but with a spinulose dorsal surface have been reported as well [Ebert, Stehmann, 2013]; those are seen on dorsal discs of specimens RC2 and RC3. Therefore, TLs of the studied specimens and the observed squamation patterns were consistent with those reported for *R. clavata* juveniles [Ebert, Stehmann, 2013; Last *et al.*, 2016].

Ratios of interorbital length to prenarial length (IL/PL) and eye length to prenarial length (EL/PL) can also distinguish *R. clavata* (IL/PL ~2 and EL/PL ~1.4) from its congeners *R. montagui* and *R. polystigma* [Last *et al.*, 2016]. Although the mentioned ratios of the examined thornback skates (IL/PL ~2.3 and EL/PL ~1.25) separate them from the ratios of *R. polystigma* (IL/PL ~2 and EL/PL ~2.1 [Last *et al.*, 2016]), they were found to be closer to the ratios of *R. montagui* (IL/PL ~2.5 and EL/PL ~1.2 [Last *et al.*, 2016]) than *R. polystigma*. However, the presence of buckler thorns (RC1) and fully prickly dorsal surfaces (RC2 and RC3) allowed the studied specimens to be positively identified as *R. clavata* rather than *R. montagui* or *R. polystigma*.

Although *R. montagui* has been previously registered in the Sea of Marmara and in the Black Sea (only 1 record; the specimen caught at 41°10'N, 39°36'E) [Bilecenoğlu *et al.*, 2014; Turan, 2008], this species did not occur in the following years in the mentioned marine areas. Therefore,

there is a reasonable uncertainty that: 1) *R. montagui* was noted as a result of the vagrant occurrence of the species in the Sea of Marmara and Black Sea and, accordingly, was not found repeatedly in the following years; or 2) atypically colored *R. clavata* individuals could have been misidentified as *R. montagui*. Although the record of *R. montagui* in the Black Sea is based on genetic material (GenBank accession No. EU476889 [Turan, 2008]), the fact that it has not been registered in the region since 2008 [Karadurmuş, Sari, 2024] strengthens the possibility of vagrant occurrence or misidentification. According to Bilecenoğlu *et al.* [2014], 13 species of the family Rajidae have been described in Turkish marine waters to date, and 7 out of 13 rajids also occur in the Sea of Marmara. Due to the above-mentioned taxonomic confusion in congeneric *Raja* species, taxonomic issues of the rajids occurring in the Sea of Marmara need to be resolved before conducting future studies on their populations in the region. As highlighted by Pyšek *et al.* [2013], conventional alpha taxonomy integrated with contemporary genetic taxonomic procedures will certainly improve the accuracy of species identification and further refine the taxonomic classification at the population level of rajids occurring in the Sea of Marmara. Combining the observations of Capapé *et al.* [2018] who reported on the occurrence of vermiculated pattern on the thornback skate caught off Izmir coast (the eastern Aegean Sea) with our observations, it is clear that types 2, 4, and 7 of atypically colored *R. clavata* (*sensu* [Mnasri *et al.*, 2009]) occur in Turkish marine waters as well. Atypical coloring in *Raja* species can also be exhibited by several other types [Gajić *et al.*, 2023; Quigley *et al.*, 2018], such as the single unilateral ocellus noted in *R. miraletus* or the xanthochromism observed in *R. montagui* which makes it difficult to correctly identify the species.

Conclusion. Atypical coloring may lead to confusion and misidentification of *Raja clavata*. Therefore, an integrated approach of conventional alpha taxonomy and genetic investigation is needed to resolve the taxonomic status of *Raja* species occurring in the Sea of Marmara. Accurate taxonomic resolution is the first step to properly differentiate populations of the aforementioned species before conducting further studies and effective conservation of them. The Sea of Marmara is considered as an ecological gateway from the Mediterranean to the Black Sea ecosystem; accordingly, accurate identification of the fish fauna of the Sea of Marmara is a clear requirement for a better understanding of the northerly distribution of fish species. Taxonomic issues of the rajids occurring in the Sea of Marmara need to be resolved before conducting studies on their populations in the region.

Acknowledgements. Authors are grateful to the crew of the RV “Yunus-S” of Istanbul University, Faculty of Aquatic Sciences, for their hard and friendly efforts during the field survey. Special acknowledgements go to two anonymous reviewers for their comments which improved the content and quality of the article.

REFERENCES

1. *Atlas of the Maturity Stages of Mediterranean Fishery Resources* / M. C. Follesa, P. Carbonara (Eds). Rome : FAO, 2019, 268 p. (Studies and Reviews ; no. 99).
2. Barone M., Mazzoldi C., Serena F. *Sharks, Rays and Chimaeras in Mediterranean and Black Seas – Key to Identification*. Rome : FAO, 2022, 87 p. <https://doi.org/10.4060/cc0830en>
3. Bilecenoğlu M., Kaya M., Cihangir B., Çiçek E. An updated checklist of the marine fishes of Turkey. *Turkish Journal of Zoology*, 2014, vol. 38, no. 6, pp. 901–929. <https://doi.org/10.3906/zoo-1405-60>
4. Capapé C., Aydın I., Akyol O. Morphological deformities and atypical colour pattern in thornback ray, *Raja clavata* (Elasmobranchii: Rajiformes: Rajidae), from Izmir (Turkey, Aegean Sea, Eastern Mediterranean). *Acta Ichthyologica et Piscatoria*, 2018, vol. 48, no. 3, pp. 261–266. <https://doi.org/10.3750/AIEP/02399>
5. Chatzisprou A., Gubili C., Anastasopoulou A., Koutsikopoulos C. Resolving taxonomic confusion in Rajidae (Superorder Batoidea) through DNA sequencing: The case of *Raja clavata* in the eastern Ionian Sea. In: *European Elasmobranch Association : the 23rd Annual Conference, Rende (Italy), 16–18 October, 2019*. Rende, 2019, poster.

6. Ebert D. A., Stehmann M. F. W. *Sharks, Batoids and Chimaeras of the North Atlantic*. Rome : FAO, 2013, 523 p. (FAO Species Catalogue for Fishery Purposes ; no. 7).
7. Gajić A. A., Sulikowski J. A., Beširović H. An interesting case of a single ocellus in a brown ray from the Adriatic Sea. *Marine Biodiversity*, 2023, vol. 53, art. no. 29 (2 p.). <https://doi.org/10.1007/s12526-023-01345-0>
8. Hubbs C. L., Ishiyama R. Methods for the taxonomic study and description of skates (Rajidae). *Copeia*, 1968, vol. 1968, no. 3, pp. 483–491. <https://doi.org/10.2307/1442016>
9. Karadurmuş U., Sarı M. Distribution and diversity of elasmobranchs in the Sea of Marmara: A 2023 status report. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2024, vol. 34, iss. 3, art. no. e4121 (12 p.). <https://doi.org/10.1002/aqc.4121>
10. Last P. R., Séret B., Stehmann M. F. W., Weigmann S. Skates: Family Rajidae. In: *Rays of the World* / P. Last, G. Naylor, B. Séret, W. White, M. Stehmann, M. de Carvalho (Eds). Clayton South : CSIRO Publishing, 2016, pp. 204–363. <https://doi.org/10.1071/9780643109148>
11. Mnasri N., Boumaïza M., Ben Amor M. M., Capapé C. Polychromatism in the thornback ray, *Raja clavata* (Chondrichthyes: Rajidae) off northern Tunisian coast (central Mediterranean). *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 2009, vol. 4, no. 4, pp. 572–579.
12. Pyšek P., Hulme P. E., Meyerson L. A., Smith G. F., Boatwright J. S., Crouch N. R., Figueiredo E., Foxcroft L. C., Jarošík V., Richardson D. M., Suda J., Wilson J. R. U. Hitting the right target: Taxonomic challenges for, and of, plant invasions. *AoB PLANTS*, 2013, vol. 5, plt042 (25 p.). <https://doi.org/10.1093/aobpla/plt042>
13. Quigley D. T. G., de Carlos A., Barros-Garcia D., MacGabhann D. Albino xanthochromic homely ray *Raja montagui* Fowler, 1910 (Elasmobranchii: Batoidea) from the Irish Sea. *Bulletin of the European Association of Fish Pathologists*, 2018, vol. 38, iss. 4, pp. 109–114.
14. Turan C. Molecular systematic analyses of Mediterranean skates (Rajiformes). *Turkish Journal of Zoology*, 2008, vol. 32, no. 4, pp. 437–442.
15. Weigmann S., Reinecke T. Additions to the taxonomy of the Antarctic dark-mouth skate *Bathyraja arctowski* (Dollo, 1904), with descriptions of the syntypes and morphology of teeth, dermal denticles and thorns. *Diversity*, 2023, vol. 15, iss. 8, art. no. 899 (22 p.). <https://doi.org/10.3390/d15080899>

**ЦВЕТОВОЙ УЗОР МОРСКОЙ ЛИСИЦЫ *RAJA CLAVATA* LINNAEUS, 1758
ИЗ МРАМОРНОГО МОРЯ,
ИЗ-ЗА КОТОРОГО ВОЗМОЖНЫ ОШИБКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ
НЕСКОЛЬКИХ СКАТОВ В РЕГИОНЕ**

Х. Кабасакал^{1,2}, У. Узер³, Ф. С. Каракулак³

¹Стамбульский университет, Институт рыбного хозяйства,
программа «Технологии и управление рыболовством», Стамбул, Турция

²WWF Турция, Стамбул, Турция

³Стамбульский университет, факультет водных наук,
кафедра технологий и управления рыболовством, Стамбул, Турция

E-mail: kabasakal.hakan@gmail.com

Траловые исследования в шельфовых водах северо-восточной части Мраморного моря впервые выявили в этом регионе нетипично окрашенных скатов — морскую лисицу *Raja clavata* Linnaeus, 1758 (Rajiformes: Rajidae). Поскольку нетипичная окраска может привести к путанице и неправильной идентификации *R. clavata*, необходим комплексный подход, сочетающий методы традиционной таксономии и генетических исследований. Точное таксономическое определение скатов рода *Raja* — первый шаг к корректной дифференциации их популяций перед их изучением и разработкой мер эффективной охраны.

Ключевые слова: Rajiformes, полихроматизм, аберрации, таксономия, описание

УДК (594.133:591.05)(262.5+262.54)

**СОДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ТКАНЯХ И РАКОВИНАХ ДВУСТВОРЧАТОГО МОЛЛЮСКА
ANADARA KAGOSHIMENSIS (ТОКУНАГА, 1906)
ИЗ ЧЁРНОГО И АЗОВСКОГО МОРЕЙ**

© 2024 г. Л. Л. Капранова, Ю. Д. Дикарева, С. В. Капранов, В. И. Рябушко

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Российская Федерация
E-mail: lar_sa1980@mail.ru

Поступила в редакцию 15.01.2024; после доработки 13.03.2024;
принята к публикации 27.08.2024; опубликована онлайн 09.09.2024.

В Чёрном и Азовском морях двустворчатый моллюск *Anadara kagoshimensis* является инвазивным и малоизученным видом. Моллюски — ценный объект промысла и марикультуры. В настоящее время мало сведений об особенностях содержания элементов в тканях и раковинах анадары, обитающей в этих морях. Цель данной работы — провести сравнительный анализ элементного состава тканей и раковин *A. kagoshimensis* Чёрного и Азовского морей. Элементный анализ проводили с помощью масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой. В работе приведены данные о концентрациях элементов в тканях и раковинах анадары из двух морей. Обнаружены значимые различия концентраций следующих элементов в анадаре из Чёрного и Азовского морей: K, Rb, Cs, Ca и Ba из семейства s-элементов; Al, Ga, Ge, P, As, Bi и Br из числа p-элементов; Zn, V, Nb, Ta, Mo, Fe, Ir и Au из семейства d-элементов; Pr и Nd из числа f-элементов. Содержание элементов в тканях и раковинах *A. kagoshimensis* обусловлено не только составом морской воды, куда входят в основном s-элементы, но и адаптационными процессами в моллюсках, в которых преимущественно участвуют p- и d-элементы. В тканях анадары из Чёрного моря концентрации K, Rb и Cs достоверно выше, чем в тканях особей из Азовского моря, при этом концентрация K на один (Азовское море) или два порядка (Чёрное море) выше в тканях, чем в раковинах. В раковинах *A. kagoshimensis* из Чёрного моря содержание Ca достоверно выше. Раковины анадары из Чёрного моря прочнее. На фоне высокого содержания кальция в образцах тканей и раковин *A. kagoshimensis* из обоих морей зарегистрировано относительно низкое содержание фосфора. В тканях анадары из Чёрного моря концентрация P, Al, Ga и Bi, а также тяжёлых металлов (Pb и Cd) достоверно выше. Содержание токсичных элементов в анадаре из обоих морей не превышает предельно допустимых концентраций. Содержание Zn и Mo выше в тканях, Fe — в раковинах. В тканях *A. kagoshimensis* из Азовского моря концентрация Zn выше, чем в тканях особей из Чёрного моря. Концентрации редкоземельных элементов (Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm и Yb) выше в тканях анадары из обоих морей, чем в раковинах. В *A. kagoshimensis* из Азовского моря концентрации Pr и Nd значимо выше, чем в моллюске из Чёрного моря. Анадара способна концентрировать элементы в зависимости от их содержания в среде, поэтому концентрация элементов в моллюсках, принадлежащих к одному виду, в первую очередь зависит от биотопа.

Ключевые слова: двустворчатый моллюск *Anadara kagoshimensis*, концентрация химических элементов, масс-спектрометрия, Чёрное море, Азовское море

В Чёрном и Азовском морях двустворчатый моллюск *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) является инвазивным и малоизученным видом. Из-за благоприятных кормовых условий отмечен высокий темп роста анадары [Sahin et al., 2006]. Этот моллюск — ценный объект промысла и марикультуры; так, в Таиланде объём производства анадары достигает 80 млн тонн в год [Suwanjarat et al., 2009].

Известно, что содержание химических элементов в моллюсках обусловлено их биологией и генетикой [Wala et al., 2016]. Также на концентрацию химических элементов в раковинах и тканях влияет комплекс факторов: температура, солёность, качество и степень загрязнения воды и т. д. [Moniruzzaman et al., 2021]. При этом солёность считается одним из основных экологических параметров, изменяющих функциональное состояние животных [Deaton, 2009]. Так, концентрация редкоземельных элементов в морской воде зависит от глубины [Elderfield, 1988], а данные о содержании Се и Еu свидетельствуют о насыщении морской среды кислородом и питательными веществами [Kasper-Zubillaga et al., 2010; Webb, Kamber, 2002]. В мягких тканях мидий, собранных в Севастопольской бухте, концентрация большинства рассматриваемых элементов (54 из 72) зависела от места отбора проб [Kapranov et al., 2023].

Определение концентрации химических элементов в моллюсках отражает условия их обитания в разных биотопах. Химический состав мягких тканей характеризует кратковременное состояние окружающей среды, а содержание химических элементов в раковинах отражает условия всего жизненного цикла моллюсков [Ravera et al., 2007], поэтому при мониторинге загрязнения водной среды металлами раковины двустворчатых моллюсков имеют преимущества по сравнению с тканями [Pourang et al., 2014]. При этом раковины действуют как рецептор для некоторых металлов [Richardson et al., 2001]. В тканях и раковинах моллюсков могут концентрироваться разнообразные элементы, в том числе тяжёлые металлы, что позволяет использовать этих гидробионтов в качестве биоиндикаторов загрязнения окружающей среды [Hossen et al., 2014]. Так, исследования состава химических элементов мягких тканей *Anadara* spp. с побережья Вьетнама показали, что концентрации As, Sr, Mo, Sn и Pb в моллюсках из центральной прибрежной зоны имели более высокие значения, чем в особях из других изучаемых акваторий, что связано с разной антропогенной нагрузкой [Tu et al., 2011]. Концентрации микроэлементов находились в пределах безопасных уровней для потребления человеком. Известно, что сельское хозяйство и рыболовство обуславливают попадание тяжёлых металлов в морскую среду и влияют на биоту [Wijaya et al., 2019]. К настоящему времени имеется мало сведений о накоплении химических элементов в двустворчатом моллюске *A. kagoshimensis*, обитающем в Чёрном и Азовском морях. Цель данной работы — провести сравнительный анализ концентраций химических элементов в тканях и раковинах анадары из этих морей.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объекты исследований — двустворчатый моллюск *A. kagoshimensis* из Чёрного и Азовского морей (рис. 1), собранный в период его относительной половой инертности, когда в клеточном составе гонад не происходит каких-либо изменений [Suwanjarat, 1999]. В работе использовано по 100 экз. моллюсков из каждого моря массой ($17,6 \pm 1,9$) г и длиной створок ($30,5 \pm 1,0$) мм. В Чёрном море анадару отбирали водолазы с коллекторов морской фермы в бухте Карантинная города Севастополя ($44^{\circ}61'83.46''N$, $33^{\circ}50'33.80''E$) в октябре 2022 г. Глубина отбора проб — 2–3 м. Температура воды составляла $+8^{\circ}C$, а солёность — 18 ‰. В Азовском море живых моллюсков собирали в выбросах сразу после шторма в бухте Татарская ($45^{\circ}26'51''N$, $35^{\circ}50'46''E$) в октябре 2022 г. Температура воды в море составляла $+15^{\circ}C$, солёность — 14,83 ‰. После механической очистки раковин от обрастаний моллюсков промывали в чистой морской воде, отобранной из среды обитания. Выстилающие обе створки ткани отделяли пластмассовым скальпелем и промокали фильтровальной бумагой. Ткани и раковины высушивали при $+105^{\circ}C$.



Рис. 1. Карта-схема мест отбора проб

Fig. 1. Map of the study area

Количественный элементный анализ проводили с помощью масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой PlasmaQuant MS Elite (Analytik Jena, Германия) с параметрами, приведёнными в работе [Капранов et al., 2021]. Всю лабораторную посуду выдерживали 24 ч в 2%-ном растворе очищенной азотной кислоты и промывали деионизированной водой. Предварительно высушенные биологические пробы минерализовали во фторопластовых пробирках путём мокрого сжигания в очищенной 65%-ной азотной кислоте, а затем разбавляли деионизированной водой, чтобы разбавление было в пределах $1000\text{--}2000\text{ мл}\cdot\text{г}^{-1}$ (в пересчёте на сухую массу). Калибровочные кривые строили по стандартным растворам многоэлементного стандарта IV-ICPMS-71A-C (Inorganic Ventures, США, $10\text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$). Образцы контрольного материала (0,1 г) переваривали в особо чистой азотной кислоте и разбавляли деионизированной водой в соответствии с процедурой, описанной выше. Коэффициенты детерминации линейной регрессии для всех калибровочных графиков были не менее 0,998. Ошибка количественного определения при полуколичественном анализе ICP-MS составляет $< 50\%$ [Chen et al., 2008; Krzciuk, 2016]. Двухфакторный дисперсионный анализ проводили в программах PRIMER и PERMANOVA.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Различия в содержании химических элементов в *A. kagoshimensis* из Чёрного и Азовского морей статистически значимы (табл. 1). К таким элементам относятся: K, Rb, Cs, Ca и Ba из семейства s-элементов; p-элементы Al, Ga, Ge, P, As, Bi и Br; d-элементы Zn, V, Nb, Ta, Mo, Fe, Ir и Au; f-элементы Pr и Nd. Эти различия обусловлены не только составом морской воды, куда преимущественно входят s-элементы, но и физиолого-биохимическими особенностями моллюсков. Известно, что именно p- и d-элементы, имеющие атомные номера от 24 до 33, участвуют в функционировании клеток морских организмов в качестве минорных компонентов белков, углеводов, липидов и ферментов [Takarina et al., 2013]. Изменения в химическом составе моллюсков также можно объяснить влиянием внутренних и внешних факторов [Osibona et al., 2009]. Неподвижный образ жизни и фильтрационный способ питания анадары требуют сравнительно небольших энергетических затрат. У этих моллюсков, очевидно, только два процесса связаны со значительным расходом энергии — размножение и линейный рост, поэтому во время нереста и роста концентрации элементов в тканях и раковинах анадары могут увеличиваться.

Таблица 1. Концентрация химических элементов в тканях и раковинах *Anadara kagoshimensis* ($\mu\text{г}\cdot\text{кг}_{\text{сух}}^{-1}$). Достоверные различия концентраций элементов ($p < 0,05$; $n = 10$): * — между тканями и раковинами анадары и в Чёрном, и в Азовском море; А или Ч — между тканями и раковинами моллюска или в Азовском море (А), или в Чёрном (Ч); Т — между тканями анадары из Чёрного и из Азовского моря; Р — между раковинами *A. kagoshimensis* из Чёрного и из Азовского моря

Table 1. Elemental concentration in *Anadara kagoshimensis* soft tissues and shells ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}_{\text{dw}}^{-1}$). The differences are significant ($p < 0.05$; $n = 10$): *, between soft tissues and shells of the mollusc from both the Black Sea and Sea of Azov; A or Ч, between soft tissues and shells of *A. kagoshimensis* from either the Sea of Azov (A), or the Black Sea (Ч); Т, between soft tissues of the clam from the Black Sea and Sea of Azov; P, between shells of *A. kagoshimensis* from the Black Sea and Sea of Azov

Элемент	Чёрное море		Азовское море	
	Ткани	Раковины	Ткани	Раковины
s-элементы				
Li ^{AP}	501 ± 379	812 ± 499	320 ± 290	14 ± 9
Be ^{*TP}	11 ± 5	6 ± 3	9 ± 8	8 ± 7
Na ^{*P}	12 178 992 ± 2 536 968	3 234 141 ± 288 151	13 146 503 ± 2 746 341	1 125 903 ± 273 410
Mg ^{*P}	2 875 832 ± 333 062	878 669 ± 668 271	2 503 012 ± 454 165	60 642 ± 15 355
K ^{*TP}	3 742 846 ± 474 396	83 002 ± 20 095	2 057 008 ± 227 175	29 845 ± 24 088
Ca ^{*TP}	8 311 674 ± 5 209 732	186 445 736 ± 21 517 954	25 067 443 ± 14 688 981	114 796 479 ± 7 733 846
Rb ^{*TP}	5 160 ± 1 083	509 ± 191	2 681 ± 322	67 ± 24
Str ^{*P}	56 665 ± 27 128	951 807 ± 113 927	117 496 ± 55 074	560 106 ± 51 275
Cs ^{*TP}	44 ± 16	70 ± 32	4,2 ± 3,9	2,6 ± 2,5
Ba ^{*TP}	12 768 ± 4 952	17 767 ± 4 834	4 786 ± 2 288	7 375 ± 3 547
p-элементы				
B ^{*TP}	14 713 ± 2 132	6 626 ± 2 093	11 754 ± 2 206	448 ± 363
Al ^{*TP}	173 714 ± 69 956	321 109 ± 113 933	44 931 ± 21 499	24 076 ± 7 625
Si ^{*P}	177 381 ± 38 679	298 780 ± 197 663	208 800 ± 54 020	30 776 ± 29 529
P ^{*TP}	4 845 357 ± 301 948	245 141 ± 72 786	3 777 277 ± 510 623	55 807 ± 10 943
Ga ^{*TP}	179 ± 24	59 ± 25	351 ± 61	14 ± 17
Ge ^{*TP}	499 ± 151	1 143 ± 275	807 ± 309	508 ± 261
As ^{*TP}	15 756 ± 2 543	1 583 ± 230	8 936 ± 1 505	2 756 ± 130
Se [*]	5 035 ± 1 729	1 425 ± 954	5 738 ± 1 125	682 ± 488
Br ^{*TP}	356 136 ± 126 346	176 248 ± 51 213	218 655 ± 44 940	23 736 ± 7 763
In ^{ЧТ}	3 ± 2,9	1,2 ± 0,8	0,7 ± 0,6	0,8 ± 0,5
Sn ^P	266 ± 185	311 ± 253	139 ± 94	9 ± 5
Sb ^{AP}	53 ± 25	57 ± 42	41 ± 10	12 ± 6
Te ^{ATP}	9 ± 6	10 ± 6	42 ± 19	23 ± 7
I ^{ЧTP}	31 028 ± 5 276	55 587 ± 17 313	10 552 ± 6 001	7 728 ± 1 904
Tl ^{ЧТ}	9 ± 3	2 ± 1	3 ± 2	2 ± 1,8
Pb ^{*TP}	1 526 ± 682	776 ± 213	650 ± 408	64 ± 39
Bi ^{*TP}	101 ± 80	100 ± 73	5 ± 3	1,3 ± 1,1
d-элементы				
Sc ^{ATP}	1 056 ± 374	945 ± 396	409 ± 80	66 ± 54
Ti ^{AP}	3 843 ± 1 266	4 885 ± 2 442	500 ± 200	2 000 ± 400
V ^{*TP}	3 433 ± 1 522	1 634 ± 508	4 227 ± 918	1 530 ± 407
Cr ^{TP}	9 906 ± 6 920	7 820 ± 4 605	2 115 ± 261	175 ± 97
Mn [*]	29 278 ± 10 694	35 069 ± 18 156	19 325 ± 10 248	22 933 ± 17 129
Fe ^{*TP}	293 751 ± 67 269	1 564 344 ± 325 172	1 216 741 ± 599 529	5 057 068 ± 2 329 125
Co ^{ЧP}	1 367 ± 976	2 195 ± 147	1 134 ± 283	1 083 ± 137
Ni ^{ЧTP}	4 635 ± 4 164	31 218 ± 4 999	10 943 ± 3 576	8 531 ± 2 079

Продолжение на следующей странице...

Элемент	Чёрное море		Азовское море	
	Ткани	Раковины	Ткани	Раковины
Cu ^{AP}	61 323 ± 20 518	74 990 ± 36 886	47 554 ± 15 261	14 424 ± 5 599
Zn ^{*TP}	115 934 ± 59 902	8 268 ± 8 851	181 026 ± 57 602	1 151 ± 649
Y ^{CT}	1 549 ± 1 212	215 ± 81	608 ± 144	144 ± 48
Zr ^{TP}	312 ± 140	345 ± 155	107 ± 48	56 ± 25
Nb ^{*TP}	9 ± 3	25 ± 19	6 ± 3	3 ± 2
Mo ^{*TP}	2 239 ± 1 645	1 008 ± 704	971 ± 285	55 ± 35
Ru ^{CP}	1 ± 0,5	8 ± 3	2,2 ± 1,7	3 ± 2
Rh ^{*P}	28 ± 8	163 ± 42	43 ± 14	134 ± 11
Pd ^{*T}	191 ± 57	1 193 ± 379	596 ± 107	1 058 ± 100
Ag	780 ± 448	588 ± 252	815 ± 243	569 ± 465
Cd ^{*T}	15 290 ± 10 450	192 ± 114	6 183 ± 2 524	147 ± 59
La ^Ч	1 076 ± 1 002	284 ± 113	759 ± 187	231 ± 153
Hf ^{AT}	7 ± 3	4 ± 2	12 ± 9	2 ± 1,5
Ta ^{*TP}	1 ± 0,5	0,3 ± 0,2	5 ± 4	0,6 ± 0,4
W ^{AP}	152 ± 134	73 ± 31	64 ± 17	7 ± 4
Re ^{AT}	0,6 ± 0,3	0,6 ± 0,3	1,3 ± 0,5	0,3 ± 0,2
Os ^{AT}	2 ± 1,5	1,6 ± 1,2	20 ± 14	1,9 ± 0,5
Ir ^{*TP}	0,2 ± 0,1	0,3 ± 0,04	1,2 ± 1,1	0,2 ± 0,1
Pt ^A	3 ± 2	3 ± 2	5,4 ± 5,3	1,1 ± 0,8
Au ^{*TP}	15 ± 3	21 ± 6	172 ± 86	2 ± 1
Hg [*]	160 ± 90	20 ± 11	193 ± 59	11 ± 6
f-элементы				
Ce ^{*T}	736 ± 490	184 ± 76	1 100 ± 293	473 ± 308
Pr ^{*TP}	85 ± 66	22 ± 8	158 ± 39	52 ± 34
Nd ^{*TP}	384 ± 239	89 ± 32	662 ± 142	200 ± 121
Sm ^{*T}	65 ± 46	19 ± 7	126 ± 31	32 ± 21
Eu ^A	27 ± 15	16 ± 5	32 ± 13	15 ± 9
Gd ^{*T}	84 ± 63	19 ± 6	160 ± 45	38 ± 24
Tb ^{*T}	13 ± 9	3 ± 1	21 ± 9	4 ± 3
Dy [*]	61 ± 45	15 ± 5	88 ± 22	15 ± 11
Ho [*]	11 ± 8	3 ± 1	9 ± 3	2 ± 1
Er [*]	33 ± 23	8 ± 3	44 ± 14	7 ± 6
Tm ^{CT}	5 ± 3	1 ± 0,5	1,2 ± 1,1	0,7 ± 0,6
Yb ^{*T}	19 ± 12	6 ± 2	29 ± 10	7 ± 5
Lu ^{CT}	4 ± 3	1 ± 0,4	1 ± 0,9	1 ± 0,7
Th	90 ± 68	84 ± 60	45 ± 35	91 ± 82
U ^{*T}	51 ± 16	75 ± 25	122 ± 18	72 ± 17

S-элементы распределены в анадаре по-разному (табл. 1). Отмечены значимые различия концентраций K, Ca, Ba, Rb и Cs между тканями и раковинами моллюсков и из Чёрного, и из Азовского моря. В тканях анадары из Чёрного моря концентрации K, Rb и Cs достоверно выше, чем в тканях *A. kagoshimensis* из Азовского моря, что связано с уровнем растворённых питательных веществ в этих водоёмах. В Чёрном море существует особый тип прибрежных течений, называемый апвеллингом. В областях апвеллинга наблюдается более высокая биологическая продуктивность за счёт возвращения в поверхностные воды питательных веществ с морского дна. Rb и Cs, скорее всего, замещают K в изоморфном ряду его соединений. K играет ведущую роль в образовании мембранного потенциала клеток, поэтому концентрация K на один (Азовское море)

или два порядка (Чёрное море) выше в тканях, чем в раковинах моллюсков. Также К может влиять на толщину панцирей моллюсков; дефицит К приводит к уменьшению толщины створок [Elegbede et al., 2023]. Таким образом, раковины анадары из Чёрного моря более прочные. Этот факт следует учитывать при переработке тканей и створок в пищевые добавки, корма для животных, минеральные удобрения и т. п.

В раковинах анадары из Чёрного и Азовского морей отмечено относительно высокое содержание Ca, Na, Mg и Sr. Именно эти элементы и их соединения формируют раковины моллюсков. В раковинах *A. kagoshimensis* из Чёрного моря содержание Ca достоверно выше, чем из Азовского моря. Чем твёрже раковина моллюска, тем выше содержание Ca [Dickson, 2013]. Na₂CO₃ и другие соединения Na обладают связывающими и увлажняющими свойствами, регулируют pH, придают раковине способность к склеиванию и образованию компактной структуры. В нашем исследовании на фоне относительно высокого содержания Ca в тканях и раковинах *A. kagoshimensis* отмечено низкое содержание фосфора; это было установлено и для *Anadara senilis* из Гвинеи [Elegbede et al., 2023].

Концентрация Li в раковинах анадары из Азовского моря на порядок ниже, чем в раковинах гидробионта из Чёрного моря. В природные источники Li попадает из грунта, его содержание в подземных водах находится в строгом соответствии с его содержанием в тех породах, по которым они циркулируют [von Strandmann, 2020].

Между содержанием **p-элементов** в тканях *A. kagoshimensis* обнаружены значимые различия (табл. 1). Концентрация P в тканях моллюсков из Чёрного моря, отобранных из подвесных садков мидийно-устричной фермы, выше, чем у анадары из Азовского моря, что может свидетельствовать о более интенсивном метаболизме у гидробионтов, обитающих в Чёрном море. В толще воды *A. kagoshimensis* растёт лучше, чем в донных поселениях [Acarli et al., 2012]. Al способен образовывать нерастворимые соединения с P [Haynes, Mokolobate, 2001]; соответственно, концентрация Al значимо выше в тканях анадары из Чёрного моря. Алюминий принято считать токсичным элементом [Toxicological Profile for Lead, 2020].

В тканях *A. kagoshimensis* из Чёрного моря концентрация Ga и Bi выше, чем у особей из Азовского моря. Наличие Ga в воде связано с антропогенной нагрузкой, и он не играет существенной биологической роли в жизни гидробионтов. Более высокое содержание Bi в тканях моллюска из Чёрного моря может быть обусловлено большей солёностью черноморской воды.

В раковинах анадары из Чёрного моря содержание P, S, Cl, Pb, Al, Ge, Br, V, Si, Sn, I, Bi и Sb достоверно выше, чем у моллюсков из Азовского моря (табл. 1). Вероятно, раковины способны концентрировать элементы в зависимости от их содержания в биотопах, что указывает на непостоянство элементного состава как раковин, так и тканей анадары.

A. kagoshimensis может служить биоиндикатором загрязнения среды тяжёлыми металлами. Концентрации Pb и Cd в тканях и раковине значимо различаются у анадары из Чёрного и Азовского моря (табл. 1). В целом содержание токсичных элементов в моллюске из обоих морей ниже предельно допустимых концентраций, установленных требованиями ТР ТС 021/2011 [2011]: Pb — 10,0; Cd — 2,0; Hg — 0,2 мг·кг⁻¹. Основными источниками Pb в морской среде являются ливневые стоки из внутренних районов и поступление сточных вод с суши [El-Sorogy, Youssef, 2015; El-Sorogy et al., 2012; Peters et al., 1997]. Высокие концентрации тяжёлых металлов Pb, Cd и Hg представляют угрозу для моллюсков [Dabwan, Taufiq, 2016; Isoni, Maulida, 2022].

Концентрации **d-элементов**, например Zn и Mo, выше в тканях, а Fe — в раковинах анадары (табл. 1). Железо играет важную роль в метаболизме моллюсков [El-Sorogy et al., 2013]. Fe равномерно концентрируется во внешнем органическом слое раковины — периостракуме — и распределяется по арагонитовым слоям [Duncan et al., 2009]. В тканях *A. kagoshimensis* из Азовского моря концентрация Zn выше, чем у особей из Чёрного моря. Цинк входит в число 90 ферментов,

участвующих в метаболизме животных, и является незаменимым микроэлементом для всех живых организмов [Astuti et al., 2022]. Содержание Zn в гидробионтах выше, чем в наземных организмах. Zn концентрируется в тканях гидробионтов в виде нерастворимых металлических включений или в связанном виде с макромолекулами [Pourang et al., 2014].

Сведений о содержании редкоземельных элементов в морской среде, их накоплении в живых организмах и влиянии на биоту крайне мало. Различия в концентрациях редкоземельных элементов (Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm и Yb) между моллюсками из Чёрного и Азовского морей очевидны (табл. 1). В среднем их содержание выше в тканях анадары, чем в раковинах. Только концентрации Pr и Nd значительно различаются в тканях и раковинах, а также между тканями и раковинами *A. kagoshimensis* как в Чёрном море, так и в Азовском. В моллюске из Азовского моря содержание Pr и Nd выше. Как и многие другие редкоземельные металлы, элементарные Pr и Nd не играют значительной биологической роли в живых организмах. Их содержание может быть связано с разной антропогенной нагрузкой на исследуемые акватории. Моллюски рода *Anadara* — фильтраторы, поэтому концентрация редкоземельных элементов, как правило, выше в тканях, чем в раковинах. В организм моллюсков эти элементы могут попадать вместе с бактериями. Так, показано, что бактерии обладают способностью аккумулировать металлы и, соответственно, влиять на процесс их водной миграции [Beveridge, Doyle, 1989].

Заключение. Содержание химических элементов в тканях и раковинах моллюсков зависит прежде всего от условий среды обитания. При этом различия концентраций обусловлены не только составом морской воды, куда преимущественно входят s-элементы, но и адаптационными физиологическими процессами у моллюсков, поскольку в данной работе больше всего статистически значимых различий выявлено среди p- и d-элементов. Именно p- и d-элементы участвуют в функционировании клеток организмов в качестве минорных компонентов белков, углеводов, липидов и ферментов. Моллюски потребляют макро- и микроэлементы из воды и аккумулируют их в тканях и раковинах, приспосабливаясь к условиям обитания, в том числе к солёности. Содержание элементов в тканях и раковинах *Anadara kagoshimensis* непостоянно, роль тех или иных элементов в физиологических процессах может возрастать в зависимости от физиологического состояния животных. Не все элементы, накапливающиеся в тканях и раковинах, являются эссенциальными. Процесс накопления элементов тесно связан с антропогенной нагрузкой на акваторию.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 23-24-00494 (<https://rscf.ru/project/23-24-00494/>).

Благодарность. Авторы выражают благодарность С. В. Щурову и к. б. н. В. А. Тимофееву (ФИЦ ИнБЮМ) за помощь в отборе проб моллюсков. ICP-MS анализ выполнен в ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. ТР ТС 021/2011. *Технический регламент Таможенного союза о безопасности пищевой продукции*. Москва : Госстандарт России, 2011. 242 с. [TR TS 021/2011. *Tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza o bezopasnosti pishchevoi produktsii*. Moscow : Gosstandart Rossii, 2011, 242 p. (in Russ.)]
2. Acarli S., Lok A., Yigitkurt S. Growth and survival of *Anadara inaequalis* (Bruguere, 1789) in Sufa Lagoon, Izmir, Turkey. *Israeli Journal of Aquaculture – Bamidgah*, 2012, vol. 64, art. no. 691 (7 p.). <https://doi.org/10.46989/001c.20623>
3. Astuti P., Putra M. N. P., Shiddiq M. F. A., Yuneldi R. F., Airin C. M., Sarmin S. The potency of *Anadara nodifera* shell as natural testosterone booster for male canary (*Seriunus canaria*). *HAYATI Journal of Biosciences*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 107–113. <https://doi.org/10.4308/hjb.29.1.107-113>

4. Beveridge T. J., Doyle R. J. *Metal Ions and Bacteria*. New York : John Wiley & Sons, 1989, 461 p.
5. Chen H., Dabek-Zlotorzynska E., Rasmussen P. E., Hassan N., Lanouette M. Evaluation of semi-quantitative analysis mode in ICP-MS. *Talanta*, 2008, vol. 74, iss. 5, pp. 1547–1555. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2007.09.037>
6. Dabwan A. H., Taufiq M. Bivalves as bio-indicators for heavy metals detection in Kuala Kemaman, Terengganu, Malaysia. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol. 9, iss. 9, pp. 1–6. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i9/88708>
7. Deaton L. E. Osmotic and ionic regulation in molluscs. In: *Osmotic and Ionic Regulation. Cells and Animals* / D. H. Evans (Ed.). Boca Raton ; London ; New York : CRC Press, 2009, chap. 4, pp. 107–134. <https://doi.org/10.1201/9780849380525>
8. Dickson U. J. Mineral composition of shells of some animals found in the Niger Delta region of Nigeria. *African Journal of Food Science Research*, 2013, vol. 2, iss. 6, pp. 7–13.
9. Duncan E., Mutvei H., Göransson P., Mörth C.-M., Schöne B. R., Whitehouse M. J., Elfman M., Baden S. P. Using ocean quahog (*Arctica islandica*) shells to reconstruct palaeoenvironment in Öresund, Kattegat and Skagerrak, Sweden. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, vol. 98, iss. 1, pp. 3–17. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0348-6>
10. Elderfield H. The oceanic chemistry of the rare-earth elements. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1988, vol. 325, iss. 1583, pp. 105–126. <https://doi.org/10.1098/rsta.1988.0046>
11. Elegbede I., Lawal-Are A., Favour O., Jolaosho T., Goussanou A. Chemical compositions of bivalves shells: *Anadara senilis*, *Crassostrea gasar*, and *Mytilus edulis* and their potential for a sustainable circular economy. *Discover Applied Sciences*, 2023, vol. 5, iss. 1, art. no. 44 (12 p.). <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05267-7>
12. El-Sorogy A., El Kammar A., Ziko A., Aly M., Nour H. Gastropod shells as pollution indicators, Red Sea coast, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 2013, vol. 87, pp. 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.08.004>
13. El-Sorogy A. S., Mohamed M. A., Nour H. E. Heavy metals contamination of the Quaternary coral reefs, Red Sea coast, Egypt. *Environmental Earth Sciences*, 2012, vol. 67, iss. 3, pp. 777–785. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1535-0>
14. El-Sorogy A. S., Youssef M. Assessment of heavy metal contamination in intertidal gastropod and bivalve shells from central Arabian Gulf coastline, Saudi Arabia. *Journal of African Earth Sciences*, 2015, vol. 111, pp. 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.07.012>
15. Haynes R., Mokolobate M. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: A critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, vol. 59, iss. 1, pp. 47–63. <https://doi.org/10.1023/A:1009823600950>
16. Hossen F. M., Hamdan S., Rahman R. M. Cadmium and lead in blood cockle (*Anadara granosa*) from Asajaya, Sarawak, Malaysia. *The Scientific World Journal*, 2014, vol. 2014, art. no. 924360 (4 p.). <https://doi.org/10.1155/2014/924360>
17. Isoni W., Maulida N. Accumulation of heavy metals Pb and Hg in feather shells (*Anadara antiquata*) in Lekok coastal waters, Pasuruan Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1036, art. no. 012091 (4 p.). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1036/1/012091>
18. Kapranov S. V., Karavantseva N. V., Bobko N. I., Ryabushko V. I., Kapranova L. L. Sex- and sexual maturation-related aspects of the element accumulation in soft tissues of the bivalve *Mytilus galloprovincialis* Lam. collected off coasts of Sevastopol (southwestern Crimea, Black Sea). *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, iss. 17, pp. 21553–21576. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12024-z>
19. Kapranov S. V., Kozintsev A. F., Bobko N. I., Ryabushko V. I. Elements in soft tissues of the young Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. 1819 collected in Sevastopol Bay (Crimea, Black Sea): Effects of age, sex, location, and principal morphometric parameters. *Animals*, 2023, vol. 13, iss. 12, art. no. 1950 (22 p.). <https://doi.org/10.3390/ani13121950>
20. Kasper-Zubillaga J. J., Rosales-Hoz L., Bernal J. P. Rare earth elements in corals from the Isla de Sacrificios Reef, Veracruz, Mexico.

- Geochemistry*, 2010, vol. 70, iss. 1, pp. 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2009.09.001>
21. Krzciuk K. Intelligent analysis of samples by semi-quantitative inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) technique: A review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2016, vol. 46, iss. 4, pp. 284–290. <https://doi.org/10.1080/10408347.2015.1053106>
 22. Moniruzzaman M., Lee S., Park Y., Min T. S., Bai S. C. Evaluation of dietary selenium, vitamin C and E as the multi-antioxidants on the methylmercury intoxicated mice based on mercury bioaccumulation, antioxidant enzyme activity, lipid peroxidation and mitochondrial oxidative stress. *Chemosphere*, 2021, vol. 273, art. no. 129673 (10 p.). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129673>
 23. Osibona A. O., Kusemiju K., Akande G. R. Proximate composition and fatty acids profile of the African catfish *Clarias gariepinus*. *ActaSATECH Journal of Life and Physical Sciences*, 2009, vol. 3, iss. 1, pp. 89–94.
 24. Peters E. C., Gassman N. J., Firman J. C., Richmond R. H., Power E. A. Ecotoxicology of tropical marine ecosystems. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, vol. 16, iss. 1, pp. 12–40. <https://doi.org/10.1002/etc.5620160103>
 25. Pourang N., Richardson C. A., Chenery S. R. N., Nasrollahzede H. Assessment of trace elements in the shell layers and soft tissues of the pearl oyster *Pinctada radiata* using multivariate analyses: A potential proxy for temporal and spatial variations of trace elements. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, vol. 186, iss. 4, pp. 2465–2485. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3553-0>
 26. Ravera O., Beone G. M., Trincherini P. R., Riccardi N. Seasonal variations in metal content of two *Unio pictorum mancus* (Mollusca, Unionidae) populations from two lakes of different trophic state. *Journal of Limnology*, 2007, vol. 66, no. 1, pp. 28–39. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2007.28>
 27. Richardson C. A., Chenery S. R. N., Cook J. M. Assessing the history of trace metal (Cu, Zn, Pb) contamination in the North Sea through laser ablation ICP-MS of horse mussel *Modiolus modiolus* shells. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, vol. 211, pp. 157–167. <https://doi.org/10.3354/meps211157>
 28. Sahin C., Düzgüneş I. E., Okumuş I. Seasonal variations in condition index and gonadal development of the introduced blood cockle *Anadara inaequiv-alvis* (Bruguiere, 1789) in the southeastern Black Sea coast. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2006, vol. 6, no. 2, pp. 155–163.
 29. Suwanjarat J. Ultrastructure of the spermatogenesis of the cockle *Anadara granosa* L. (Bivalvia: Arcidae). *Helgoland Marine Research*, 1999, vol. 53, pp. 85–91. <https://doi.org/10.1007/PL00012143>
 30. Suwanjarat J., Pituksalee C., Thongchai S. Reproductive cycle of *Anadara granosa* at Pattani Bay and its relationship with metal concentrations in the sediments. *Songklanakarinn Journal of Science and Technology*, 2009, vol. 31, no. 5, pp. 471–479.
 31. Takarina N. D., Bengen D. G., Sanusi H. S., Riani E. Geochemical fractionation of copper (Cu), lead (Pb), and zinc (Zn) in sediment and their correlations with concentrations in bivalve mollusc *Anadara indica* from coastal area of Banten Province, Indonesia. *International Journal of Marine Science*, 2013, vol. 3, no. 30, pp. 238–243.
 32. *Toxicological Profile for Lead* / US Department of Health and Human Services. Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Washington, DC : US Department of Health and Human Services, 2020, 530 p.
 33. Tu N. P. C., Ha N. N., Agusa T., Ikemoto T., Tuyen B. C., Tanabe S., Takeuchi I. Trace elements in *Anadara* spp. (Mollusca: Bivalva) collected along the coast of Vietnam, with emphasis on regional differences and human health risk assessment. *Fisheries Science*, 2011, vol. 77, iss. 6, pp. 1033–1043. <https://doi.org/10.1007/s12562-011-0410-3>
 34. von Strandmann P. A. E. P., Kasemann S. A., Wimpenny J. B. Lithium and lithium isotopes in Earth's surface cycles. *Elements*, 2020, vol. 16, no. 4, pp. 253–258. <https://doi.org/10.2138/gselements.16.4.253>
 35. Wala C., Hart A. I., Babatunde B. B., Zabbey N. Assessment of human health risk from heavy metal loads in freshwater clam, *Ergeria radiata*, from the Nun River, Niger Delta, Nigeria. *Journal of Environment and Earth Science*, 2016, vol. 6, no. 9, pp. 10–20.
 36. Webb G. E., Kamber B. S. Rare earth elements in Holocene reefal microbialites:

- A new shallow seawater proxy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, vol. 64, iss. 9, pp. 1557–1565. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00400-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00400-7)
37. Wijaya W. A., Yulianto B., Setyati W. A. Study of the impact of heavy metal (Cd, Pb and Hg) contamination in Wedung waters, Demak on *Anadara granosa* (Linnaeus, 1758). *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 2019, vol. 14, no. 5, pp. 461–473.

**THE ELEMENT CONTENTS IN SOFT TISSUES AND SHELLS
OF THE BIVALVE *ANADARA KAGOSHIMENSIS* (TOKUNAGA, 1906)
FROM THE BLACK SEA AND SEA OF AZOV**

L. Kapranova, J. Dikareva, S. Kapranov, and V. Ryabushko

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: lar_sa1980@mail.ru

In the ecosystems of the Black Sea and Sea of Azov, the invasive bivalve mollusc *Anadara kagoshimensis* is a poorly studied species. This clam is a valuable object in fishery and mariculture. Currently, there is little information about the element contents in soft tissues and shells of the mollusc living in these two seas. The aim of this work is comparative analysis of the elemental composition of *A. kagoshimensis* from the Black Sea and Sea of Azov. The elemental analysis was carried out using inductively coupled plasma mass spectrometry. The study presents data on the elemental contents in soft tissues and shells of this clam from the two seas. Noticeable differences in contents of elements were found between the sampling areas. These elements include: K, Rb, Cs, Ca, and Ba from the s-element family; the p-elements Al, Ga, Ge, P, As, Bi, and Br; the d-block elements Zn, V, Nb, Ta, Mo, Fe, Ir, and Au; and the f-block elements Pr and Nd. The elemental composition of *A. kagoshimensis* is determined not only by the composition of seawater, which contains mainly s-elements, but also by mollusc adaptation processes in which p- and d-elements are predominantly involved. In soft tissues of the clam from the Black Sea, concentrations of K, Rb, and Cs are significantly higher than in tissues of *A. kagoshimensis* from the Sea of Azov, while the concentration of K is one (the Sea of Azov) to two orders of magnitude (the Black Sea) higher in soft tissues than in shells. In shells of the clam inhabiting the Black Sea, Ca content is significantly higher, and these shells are stronger. Against the high calcium content, relatively low phosphorus content is noted in samples of soft tissues and shells from both seas. In soft tissues of *A. kagoshimensis* from the Black Sea, the contents of P, Al, Ga, Bi, and some heavy metals (Pb and Cd) are significantly higher. The contents of toxic elements in the mollusc from both seas do not exceed the maximum permissible levels. Zn and Mo are accumulated in soft tissues, and Fe is more concentrated in shells. In soft tissues of *A. kagoshimensis* from the Sea of Azov, Zn content is higher than in this clam from the Black Sea. Rare earth elements (Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, and Yb) are more concentrated in soft tissues of the mollusc from both seas than in shells, with Pr and Nd contents in specimens from the Sea of Azov being significantly higher than in those from the Black Sea. *Anadara* is capable of concentrating elements depending on their contents in the environment; therefore, the element accumulation in individuals of the same species is primarily a function of the biotope conditions.

Keywords: *Anadara kagoshimensis*, chemical element concentrations, mass spectrometry, Black Sea, Sea of Azov

УДК 595.135(265.53)

**НОВЫЙ ВИД ЩЕТИНКОЧЕЛЮСТНЫХ
SAGITTA DIMITRYI SP. NOV. (CHAETOGNATHA, SAGITTOIDEA)
ИЗ ОХОТСКОГО МОРЯ (СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ САХАЛИН)**

© 2024 г. **А. П. Касаткина, Л. Е. Васильева**

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

Поступила в редакцию 23.03.2023; после доработки 02.05.2024;
принята к публикации 27.08.2024; опубликована онлайн 09.09.2024.

В статье описан новый вид щетинкочелюстных *Sagitta dimitryi* sp. nov., обнаруженный в водах Охотского моря у северо-западной части Сахалина. Дана таблица определительных ключей для видов рода *Sagitta* с включением *Sagitta dimitryi* sp. nov. Обсуждается родство современных *Sagitta* с древними Chaetognatha, в том числе возможные причины эволюции кишечного аппарата.

Ключевые слова: *Sagitta dimitryi* sp. nov., Chaetognatha, Сахалин, Охотское море

Классификация щетинкочелюстных (тип Chaetognatha Leucart, 1894) остаётся проблемой с момента открытия группы исследователем M. Slabber [1769]. Только в 1905 г. был описан класс Sagittoidea Claus et Grobben, 1905. Первая попытка классификации хетогнат принадлежит P. Abric [1905]. Несмотря на недостатки, подход этого специалиста (классификация видов по числу парных боковых плавников) не был отброшен и был применён в дальнейшем: наличие двух парных плавников использовано в качестве признака рода *Sagitta* sensu lato [Ritter-Záhony, 1911]. T. Tokioka [1965] разделил род, предложенный R. Ritter-Záhony, на восемь родов с выделением части видов в новый род *Sagitta* sensu stricto, однако данные им определительные диагнозы не учитывали наличие желеобразных структур (sac-like gelatinous structures, SGS). С учётом разнообразия SGS у представителей семейства Sagittidae Claus et Grobben, 1905 позднее выделены подсемейства Flaccisagittinae и Sagittinae [Kassatkina, 2007].

Трудности работы с щетинкочелюстными отчасти связаны с простотой их организации. У них отсутствуют не только некоторые органы (постоянные яйцеводы, семяпроводы), но и целые системы органов (выделительная, дыхательная). Недавно открытая кровеносная система очень примитивна [Малахов, Березинская, 2001].

В данной статье мы описываем новый для науки вид *Sagitta dimitryi* Kassatkina & Vasileva sp. nov. из подсемейства Sagittinae.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Планктонные щетинкочелюстные отобраны в 82-м рейсе НИС «Профессор Гагаринский» 03.09.2022 и зафиксированы 4%-ным формалином. Обработку производили так, чтобы не повредить мягкие ткани. В лаборатории материал исследован под биноклем МБС-10, фотографии

сделаны стереомикроскопом Stemi 2000-C с камерой AxioCam ICs 3 с целью показать отличия здоровых экземпляров от морфологически аномальных животных. Материал находится в хранилище планктонных проб лаборатории исследования загрязнений и экологии Тихоокеанского океанологического института (голотип SD N1. 82. 2022 и четыре паратипа). Неполовозрелые экземпляры, около 100 особей, были отобраны в Курило-Сахалинской экспедиции (1949 г.), рейсе судна «Байдар» (1965 г.) и 24-м рейсе НИС «Академик Несмеянов» (1993 г.). Для сравнения со зрелыми животными приведены характеристики незрелых особей из разных планктонных проб. Для установления видовой принадлежности *Sagitta* на всех стадиях половой зрелости применяли окрашивание животных по методике автора [Kassatkina, 2008].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таксономия. Новый для науки вид принадлежит к семейству Sagittidae, подсемейству Sagittinae, роду *Sagitta* sensu stricto Quoy et Gaimard, 1827.

Диагноз вида *Sagitta dimitryi* Kassatkina & Vasileva sp. nov. Тело мускулистое, ригидное. Голова одинаковой ширины с туловищем, шея заметна. Мерцательная петля короткая, имеет своеобразную форму — парные выпуклости на уровне туловищно-головной перегородки (рис. 1А, m). Форма и расположение петли относительно головного ганглия являются надёжным таксономическим признаком на всех стадиях — как у молодых, неполовозрелых животных, так и у половозрелых. Глаза с тёмным пигментным пятном, форма которого одинакова у неполовозрелых и половозрелых особей (рис. 1С). Семенные пузырьки не соприкасаются ни с хвостовым, ни с боковыми плавниками (рис. 1В, v). Альвеолярная ткань отсутствует.

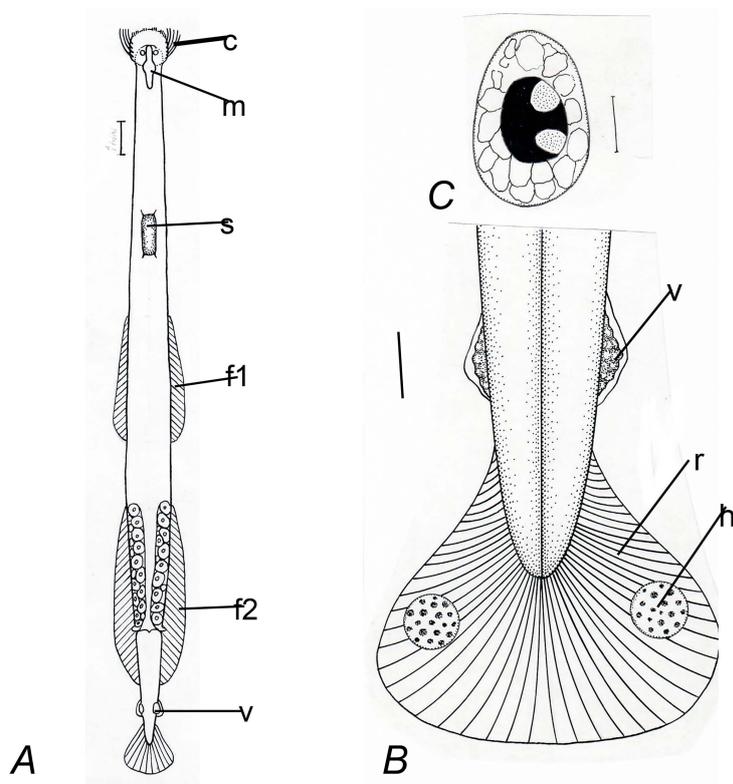


Рис. 1. Общий вид *Sagitta dimitryi* Kassatkina & Vasileva sp. nov. А: с — щетинки; f1 — передний плавник; f2 — задний плавник; f — хвостовой плавник; m — мерцательная петля; s — брюшной ганглий; v — семенной пузырёк. В — задняя часть экземпляра: h — сенсорно-локомоторный орган; r — лучи; v — семенной пузырёк. С — глаз. Шкала: 1 мм (А); 0,5 мм (В); 0,1 мм (С)

Fig. 1. *Sagitta dimitryi* Kassatkina & Vasileva sp. nov. general view. А: c, hooks; f1, front fin; f2, rear fin; f, tail fin; m, corona ciliata; s, ventral ganglion; v, seminal vesicle. В, rear end of the specimen: h, sensory locomotor organ; r, rays; v, seminal vesicle. С, eye. Scale bar: 1 mm (A); 0.5 mm (B); 0.1 mm (C)

Описание голотипа. Голотип SD N1. 82. 2022 (51.3°N, 144.3°E) — половозрелая особь на 4-й стадии полового созревания. Паратип — четыре половозрелые особи из одной пробы планктона, собранной в 82-м рейсе НИС «Профессор Гагаринский».

Длина тела 20,5 мм. Хвостовой отдел 19,5 % от длины тела. Верхний отдел глотки мускулистый, шире средней кишки (рис. 2А, d). Стенка средней кишки не имеет расширенных до вакуолей клеток — таких, как у видов родов *Parasagitta* и *Aidanosagitta* [Касаткина, Столярова, 2010: табл. 3, фото 1 и 3; табл. 21, рис. 3–6]. Дивертикулы отсутствуют, так же как и у всех видов *Sagitta* [Касаткина, Столярова, 2010: табл. 29, рис. 3]. Мерцательная петля короткая, имеет одну пару выпуклостей на уровне туловищно-головной перегородки; петля начинается от мозга, её туловищная часть короче части, лежащей на голове (они почти одинаковой длины). Длина брюшного ганглия составляет 5,8 % от длины тела. Передний край плавников I пары располагается позади заднего конца брюшного ганглия. Промежуток между плавниками I пары и задним концом брюшного ганглия длиннее ганглия в 1,4 раза и составляет 8,3 % от длины тела. Плавник I пары составляет 17,6 % от длины тела, он в 1,4 раза короче плавника II пары, его длина равна длине туловищной части плавников II пары. Промежуток между боковыми плавниками II и I пар немного больше, чем промежуток между брюшным ганглием и плавниками I пары, составляющий около 9 % от длины тела. Плавник II пары составляет по длине 25 % от длины тела, его туловищная часть длиннее хвостовой в 2,3 раза. Лучи в плавниках полные, безлучевых зон нет (рис. 3В). Альвеолярная ткань отсутствует. Сенсорно-локомоторные тельца малочисленны, они имеются на хвостовом плавнике (рис. 1В, h). На голове одна пара рядов щетинок и две пары рядов зубчиков (рис. 2В, a, b). Щетинок — по 7 (рис. 2В, c); передних зубчиков — по 6 (рис. 2В, a); задних зубчиков — по 12 с левой и правой стороны (рис. 2В, b). Глаза имеют слабовеомчатое центральное пигментное пятно (рис. 1С, 3А, g). Семенные пузырьки составляют 2,6 % общей длины тела и 17 % длины хвостового отдела. Они удалены от парных боковых плавников на большое расстояние (примерно в 2 раза большее, чем расстояние между семенными пузырьками и хвостовым плавником). Яичники составляют 15,6 % длины тела, располагаются впереди передних концов плавников II пары. Диаметр яичника равен диаметру яйца в его переднем конце (0,55 мм) или равен размеру скопления незрелых яиц (0,49 мм) в заднем конце. Зрелые яйца крупные, диаметр 0,55 мм, он равен длине семенных пузырьков.

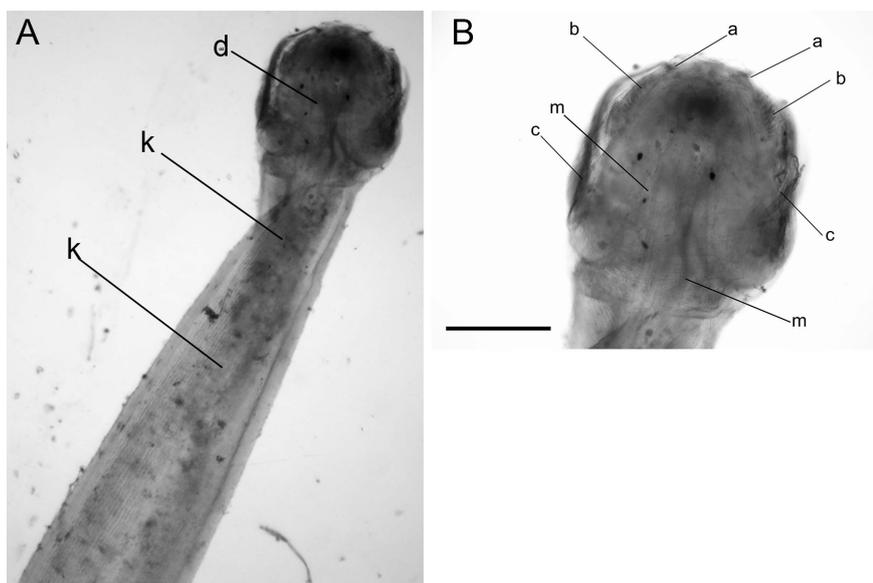


Рис. 2. Голотип. *Sagitta dimitryi* Kassatkina & Vasileva sp. nov. А — передний участок тела с дорсальной стороны (d — глотка; k — передняя кишка). В — голова с дорсальной стороны (a — передние зубчики; b — задние зубчики; c — щетинок; m — мерцательная петля). Шкала: 0,4 мм

Fig. 2. Holotype. *Sagitta dimitryi* Kassatkina & Vasileva sp. nov. А, dorsal view of anterior part of the body (d, pharynx; k, gut). В, dorsal head (a, anterior teeth; b, posterior teeth; c, hooks; m, corona ciliata). Scale bar: 0.4 mm

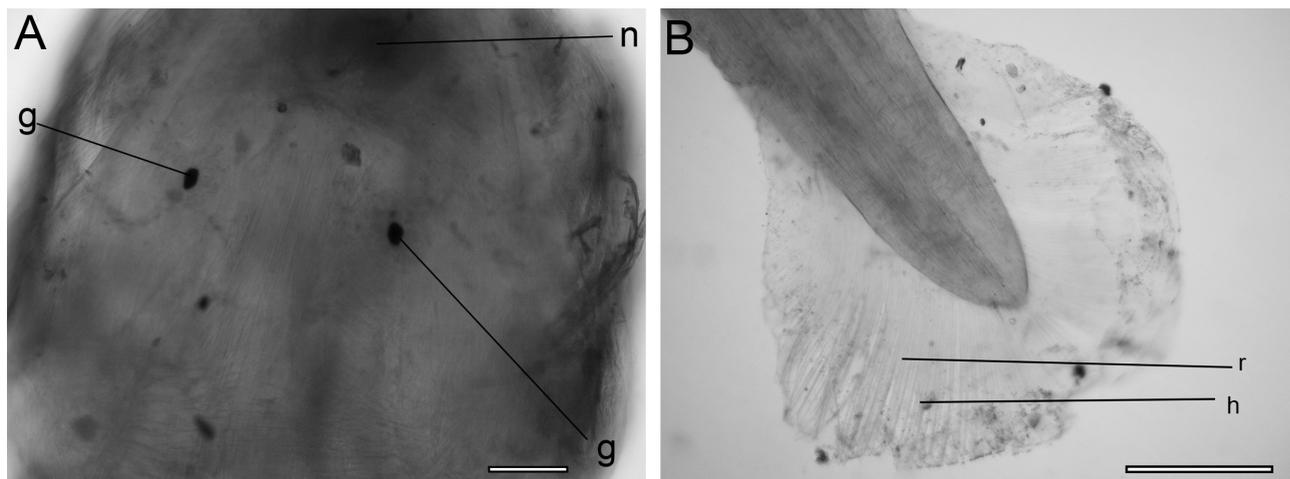


Рис. 3. Голотип. *Sagitta dimitryi* Kassatkina & Vasileva sp. nov. А — участок головы с дорсальной стороны: g — глаза; n — головной ганглий. В — хвостовой плавник: r — лучи. Шкала: 0,1 мм (А); 0,5 мм (В)

Fig. 3. Holotype. *Sagitta dimitryi* Kassatkina & Vasileva sp. nov. А, dorsal side of the head: g, eyes; n, head ganglion. В, tail fin: r, rays. Scale bar: 0.1 mm (А); 0.5 mm (В)

Морфологические признаки неполовозрелых особей *Sagitta dimitryi* sp. nov. Ярким признаком является форма мерцательной петли — с парными выпуклостями на уровне туловищно-головной перегородки; она имеет незначительную величину, большей частью располагается на голове. Петля начинает формироваться уже у зародыша щетинкочелюстных. Её форма и расположение остаются постоянными на всех стадиях полового созревания, поэтому данный орган является надёжным видовым признаком даже для определения неполовозрелых животных, тогда как длина плавников и промежутков между плавниками меняется с ростом животного.

Описание неполовозрелой особи *Sagitta dimitryi* sp. nov. из планктонной пробы, взятой 11.08.1993 с горизонта 55–23 м в 24-м рейсе НИС «Академик Несмеянов», станция 2393 (рис. 4).

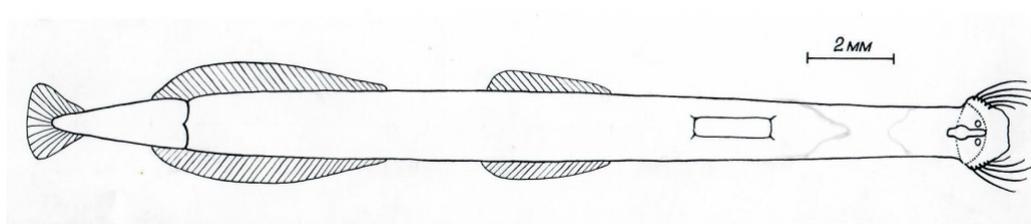


Рис. 4. Общий вид *Sagitta dimitryi* sp. nov. Шкала: 2 мм

Fig. 4. *Sagitta dimitryi* sp. nov. general view. Scale bar: 2 mm

Общая длина тела 11,1 мм. Мускулы ригидные. Хвостовой отдел составляет около 13 % от длины тела. Верхний отдел глотки мускулистый, шире средней кишки (рис. 5, p). Туловищно-хвостовая перегородка широкая, чётко отделяет глотку от средней кишки (рис. 5, s). Средняя кишка с самого начала, от туловищно-хвостовой перегородки, заполнена крупной пищей, которая по форме может ошибочно показаться выростами средней кишки, то есть дивертикулами (рис. 5, f). Однако дивертикулы являются парным органом (с чётко ограниченным эпителием). Дивертикулы у *Sagitta dimitryi* sp. nov. отсутствуют, так же как и у всех видов *Sagitta*. Мерцательная петля короткая, имеет одну пару выпуклостей на уровне туловищно-головной перегородки;

петля начинается от мозга, её туловищная часть короче части, лежащей на голове (они почти одинаковой длины). Длина брюшного ганглия составляет около 8 % длины тела. Передний край плавников I пары располагается позади заднего конца брюшного ганглия. Промежуток между плавниками I пары и задним концом брюшного ганглия немного длиннее ганглия и составляет около 9 % длины тела. Плавник I пары составляет 13 % длины тела, он в 1,8 раза короче плавника II пары и короче туловищной части плавников II пары. Промежуток между боковыми плавниками II и I пар немного больше, чем расстояние между брюшным ганглием и плавниками I пары, составляющее около 9 % длины тела. Плавник II пары составляет по длине около 20 % длины тела, его туловищная часть длиннее хвостовой в 5,7 раза. Лучи в плавниках полные, безлучевых зон нет (рис. 3В). Альвеолярная ткань отсутствует. На голове одна пара рядов щетинок и две пары рядов зубчиков. Щетинок — по 5; передних зубчиков — по 3; задних зубчиков — по 7.

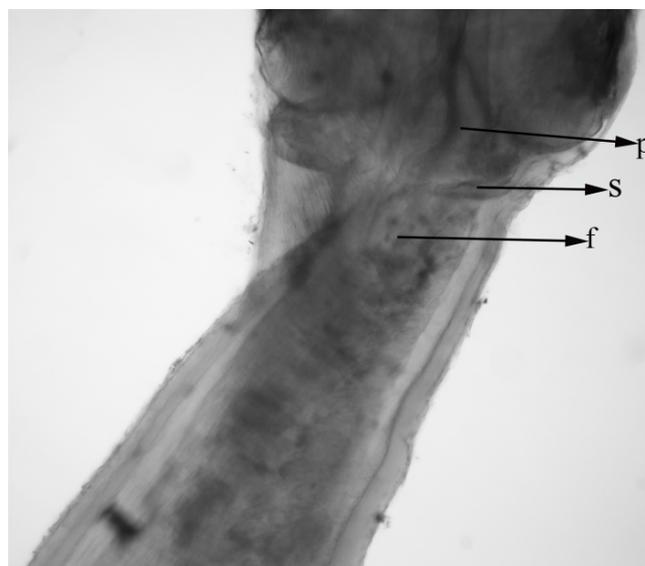


Рис. 5. Передний участок тела *Sagitta dimitryi* sp. nov. с дорсальной стороны: p — передняя кишка; s — туловищно-головная перегородка; f — комок пищи

Fig. 5. Dorsal view of anterior part of *Sagitta dimitryi* sp. nov. body: p, pharynx; s, trunk-tail septum; f, lump of food

Описание неполовозрелой особи *Sagitta dimitryi* sp. nov. из планктонной пробы, взятой 08.08.1949 с горизонта 200–0 м в экспедиции Зоологического института РАН, станция 75. Длина 9,5 мм. Длина брюшного ганглия составляет около 8 % длины тела (совпадает с длиной ганглия у особи длиной 11,1 мм). Остальные параметры не совпадают (хвостовой отдел 1,7 мм, 18 %).

Описание неполовозрелой особи *Sagitta dimitryi* sp. nov. из планктонной пробы, взятой 20.08.1965 с горизонта 75–0 м в экспедиции НИС «Байдар». Длина 10,5 мм. Длина брюшного ганглия составляет около 7,9 % длины тела (почти совпадает с длиной ганглия у особи длиной 11,1 мм). Остальные параметры не совпадают (хвостовой отдел 1,5 мм, 13 %).

Дифференциальный диагноз. Новый вид отличается от *Sagitta nagea*, *S. bedoti* и *S. pulchra* положением I пары плавников относительно брюшного ганглия. От видов *S. bruuni*, *S. izuensis* и *S. abyssicola* наши экземпляры отличаются не только положением передней пары плавников, но и тем, как расположены семенные пузырьки относительно плавников (хвостового и боковых). От *S. euneritica* и *S. modesta* новый вид отличается длиной промежутка между задним концом брюшного ганглия и плавниками I пары (у них этот промежуток короче ганглия). Кроме того, новый вид отличается от *S. modesta* отсутствием безлучевой зоны в хвостовом плавнике.

Sagitta nutana ближе всех к новому виду (по расположению семенных пузырьков и длине промежутка между ганглием и передними плавниками). Тем не менее у *S. nutana* с дорсальной стороны есть обширная альвеолярная ткань, которой нет у особей нового вида, а мерцательная петля у *S. nutana* не имеет выпуклостей. От *S. glacialis* новый вид отличается формой и длиной мерцательной петли и отсутствием альвеолярной ткани (у *S. glacialis* мерцательная петля не имеет выпуклостей, её часть на туловищном отделе в 2,5 раза больше части, расположенной на голове). От *S. setosa* новый вид отличается расположением семенных пузырьков: у *S. setosa* они плотно прилегают к боковым плавникам. От *S. sublica* новый вид отличается наличием полных лучей в плавниках и длинных плавников I пары, а также более коротким промежутком тела между брюшным ганглием и плавниками I пары.

Распространение. Половозрелые особи нового вида обнаружены с охотоморской стороны Сахалина в прибрежной, неритической зоне. Неполовозрелые особи вида выловлены как в неритической зоне, так и в центральной части Охотского моря. На протяжении нескольких лет мы встречали в открытой части Охотского моря сотни неполовозрелых особей вида, но не имели возможности его описать, так как новые виды можно описывать только по зрелым животным. Возможно, половозрелые животные приходят на размножение в прибрежную зону. Отмечено, что половозрелые особи после вымётывания яиц уходят на глубину, часть популяции продолжает существовать и размножается повторно [Касаткина, Стоярова, 2010; Alvaríño, 1968; Russel, 1932]. Существует предположение, что уход отметавших оплодотворённые яйца взрослых животных из зоны икротетания является стратегией сохранения вида [Russel, 1932].

Для того чтобы показать отличия нового вида от остальных видов этого рода, приводим ключ для определения половозрелых животных всех известных в мировой фауне видов рода *Sagitta* (определяющие ключи не включают животных на ранних стадиях полового созревания).

Ключ для определения половозрелых особей видов и подвидов *Sagitta* s. str. мировой фауны

- 1 (2) Передний конец плавников II пары и задний конец плавников I пары выглядят сросшимися с вентральной и дорсальной сторон. Однако с боковой стороны видно, что плавники не соприкасаются, а расположены параллельно друг другу *S. sceptrum*
- 2 (1) Передний и задний плавники удалены друг от друга 3
- 3 (4) Плавники I пары начинаются впереди переднего конца брюшного ганглия *S. nageae*
- 4 (3) Плавники I пары начинаются позади переднего конца брюшного ганглия 5
- 5 (10) Плавники I пары начинаются почти на середине брюшного ганглия 6
- 6 (15) Плавники I пары начинаются впереди заднего конца брюшного ганглия 7
- 7 (10) Передние плавники длиннее задних плавников 8
- 8 (9) Семенные пузырьки находятся вплотную как к боковым плавникам, так и к хвостовому плавнику *S. bedoti*
- 9 (8) Семенные пузырьки удалены от боковых плавников и соприкасаются с хвостовым плавником *S. pulchra*
- 10 (5) Плавники I пары начинаются на уровне заднего конца брюшного ганглия 11
- 11 (12) Семенные пузырьки касаются как боковых плавников, так и хвостового плавника *S. bruuni*
- 12 (11) Семенные пузырьки удалены или от боковых плавников, или от хвостового плавника ... 13
- 13 (14) Семенные пузырьки удалены от боковых плавников и касаются хвостового плавника *S. izuensis*
- 14 (13) Семенные пузырьки касаются боковых плавников и удалены от хвостового плавника *S. abyssicola*
- 15 (6) Плавники I пары начинаются позади заднего конца брюшного ганглия 16

- 16 (17) Промежуток между задним концом брюшного ганглия и плавниками I пары составляет менее $\frac{1}{2}$ длины ганглия *S. bipunctata*
- 17 (16) Промежуток между задним концом брюшного ганглия и плавниками I пары равен или больше $\frac{1}{2}$ длины ганглия 18
- 18 (21) Промежуток между задним концом брюшного ганглия и плавниками I пары больше $\frac{1}{2}$ длины ганглия, но короче ганглия 19
- 19 (20) Семенные пузырьки касаются боковых плавников и незначительно удалены от хвостового плавника. Хвостовой плавник с полными лучами, безлучевых зон нет *S. euneritica*
- 20 (19) Семенные пузырьки удалены от боковых и хвостового плавников на значительное расстояние. Хвостовой плавник имеет внутреннюю безлучевую зону *S. modesta*
- 21 (18) Промежуток между задним концом брюшного ганглия и плавниками I пары больше $\frac{1}{2}$ длины ганглия и длиннее ганглия 22
- 22 (25) Промежуток между задним концом брюшного ганглия и плавниками I пары превышает длину ганглия, но не более чем в 1,5 раза 23
- 23 (24) Мерцательная петля ровная, без выступов, большая часть петли находится на туловищном отделе, а не на голове *S. nutana*
- 24 (23) Мерцательная петля с парными выступами, большая часть петли находится на головном отделе, а не на туловищном отделе *S. dimitryi sp. nov.*
- 25 (22) Промежуток между задним концом брюшного ганглия и плавниками I пары превышает длину ганглия более чем в 1,5 раза 26
- 26 (29) Во всех плавниках безлучевых зон нет *S. glacialis*
- 27 (28) Относительная длина хвостового отдела превышает 17 %, длина плавников I пары превышает 13 %, а длина плавников II пары превышает 19 % длины тела *S. glacialis glacialis*
- 28 (27) Относительная длина хвостового отдела не превышает 17 %, длина плавников I пары не превышает 13 %, а длина плавников II пары не превышает 19 % длины тела *S. glacialis baltica*
- 29 (26) В плавниках могут быть безлучевые зоны 30
- 30 (35) Семенные мешочки или соприкасаются с боковыми плавниками, или удалены от них на расстояние, которое значительно короче мешочков 31
- 31 (32) Семенные мешочки соприкасаются с боковыми плавниками и удалены от хвостового плавника *S. setosa*
- 32 (31) Семенные мешочки удалены от боковых плавников и не соприкасаются с хвостовым плавником 33
- 33 (34) Мерцательная петля не имеет выпуклостей *S. euxina*
- 34 (33) Мерцательная петля имеет парные выпуклости *S. sublica*
- 35 (30) Семенные мешочки удалены от боковых плавников и почти соприкасаются с хвостовым плавником, это расстояние между мешочками и хвостовым плавником различимо только под большим увеличением *S. kussakini*

Род *Sagitta* морфологически ближе, чем *Parasagitta*, к древним Chaetognatha, называемым протоконодонтами. Это *Parmia anastassiae* [Gnilovskaya, 1998] из слоёв протерозоя северо-востока Русской платформы (возраст 1 млрд лет) [Gnilovskaya et al., 2000]. Их эволюция, направленная в сторону увеличения сложности организации (появление хватательных крючьев-щетинок, глаз, мерцательной петли), была ответом на оксигенацию среды, а её целью была защита метаболических путей [Fedonkin, 2003: с. 10].

Можно предположить, что таким орудием, щетинками, древние хетогнаты соскребали с бактериальных матов одноклеточные организмы, которыми питались, так же как это делали протоартикуляты [Иванцов, 2011].

Размеры пищи соответствовали ширине кишечника, поэтому у древних Chaetognatha (*P. anastassiae*) отсутствовали кишечные дивертикулы. Их отсутствие зарегистрировано и у *Protosagitta spinosa* [Hu, 2005] из нижнего кембрия (540–520 млн лет). Возможно, более крупной добычи в венде и нижнем кембрии ещё не было [Fedonkin, 2003; Hu, 2005]. Этот древний морфологический признак (отсутствие дивертикул, узкий кишечник) сохранился у некоторых современных Chaetognatha. Эволюция Chaetognatha (повышение уровня организации или деградация общего строения) полностью зависит от внешних факторов среды [Gasmi et al., 2014; Kasatkina, 2022]. Увеличение ширины кишечника в эволюции (появление дивертикул) отмечено у *Paucijaculum samamithion* Schram, 1973 (палеозойская эра, каменноугольный период, из слоя пенсильванского подпериода). Предположительно, это было связано с возможностью питания более крупной добычей.

Для хетогнат с кишечными дивертикулами Т. Токиока [1965] создал род *Parasagitta*, по остальным морфологическим признакам близкий к роду *Sagitta*. В 1847 г. J. Müller описал вид *Sagitta setosa* [Müller, 1847] и дал чёткие рисунки, на которых ясно видна средняя кишка без дивертикул. Однако некоторые авторы, например [Müller et al., 2019], ошибочно относили вид *S. setosa* к роду *Parasagitta*, имеющему дивертикулы. Исследованиями генетиков установлено, что ветви с видами рода *Parasagitta* чётко отличаются от ветви с видами рода *Sagitta* [Gasmi et al., 2014]. Мы также считаем, что наличие дивертикул на туловищной (средней) кишке является родовым признаком в таксономии щетинкочелюстных. Вид *S. setosa* нельзя относить к *Parasagitta*. Мы добавили *S. setosa* в «Ключ для определения видов и подвидов *Sagitta* s. str. мировой фауны».

Щетинкочелюстные — чувствительный и удобный показатель состояния морской среды. Любые её антропогенные загрязнения, в частности радиоактивное, вызывают изменение формы тела и органов этих животных [Kassatkina et al., 2017]. По форме изменений в тканях щетинкочелюстных и по проценту аномальных особей в пробах можно предсказывать приближение такого стихийного бедствия, как землетрясение: при его приближении кишечные стенки (рис. 2А, к) разрушаются, симметрия глаз (рис. 3А, г) нарушается, а центральное пигментное пятно исчезает. Повышенные уровни радиоактивности морской воды действуют на плавники щетинкочелюстных: лучи на плавниках (рис. 3В, г) выпирают за пределы пластинки плавников [Kasatkina, 1995; Kassatkina, Stolyarova, 2016].

Заключение. Находка нового вида щетинкочелюстных пополняет наши знания о биоразнообразии морей. Сравнительный анализ морфологических особенностей обнаруженного вида показал, что отсутствие дивертикул кишки сближает *Sagitta dimitryi* sp. nov. с ископаемыми и с некоторыми современными видами. Появление в эволюции нового органа (дивертикул), предположительно, произошло в результате возникновения возможности животных питаться более крупной добычей. По общей морфологии род *Sagitta* s. str. наиболее близок к роду *Parasagitta*. Тем не менее генетические исследования показали обособленность этих двух родов. По расположению плавников и промежутку между ганглием и передними плавниками, по расположению семенных пузырьков, а также по наличию промежутка между задними и передними плавниками, отсутствию альвеолярной ткани и наличию выпуклостей мерцательной петли на уровне туловищно-головной перегородки *S. dimitryi* sp. nov. является самостоятельным, новым для науки видом. Этот вид хорошо отличим от видов рода *Sagitta*, что отражено в таблице «Ключ для определения видов и подвидов *Sagitta* s. str. мировой фауны».

Этимология. Вид *Sagitta dimitryi* Kassatkina & Vasileva sp. nov. назван в честь историка, известного писателя Дмитрия Александровича Касаткина, светлая ему память.

Работа выполнена по теме государственного задания ТОИ ДВО РАН № 11 (2021–2023 гг.), регистрационный номер 121021500052-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Иванцов А. Ю. Следы питания проартикулят – вендских многоклеточных животных // *Палеонтологический журнал*. 2011. № 3. С. 3–13. [Ivanzov A. Yu. Feeding traces of Proarticulata – the Vendian Metazoa. *Paleontologicheskii zhurnal*, 2011, no. 3, pp. 3–13. (in Russ.)]
2. Касаткина А. П. Массовые аномалии в планктоне окраинных морей и сопредельных вод Тихого океана // *Доклады Академии наук*. 1995. Т. 345, № 6. С. 845–848. [Kasatkina A. P. Mass anomalies in plankton of marginal seas and adjacent waters of the Pacific Ocean. *Doklady Akademii nauk*, 1995, vol. 345, no. 6, pp. 845–848. (in Russ.)]
3. Касаткина А. П., Столярова М. В. *Морфология, систематика, экология щетинкочелюстных Японского моря и сопредельных акваторий*. Владивосток : Дальнаука, 2010. 260 с. [Kasatkina A. P., Stolyarova M. V. *Morphology, Taxonomy, Ecology of Chaetognatha of the Japan Sea and Adjacent Water Areas*. Vladivostok : Dal'nauka, 2010, 260 p. (in Russ.)]
4. Малахов В. В., Березинская Т. Л. Организация кровеносной системы щетинкочелюстных (Chaetognatha) // *Доклады Академии наук*. 2001. Т. 376, № 4. С. 566–568. [Malakhov V. V., Berezinskaya T. L. The structure of the hemal system in Chaetognatha. *Doklady Akademii nauk*, 2001, vol. 376, no. 4, pp. 566–568. (in Russ.)]
5. Abric P. Sur la systematique des Chaetognathes. *Comptes Rendus Sciences de l'Académie*, 1905, vol. 141, pp. 222–224.
6. Alvaríño A. Egg pouches and other reproductive structure in pelagic Chaetognatha. *Pacific Science*, 1968, vol. 22, no. 4, pp. 488–492. <http://hdl.handle.net/10125/12573>
7. Fedonkin M. A. The origin of the Metazoa in the light of the Proterozoic fossil record. *Paleontological Research*, 2003, vol. 7, iss. 1, pp. 9–41. <https://doi.org/10.2517/prpsj.7.9>
8. Gasmi S., Nve G., Pech N., Tekaya S., Gilles A., Perez Y. Evolutionary history of Chaetognatha inferred from molecular and morphological data: A case study for body plan simplification. *Frontiers in Zoology*, 2014, vol. 11, art. no. 84 (25 p.). <https://doi.org/10.1186/s12983-014-0084-7>
9. Gnilovskaya M. B. The oldest annelidomorphs from the upper Riphean of Timan. *Doklady Akademii nauk*, 1998, vol. 359, no. 3, pp. 334–337.
10. Gnilovskaya M. B., Becker Yu. R., Veis A. F., Olovyanishnikov V. G., Raaben M. E. Pre-Ediacaran fauna of Timan (Upper Riphean annelidomorphs). *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya*, 2000, vol. 8, no. 4, pp. 327–352.
11. Hu S. X. Taphonomy and palaeoecology of the early Cambrian Chengjiang biota from Eastern Yunnan, China. *Berliner paläobiologische Abhandlungen*, 2005, vol. 7, pp. 1–197.
12. Kasatkina A. P. Taxonomic composition and keys for identification of *Eukrohnia* Tokioka, 1965 (Chaetognatha) with description of the new bathypelagic species *Eukrohnia helgae* sp. nov. from the Laptev Sea to the west of the Lomonosov Ridge. *Cahiers de Biologie Marine*, 2022, vol. 63, no. 2, pp. 93–102.
13. Kassatkina A. P. New species of the genus *Sagitta* sensu str. (Chaetognatha) from the Sea of Japan with description of an original staining and dissection technique. *Zoosystematica Rossica*, 2008, vol. 17, no. 1, pp. 3–6. <https://doi.org/10.31610/zsr/2008.17.1.3>
14. Kassatkina A. P. Review of the genera of the family Sagittidae with separation of a new subfamily and description of a new species of the genus *Sagitta* from the Sea of Japan (Chaetognatha). *Zoosystematica Rossica*, 2007, vol. 16, no. 2, pp. 157–162. <https://doi.org/10.31610/zsr/2007.16.2.157>
15. Kassatkina A., Stolyarova M. Marine animals Chaetognatha as bioindicators of geophysical activity. *Ecology and Safety*, 2016, vol. 10, pp. 339–348.
16. Kassatkina A., Stolyarova M., Sergeev A. Morphological changes in marine planktonic animals Chaetognatha under radiation exposure. *Ecology and Safety*, 2017, vol. 11, pp. 211–219.
17. Müller J. Fortsetzung des Berichts über einige neue Thierformen der Nordsee. *Archive Anatomische Physiologische und wissenschaftliche Medicin*, 1847, S. 157–179.
18. Müller C. H. G., Harzch S., Perez Y. Chaetognatha. In: *Handbook of Zoology. Miscellaneous Invertebrates* / A. Schmidt-Rhaesa (Ed.). Berlin : De Gruyter 2019, pp. 163–283.
19. Ritter-Záhony R. Revision der Chätognathen. In:

- Deutsche Südpolar-Expedition*. 1901–1903, 1911, Bd. 13, Zool. 5, Heft 1, S. 1–72.
20. Russel F. S. On the biology of *Sagitta*. The breeding and growth of *Sagitta elegans* Verrill in the Plymouth area, 1930–1931. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1932, vol. 18, iss. 1, pp. 131–145. <https://doi.org/10.1017/S0025315400051353>
21. Slabber M. *Natuurkundige Verlustingen: behelzende microscopise Waarnemingen van inen uitlandse Water en Land-Dieren*. Te Haarlem : by J. Bosch, 1769, St. 6, Pl. 6, S. 47.
22. Tokioka T. The taxonomical outline of Chaetognatha. *Publications of Seto Marine Biological Laboratory*, 1965, vol. 12, no. 5, pp. 335–357. <http://hdl.handle.net/2433/175381>

**A NEW SPECIES OF ARROW WORMS,
SAGITTA DIMITRYI SP. NOV. (CHAETOGNATHA, SAGITTOIDEA),
FROM THE SEA OF OKHOTSK (NORTHWEST SAKHALIN)**

A. Kasatkina and L. Vasileva

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

A new species of chaetognaths, *Sagitta dimitryi* sp. nov., was discovered in the waters of the Sea of Okhotsk, near the northwestern part of Sakhalin. The aim of this article is to describe the new species. A table of identification keys for species of the genus *Sagitta* is given, including *Sagitta dimitryi* sp. nov. The relationship of modern *Sagitta* with ancient Chaetognatha is discussed, including possible reasons for the evolution of the intestinal apparatus.

Keywords: *Sagitta dimitryi* sp. nov., Chaetognatha, Sakhalin, Sea of Okhotsk

UDC 579.843(262.5+262.54)

BIOLUMINESCENT BACTERIA OF THE BLACK SEA AND SEA OF AZOV

© 2024 A. Katsev¹, I. Sazykin², L. Khmelevtsova², S. Safronyuk¹, Sh. Karchava²,
M. Klimova², M. Khammami², and M. Sazykina²

¹Institute of Biochemical Technology, Ecology, and Pharmacy, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation

²Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation
E-mail: katsev@mail.ru

Received by the Editor 10.05.2023; after reviewing 20.11.2023;
accepted for publication 27.08.2024; published online 09.09.2024.

The aim of the present study was to isolate bioluminescent strains from the northern Black Sea and Sea of Azov, analyze their morphological and biochemical characteristics, and identify them based on 16S rRNA, *recA*, and *gyrB* gene sequences. Nine isolates were isolated from hydrobionts, and twelve, from seawater. Results of biochemical and molecular genetic identification revealed that isolated luminous strains represent the genera *Vibrio*, *Aliivibrio*, and *Photobacterium*. All five cultivated luminescent strains isolated from water and hydrobionts of the Sea of Azov belong to the species *Photobacterium leiognathi*. Cultivated luminous bacteria of the Black Sea are assigned to the genera *Aliivibrio* and *Vibrio*. The genus *Aliivibrio* is represented by two *Aliivibrio fischeri* strains related to various hydrobionts. Fourteen strains of the genus *Vibrio* belong to the species *Vibrio campbellii*, *V. jasicida*, *V. harveyi*, *V. owensii*, and *V. aquamarinus* sp. nov. Thus, it was shown that taxonomic composition of the cultivated luminescent bacteria differs greatly in the Black Sea and Sea of Azov.

Keywords: luminous bacteria, identification, taxonomic composition, biodiversity, Black Sea, Sea of Azov

Currently, bacteria are among the most common model biological objects in basic and applied research. Out of them, bioluminescent bacteria are a special natural phenomenon. Those are intensively studied all over the world and used in solving various problems of biology, genetics, and biotechnology.

Bioluminescence of bacteria formed the basis of many analysis methods widely applied in practice. These are bioluminescent testing of humoral and cellular bactericidal blood systems *in vitro* and study of the characteristics of the infectious process on models *in vivo* [Deryabin, 2009]. In the practical application of bioluminescent bacteria, a significant role is played by the analysis of the integral toxicity of various natural environments. Natural and recombinant luminescent microorganisms have become a recognized tool for environmental monitoring [Baumstark-Khan et al., 2007; Chugunova et al., 2016; Ivask et al., 2007; Niu et al., 2008; Sazykin et al., 2015, 2016; Sönmez et al., 2016; Tsybulskii, Sazykina, 2010] and analysis of new substances and materials [Kovalenko et al., 2013; Kuryanov et al., 2011; Zheng et al., 2010].

Luminescent bacteria studies served as the basis for the discovery of quorum sensing – a phenomenon of general biological significance [Taga, Bassler, 2003]. First, this genetic mechanism was noted in marine luminous bacteria *Aliivibrio fischeri* and *Vibrio harveyi*; later, it was found in many other species of bacteria as a regulator of manifestations of numerous properties, including pathogenic ones. Thus, bacterial bioluminescence opens up exceptional methodological opportunities in a variety of applications

in biology, ecology, and medicine. Despite noticeable progress in the investigation of physiology, biochemistry, and genetics of luminous bacteria, many issues of their species composition and distribution in ecosystems remain unclear.

Bioluminescent bacteria are widespread in nature [Ast et al., 2009; Baumann, et al., 1984; Dunlap, Urbanczyk, 2013; Thompson et al., 2004; Urbanczyk et al., 2011]. The list of luminescent bacteria is being expanded by both discovering new species [Ast et al., 2007; Cano-Gómez et al., 2010; Gomez-Gil et al., 2003; Lucena et al., 2012; Wang et al., 2010; Yoshizawa et al., 2009a, b, 2010a, b, 2012] and reclassification of long-known ones [Labella et al., 2017; Thompson et al., 2003; Urbanczyk et al., 2007]. However, due to anthropogenic load, the composition of biological species in ecosystems often changes. In many cases, the only ways to preserve natural biodiversity, *inter alia* that of microorganisms, are to carry out a detailed analysis of natural communities of luminescent bacteria by species and environmental criteria and to provide preservation of biological genotypes in collections.

Bioluminescent bacteria of the Black Sea and Sea of Azov remain poorly studied [Katsev, 2002; Katsev, Makemson, 2006; Maligina, Katsev, 2003; Tsybulskii, Sazykina, 2010]. Species composition of luminescent bacteria and their spatial distribution are of great interest due to features of these water areas. One of the key peculiarities of the Black Sea and Sea of Azov is the fact that many rivers flow into them; this results in lower salinity compared to values for other seas and oceans (16–18‰ for the Black Sea and 10–13‰ for the Sea of Azov).

A distinguishing feature of these water areas is noticeable seasonal variation in temperature which is more typical for the shallow Sea of Azov. This sea is also characterized by higher values of water temperature in summer, which, along with low salinity, leads to higher biological activity and more significant biodiversity compared to those for the Black Sea. Therefore, the aim of this work was to study species composition, biochemical properties, and characteristics of the distribution of luminous bacteria in coastal waters of the northern Black Sea and Sea of Azov.

MATERIAL AND METHODS

Sampling. To isolate bacteria in the northern coastal zone of the Black Sea and Sea of Azov, seawater and various hydrobionts were sampled May to October 2016–2018 (Fig. 1). The samples were placed in sterile containers and transported to a laboratory for further processing, which was carried out no later than 24 h after sampling. Details of the sampling location and their characteristics are provided in Table 1.



Fig. 1. Sampling sites for the isolation of luminescent bacteria

Рис. 1. Места отбора образцов для выделения люминесцентных бактерий

Table 1. Description of sampling sites**Таблица 1.** Места отбора проб и их характеристики

Site No.	Sample (water/hydrobiont)	Site	Location	
The Black Sea				
1	Water	Kerch city	N45.254692°	E36.430439°
2	Water	Kerch city	N45.230556°	E36.414444°
3	Water	Sudak city	N44.840932°	E34.964564°
4	Water	Malyi Mayak village	N44.603173°	E34.372549°
5	Water	Partenit village	N44.559875°	E34.346913°
6	Water	Partenit village	N44.572081°	E34.346930°
7	Water	Sudak city	N44.831895°	E34.987922°
8	Water	Solnechnaya Dolina village	N44.863852°	E35.138874°
9	Water	Alushta city	N44.647252°	E34.401669°
10	Water	Partenit village	N44.561823°	E34.347663°
11	The Mediterranean mussel <i>Mytilus galloprovincialis</i>	Sudak city	N44.816742°	E35.049346°
12		Alushta city	N44.633788°	E34.392279°
13		Sevastopol city	N44.441391°	E33.640501°
14		Partenit village	N44.549120°	E34.347217°
15	The horse mackerel <i>Trachurus trachurus</i>	Sudak city	N44.797715°	E35.070433°
16	The brown shrimp <i>Crangon crangon</i>	Alushta city	N44.696810°	E34.444220°
The Sea of Azov				
17	Water	Shchelkino town	N45.426850°	E35.809528°
18	Water	Shchelkino town	N45.445819°	E35.846986°
19	Gobiidae gen. sp. (Pisces)	Shchelkino town	N45.451294°	E35.820341°
20	The Mediterranean green crab <i>Carcinus aestuarii</i>	Shchelkino town	N45.452265°	E35.852640°
21	Amphipoda fam. gen. sp.	Shchelkino town	N45.416109°	E35.791470°

Isolation of luminescent bacteria. After transportation to the laboratory, water samples were concentrated by filtration through a 0.45- μ m membrane filter (Sartorius AG, Germany). The volume of the filtration sample varied within 10–50 mL depending on seawater temperature. After sample concentration, the filter was placed on the surface of solid media (HiMedia, India) containing 3% of sodium chloride. In summer (July and August), plating of water on a solid medium was carried out without *prior* concentration. In total, 200–500 μ L of samples were applied to the surface of the nutrient agar in a Petri dish. The samples were incubated at +15...+25 °C, with periodical visual analysis of the results in a dark room. Upon detection of luminescent spots on the surface of the nutrient medium, pure bacterial culture was isolated by standard microbiological techniques.

Also, experimentally designed selective media based on water salinity in the sampling site were used for isolation of luminescent bacteria [Patent 2358009 RU, 2009; Patent 2368658 RU, 2009]. Bioluminescent bacteria were isolated, and the media were prepared as described in [Tsybulskii, Sazykina, 2010]. To isolate luminescent bacteria from fish samples, pieces of biomaterial less than 1–2 cm in size were placed in a sterile container and $\frac{2}{3}$ covered with 3% solution of sodium chloride. Following incubation, bioluminescence analysis and bacteria isolation were carried out as described above. When using other hydrobionts as sources for bacteria isolation, those were removed from their shells (mussels), or chitinous exoskeleton (crabs and shrimps) was broken; then, biological material (samples 1–2 cm

in size) was processed as described above using 3% solution of sodium chloride. The isolated pure cultures of luminescent bacteria were stored as museum cultures in semi-liquid agar under a vaseline oil layer.

Identification of luminescent bacteria. Bacteria were identified by standard microbiological techniques. Morphological properties of bacteria, as well as their growth and bioluminescence characteristics, were evaluated at different temperatures (+10, +20, +25, +30, +35, +37, and +44 °C) and NaCl contents (0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, and 8%). Also, their enzymatic properties and ability to ferment various sugars (maltose, D-mannitol, and sucrose) were examined.

Bioluminescence kinetics. To study the kinetics of the luciferase reaction, enzyme preparations isolated from biomass of luminescent bacteria were used. Bacteria were cultivated, and the biomass was accumulated on a liquid nutrient medium under constant stirring at the optimal for each isolate temperature for 24 h. Bacterial cells were separated from the medium by centrifugation at 5,000 rpm for 30 min. The obtained biomass was washed with a 3% sodium chloride solution; then, it was suspended in a 0.01 M phosphate buffer in the ratio of 1 / 10 (biomass / buffer solution), pH = 7.0, at +4 °C. Cell destruction was carried out by 3-fold freezing–thawing, additionally using ultrasonic treatment and avoiding temperature increase of the samples to values above +15 °C. Leftover cellular debris was separated by centrifugation at 5,000 rpm for 30 min. The enzyme preparation containing luciferase was isolated from the resulting supernatant by ammonium sulphate precipitation, 25–80% of saturation.

To evaluate the kinetic characteristics of luciferase reaction, the protein precipitate obtained at the previous stage was dissolved in 0.1 M phosphate buffer, pH of 7.0. Then, 500 µL of 0.1 M phosphate buffer, pH of 7.0, 20–50 µL of the enzyme preparation (working dilutions were selected experimentally for each strain separately), and 20 µL of the 0.001% aqueous suspension of dodecanal (Sigma-Aldrich) were mixed in a chemiluminometer cuvette. The suspension of aldehyde was prepared by solvent exchange method. Dodecanal solution in ethanol was mixed with water in ratio 1 : 100. Luciferase reaction was initiated by adding 400 µL of photoreduced FMNH₂ (Sigma-Aldrich) at the concentration of 5×10^{-5} M containing 1×10^{-3} M of Trilon B. Bioluminescent signal was registered for 5 min after adding FMNH₂ till complete luminescence decay. The obtained graphical dependence of bioluminescence intensity on time was used for calculating the constant of the first-order bioluminescence decay rate (k , s⁻¹):

$$k = (\ln I_0/I)/t ,$$

where I_0 and I are intensity of bioluminescence at the initial moment and after the time period t , respectively.

Also, according to the diagrams, half-decay time of bioluminescence ($t_{1/2}$, s) was determined. Bioluminescence intensity dependence on time was recorded with a chemiluminometer Lum 100 (DISoft Ltd, Russia).

Molecular characteristics. Isolation of genomic DNA from microbial isolates. For the purpose of molecular genetic identification, total genomic DNA was isolated from the isolates. To isolate genomic DNA, the overnight culture of microorganisms was grown in 50-mL Erlenmeyer flasks on a liquid LB medium with addition of 3% NaCl. Twenty mL of medium was introduced into a flask and cultivated for 18 h in an incubator shaker at +25 °C and 170 rpm. Bacterial cells were precipitated by centrifugation in 2-mL screw-cap microtubes at 6,000 g for 2 min; ~ 75 mg of glass beads, 0.25 mm in diameter, was added to the obtained precipitate.

Then, 350 µL of guanidine solution (guanidine HCl 240 mM), 350 µL of detergent solution (Tris-HCl 500 mM, pH 8.0; SDS 2%, laurylsarcosinate 4%), and 400 µL of phenol-chloroform mixture were introduced into the tubes. Cells were destroyed by shaking on a laboratory vibrating mill Mixer Mill MM 400 (Retsch, Germany) for 2 min with a shaking frequency of 30 Hz. After that, the tubes were centrifuged for 7 min at 14,000 g; supernatant was taken; and 400 µL of chloroform

was added to it and thoroughly mixed with a vortex. Then, it was centrifuged as in the previous step. Subsequently, the aqueous phase was separated, and DNA was precipitated with an equal volume of isopropanol. The precipitate was washed twice with 70% ethanol, dried, and dissolved in 100 μ L of deionized water. Discrete PCR amplicon bands were resolved on agarose gel. The PCR amplicon was purified to remove contaminants by the Cleanup Standard kit (Evrogen, Russia).

16S rRNA, *recA*, and *gyrB* gene amplification. To identify the isolated strains, amplification of 16S rRNA gene, as well as housekeeping genes encoding recombinase A (*recA*) and DNA gyrase B subunit (*gyrB*), was carried out. It was followed by determination of their nucleotide sequence. Sequencing of 16S rRNA gene and *gyrB* and *recA* housekeeping genes was performed by Sanger method [Sanger et al., 1977]. The structure of the primers used to obtain the target amplicons was taken from [Ast et al., 2009] and is shown in Table 2. Comparison of the sequence data and their differentiation was carried out using BLAST (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/>). Phylogenetic relationships among submitted species were examined by means of MEGA X [Kumar et al., 2018]. Phylogenetic tree was constructed by neighbor-joining. A bootstrap analysis to investigate the stability of the tree was performed in 1,000 replicates. Also, the sequences of the following reference strains (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>) were added to the phylogenetic tree for comparison: *Vibrio harveyi* SB1 (NZ_CP125875.1), *Vibrio campbellii* BoB-53 (NZ_CP026321.1), *Photobacterium leiognathi* subsp. *mandapamensis* Lk8.2 (NZ_CP131594.1), *Aliivibrio wodanis* Vw11 (LR813705.1), and *Aliivibrio logei* 6Go0121 (MZ005969.1).

Table 2. The structure of the primers used to obtain the target amplicons

Таблица 2. Структура праймеров, используемых для получения целевых ампликонов

Gene	Forward primer sequence (5'-3')	Reverse primer sequence (5'-3')	Amplicon size (bp)
16S rRNA	AGAGTTTGATCCTGGCTCAG	TACGGYTACCTTGTACGACTT	~ 1,500
<i>recA</i>	TCAAATTGAAAAACAATTTGGTAAAGG	ATCTTATCACCATGTAGCTGTACC	~ 900
<i>gyrB</i>	GAAGTTATCATGACGGTACTTC	AGCGTACGAATGTGAGAACC	~ 1,200

To amplify the target genes, the following PCR modes were used. For 16S RNA gene, +95 °C – 2 min, 35 cycles (+95 °C – 20 s; +48 °C – 15 s; and +72 °C – 1 min); +72 °C – 5 min. For *recA* gene, +95 °C – 2 min, 35 cycles (+94 °C – 20 s; +45 °C – 15 s; and +68 °C – 1 min); +72 °C – 7 min. For *gyrB* gene, +95 °C – 2 min, 35 cycles (+95 °C – 20 s; +49 °C – 15 s; and +72 °C – 1 min); +72 °C – 5 min. Amplicons were purified by cutting an agarose gel (1% agarose, TBE buffer, 6 V·cm⁻¹) strip stained with SYBR Green (DNK-Sintez, Russia). The target product was isolated from the agarose gel using the Cleanup Standard kit (Evrogen, Russia) according to the manufacturer's instructions. The amplified fragments of 16S rRNA, *recA*, and *gyrB* genes were sequenced at Evrogen company (Moscow).

RESULTS AND DISCUSSION

Field studies conducted May to October 2016–2018 in various coastal areas of the Black Sea and Sea of Azov (Fig. 1) allowed us to identify 21 bacterial isolates with visible bioluminescence. In the spring–summer season (May to June), when the Black Sea water had not yet fully warmed up, and its temperature averaged +16...+20 °C, the abundance of luminescent bacteria was low. Accordingly, the bacteria were isolated with preliminary concentration on filters. In summer (July to August), seawater temperature in the Black Sea reached +25 °C, and luminescent forms of bacteria were plated from water without additional concentration of samples. Isolation and research on luminescent bacteria of the Sea of Azov were carried out in August, when seawater temperature reached +30 °C. Luminescent forms occurred everywhere and were isolated both from seawater and various marine hydrobionts.

Table 3 provides biochemical characteristics of cultured luminescent bacteria strains isolated from water and hydrobionts of the Black Sea and Sea of Azov. For isolated strains, sequence data on 16S rRNA gene and *gyrB* and *recA* housekeeping genes were obtained (GenBank accession numbers were MK692515–MK692535). The results of phylogenetic analysis based on the comparison of 16S rRNA genes sequences are presented in Fig. 2 (compared to some reference bacteria strains). The data on molecular genetic identification are also provided in Table 3. The analysis revealed the presence of three well-supported clades. All the isolated luminous strains tested here resolved unambiguously either to the *Vibrio* clade, or to the *Aliivibrio* clade, or to the *Photobacterium* clade. Cells of all isolated strains are gram-negative. They are capable of growing at +15...+35 °C, with the optimum of +20...+30 °C, at 0.5–5.0% NaCl (weight/volume, w/v), with the optimum of 1.5–3.0 %, and at pH 6.0–8.0, with the optimum of 7.0–8.0. All of them are able to ferment glucose and mannose with acids formation.

Table 3. Results of identification of cultivated strains of bioluminescent bacteria isolated from the Black Sea and Sea of Azov

Таблица 3. Результаты идентификации культивируемых штаммов биолюминесцентных бактерий, выделенных из Чёрного и Азовского морей

No.	Result of molecular genetic identification	Kinetics of luciferase reaction			Fermentation of sugars		
		k, s ⁻¹	t _{1/2} , s	type	maltose	D-mannitol	sucrose
The Black Sea							
The genus <i>Vibrio</i>							
1	<i>Vibrio campbellii</i>	0.038	18.2	S	+	+	–
2	<i>Vibrio harveyi</i>	0.040	17.3	S	+	+	+
3	<i>Vibrio jasicida</i>	0.036	19.3	S	+	+	–
4	<i>Vibrio jasicida</i>	0.037	18.7	S	+	+	–
5	<i>Vibrio aquamarinus</i> sp. nov.	0.038	18.2	S	+	+	–
6	<i>Vibrio campbellii</i>	0.036	19.3	S	+	+	–
7	<i>Vibrio jasicida</i>	0.043	16.1	S	+	+	–
8	<i>Vibrio campbellii</i>	0.050	13.9	S	+	+	–
9	<i>Vibrio aquamarinus</i> sp. nov.	0.045	15.4	S	+	+	–
10	<i>Vibrio owensii</i>	0.059	11.7	S	+	+	+
11	<i>Vibrio aquamarinus</i> sp. nov.	0.040	17.3	S	+	+	+
12	<i>Vibrio owensii</i>	0.041	16.9	S	+	+	+
13	<i>Vibrio campbellii</i>	0.059	11.7	S	+	+	+
14	<i>Vibrio owensii</i>	0.056	12.4	S	+	+	+
The genus <i>Aliivibrio</i>							
15	<i>Aliivibrio fischeri</i>	0.38	1.8	F	+	–	–
16	<i>Aliivibrio fischeri</i>	0.43	1.6	F	+	–	–
The Sea of Azov							
The genus <i>Photobacterium</i>							
17	<i>Photobacterium leiognathi</i>	0.45	1.5	F	–	–	–
18	<i>Photobacterium leiognathi</i>	0.48	1.4	F	–	–	–
19	<i>Photobacterium leiognathi</i>	0.37	1.9	F	–	–	–
20	<i>Photobacterium leiognathi</i>	0.42	1.7	F	–	–	–
21	<i>Photobacterium leiognathi</i>	0.36	1.9	F	–	–	–

Note: S, slow-type luciferase kinetics; F, fast-type luciferase kinetics.

Примечание: S — кинетика люциферазы медленного типа; F — кинетика люциферазы быстрого типа.

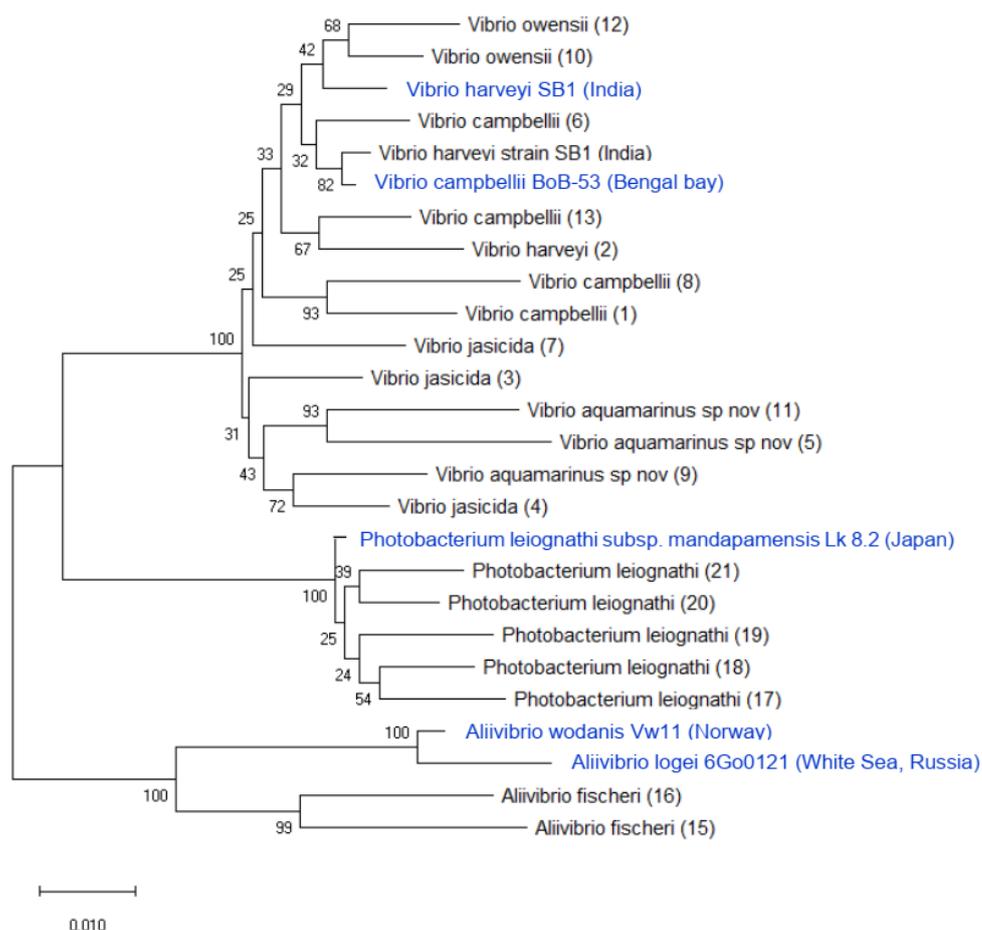


Fig. 2. Phylogenetic tree based on the analysis of 16S rRNA sequences, constructed by neighbor-joining [Saitou, Nei, 1987]. Bootstrap percentages from 1,000 replicates appear next to respective branches. The scale bar indicates the number of inferred nucleotide changes. The strain numbers (1–21) correspond to the numbers given in Table 3

Рис. 2. Филогенетическое дерево, основанное на анализе сиквенсов 16S rRNA, которое построено по методу присоединения соседей (neighbor-joining) [Saitou, Nei, 1987]. В узлах ветвей указан индекс (%) бутстреп-анализа для 1000 повторов. Масштабная линейка показывает количество предполагаемых замен нуклеотидов. Номера штаммов (1–21) соответствуют номерам в табл. 3

The following criteria and recommendations were used for primary identification of isolated bacteria. The presence of yellow pigment and the fast-type luciferase kinetics, as well as the ability of maltose fermentation, determined the bacteria species *A. fischeri* [Farmer III, Michael Janda, 2015; Farmer III et al., 2015]. These strains had average range of substrate specificity (3 out of 5 studied carbohydrates). Other isolates capable of fermenting maltose and D-mannitol, containing no yellow pigment, and characterized by the slow-type luciferase kinetics were assigned to the genus *Vibrio* [Farmer III, Michael Janda, 2015; Farmer III et al., 2015]. Bacteria not capable of fermenting D-mannitol and sucrose, having no yellow pigment, and characterized by the fast-type luciferase kinetics were classified as *Photobacterium*. Isolated strains of this genus capable of growing at +30 °C and non-fermenting maltose were assigned to *Photobacterium leiognathi* [Moi et al., 2017; Thyssen, Ollevier, 2015]. Later, molecular genetic identification of the studied isolates confirmed their belonging to indicated genera.

The obtained data revealed the following phenotypic features of the strains. All the Black Sea *Vibrio* strains isolated from mussels (isolates 11–14) had the slow-type luciferase kinetics and the ability to ferment D-mannitol and sucrose. On the other hand, vibrions obtained from seawater in various coastal zones of the Black Sea (isolates 1–10) were characterized by the slow-type luciferase kinetics

and the ability to ferment D-mannitol, but only 2 out of 10 strains utilized sucrose: *V. owensii* and *V. harveyi*. None of *V. jasicida* isolates fermented sucrose; among the isolated *V. campbellii* and *V. aquamarinus* strains, there were ones capable and incapable of utilizing sucrose. Thus, all *Vibrio* isolates had the slow-type luciferase kinetics and an extended range of utilized sugars (4–5 out of 5 studied). This coincides with the *Bergey's Manual* data: as indicated there, only 83% of strains of this genus have the ability to utilize sucrose [Baumann, et al., 1984; Farmer III, Michael Janda, 2015; Farmer III et al., 2015].

Cultural, biochemical, and genetic identification of luminescent bacteria isolated from water and hydrobionts of the Sea of Azov showed that all of them belong to *P. leiognathi*. This species has bright bioluminescence, the fast-type luciferase kinetics, and a narrow range of utilized substrates (2 out of 5 studied sugars). It was practically not encountered during the study of samples of the Black Sea water and hydrobionts. Apparently, high temperature of seawater, its low salinity, and, consequently, high biological activity of the sea cause the predominance of this species in the Sea of Azov water and also lead to the colonization of hydrobionts inhabiting it.

Fig. 3 provides the results of occurrence of different types of cultivated luminescent bacteria isolated in the studied water areas of the Black Sea and Sea of Azov. The ratio of isolated strains was as follows: *V. harveyi*, 4.76%; *A. fischeri*, 9.52%; *V. jasicida*, 14.29%; *V. aquamarinus* sp. nov., 14.29%; *V. owensii*, 14.29%; *V. campbellii*, 19.04%; and *P. leiognathi*, 23.81%.

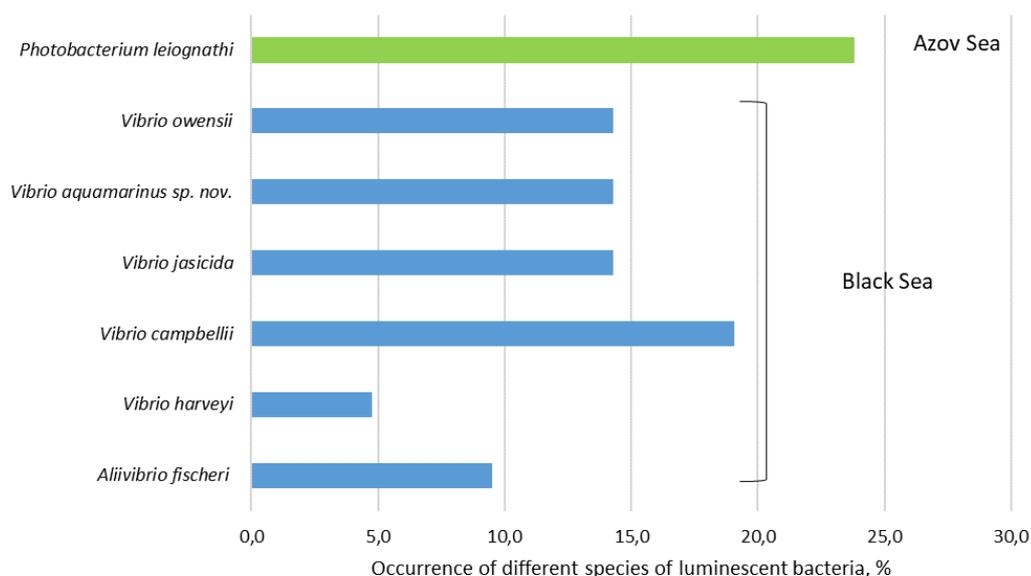


Fig. 3. Occurrence (%) of different species of cultivated luminescent bacteria isolated from water and hydrobionts of the Black Sea and Sea of Azov

Рис. 3. Встречаемость (%) различных видов культивируемых люминесцентных бактерий, выделенных из воды и гидробионтов Чёрного и Азовского морей

Concerning the object of isolation, it should be noted as follow: 9 isolates were isolated from hydrobionts, and 12, from seawater. Strains isolated from seawater belong to the species *V. harveyi* and *V. jasicida*. *Aliivibrio fischeri* strains were isolated from hydrobionts alone, while *V. campbellii*, *V. owensii*, and *V. aquamarinus* sp. nov. strains were isolated from both water and hydrobionts. Interestingly, all the strains of the genus *Vibrio* isolated from hydrobionts had the ability to utilize sucrose, while *V. campbellii* and *V. aquamarinus* sp. nov. isolated from seawater did not ferment sucrose. Apparently, in these species, this ability is associated with symbiosis and depends on the ecological niche occupied by a certain strain.

Notably, the new isolates confirmed the occurrence of a new species of the genus *Vibrio*, *V. aquamarinus*, in the Black Sea. Isolates are deposited in the Russian National Collection of Industrial Microorganisms (*V. aquamarinus* VKPM B-11245) and German Collection of Microorganism and Cell Culture (*V. aquamarinus* DSM 26054).

Conclusion. Studies have shown that a significant difference in environmental conditions between the Black Sea and Sea of Azov in summer leads to prevalence of different taxa of luminescent bacteria. The genus *Photobacterium* represented by the species *P. leiognathi* dominates the Sea of Azov characterized by low salinity and high water temperatures. The genus *Vibrio* represented by the species *V. campbellii*, *V. jasicida*, *V. harveyi*, *V. owensii*, and *V. aquamarinus* sp. nov. can be considered the prevailing genus of luminous bacteria that inhabit the Black Sea water and live in its mussels. The obtained results showed variability of *V. campbellii* and *V. aquamarinus* sp. nov. strains by the ability to ferment sucrose depending on the isolate source (water or hydrobionts). Investigations on cultivated luminescent bacteria of the northern Black Sea have also revealed the occurrence of *Aliivibrio fischeri* associated with various hydrobionts (pelagic fish and shrimps).

This work was funded by the Russian Science Foundation (grant No. 22-25-20206, <https://rscf.ru/project/22-25-20206/>) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FENW-2023-0008). Also, the work was partially supported by the V. I. Vernadsky Crimean Federal University Development Program for 2015–2024 (project I/2018/16 L-BAT). The research was carried out using the equipment of the Laboratory of Biochemiluminescent Analytical Technologies (L-BAT) at the V. I. Vernadsky Crimean Federal University.

REFERENCES

1. Ast J. C., Cleenwerck I., Engelbeen K., Urbanczyk H., Thompson F. L., De Vos P., Dunlap P. V. *Photobacterium kishitanii* sp. nov., a luminous marine bacterium symbiotic with deep-sea fishes. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2007, vol. 57, iss. 9, pp. 2073–2078. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.65153-0>
2. Ast J. C., Urbanczyk H., Dunlap P. V. Multi-gene analysis reveals previously unrecognized phylogenetic diversity in *Aliivibrio*. *Systematic and Applied Microbiology*, 2009, vol. 32, iss. 6, pp. 379–386. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2009.04.005>
3. Baumann P., Schubert R. H. W. Family II. Vibrionaceae Veron 1956, 5245AL. In: *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* / D. H. Bergey, N. R. Krieg, J. G. Holt (Eds). Baltimore ; London : Williams & Wilkins, 1984, vol. 1, pp. 516–517.
4. Baumstark-Khan C., Rabbow E., Rettberg P., Horneck G. The combined bacterial Lux-Fluoro test for the detection and quantification of genotoxic and cytotoxic agents in surface water: Results from the “Technical Workshop on Genotoxicity Biosensing”. *Aquatic Toxicology*, 2007, vol. 85, iss. 3, pp. 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2007.09.003>
5. Cano-Gómez A., Goulden E. F., Owens L., Høj L. *Vibrio owensii* sp. nov., isolated from cultured crustaceans in Australia. *FEMS Microbiology Letters*, 2010, vol. 302, iss. 2, pp. 175–181. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2009.01850.x>
6. Chugunova E. A., Mukhamatdinova R., Sazykina M., Dobrynin A., Sazykin I., Karpenko A., Mirina E., Zhuravleva M., Karchava S., Burilov A. Synthesis of new ‘hybrid’ compounds based on benzofuroxans and aminoalkyl naphthalimides. *Chemical Biology & Drug Design*, 2016, vol. 87, iss. 4, pp. 626–634. <https://doi.org/10.1111/cbdd.12685>
7. Deryabin D. G. *Bakterial'naya bioluminescensiya: fundamental'nye i prikladnye aspekty*. Moscow : Nauka, 2009, 246 p. (in Russ.)
8. Dunlap P. V., Urbanczyk H. Luminous bacteria. In: *The Prokaryotes* / E. Rosenberg, E. F. DeLong, S. Lory, E. Stackebrandt, F. Thompson (Eds). Berlin ; Heidelberg : Springer, 2013, pp. 495–528. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30141-4_75
9. Farmer III J. J., Michael Janda J. Vibrionaceae. In: *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons : Bergey's Manual Trust, 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118960608.fbm00212>
10. Farmer III J. J., Michael Janda J., Brenner F. W.,

- Cameron D. N., Birkhead K. M. *Vibrio*. In: *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons : Bergey's Manual Trust, 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118960608.gbm01078>
11. Gomez-Gil B., Thompson F. L., Thompson C. C., Swings J. *Vibrio rotiferianus* sp. nov., isolated from cultures of the rotifer *Brachionus plicatilis*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2003, vol. 53, iss. 1, pp. 239–243. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.02430-0>
 12. Ivask A., Green T., Polyak B., Mor A., Kahru A., Virta M., Marks R. Fibre-optic bacterial biosensors and their application for the analysis of bioavailable Hg and As in soils and sediments from Aznalcollar mining area in Spain. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007, vol. 22, iss. 7, pp. 1396–1402. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2006.06.019>
 13. Katsev A. M. Utilities of luminous bacteria from the Black Sea. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2002, vol. 38, iss. 2, pp. 189–192. <https://doi.org/10.1023/A:1014327020286>
 14. Katsev A. M., Makemson J. Identification of luminescent bacteria isolated from the Black and Azov seas. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Seriya Biologiya. Khimiya*, 2006, vol. 19 (58), no. 4, pp. 111–116.
 15. Kovalenko S. I., Nosulenko I. S., Voskoboynik A. Yu., Berest G. G., Antipenko L. N., Antipenko A. N., Katsev A. M. Novel *N*-aryl(alkaryl)-2-[(3-*R*-2-oxo-2*H*-[1,2,4]triazino[2,3-*c*]quinazoline-6-yl)thio]acetamides: Synthesis, cytotoxicity, anticancer activity, COMPARE analysis and docking. *Medicinal Chemistry Research*, 2013, vol. 22, no. 6, pp. 2610–2632. <https://doi.org/10.1007/s00044-012-0257-x>
 16. Kumar S., Stecher G., Li M., Knyaz C., Tamura K. MEGA X: Molecular Evolutionary Genetics Analysis across computing platforms. *Molecular Biology and Evolution*, 2018, vol. 35, iss. 6, pp. 1547–1549. <https://doi.org/10.1093/molbev/msy096>
 17. Kuryanov V. O., Chupakhina T. A., Shapovalova A. A., Katsev A. M., Chirva V. Ya. Glycosides of hydroxylamine derivatives: I. Phase transfer synthesis and the study of the influence of glucosaminides of isatine 3-oximes on bacterial luminescence. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 2011, vol. 37, iss. 2, pp. 231–239. <https://doi.org/10.1134/S1068162011020105>
 18. Labella A. M., Arahal D. R., Castro D., Lemos M. L., Borrego J. J. Revisiting the genus *Photobacterium*: Taxonomy, ecology and pathogenesis. *International Microbiology*, 2017, vol. 20, iss. 1, pp. 1–10. <https://doi.org/10.2436/20.1501.01.280>
 19. Lucena T., Ruvira M. A., Arahal D. R., Macian M. C., Pujalte M. J. *Vibrio aestivus* sp. nov. and *Vibrio quintilis* sp. nov., related to Marisflavi and Gazogenes clades, respectively. *Systematic and Applied Microbiology*, 2012, vol. 35, iss. 7, pp. 427–431. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2012.08.002>
 20. Maligina V. Yu., Katsev A. M. Luminous bacteria from the Black Sea and the Sea of Azov. *Ekologiya morya*, 2003, vol. 64, pp. 18–23. (in Russ.). <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/4587>
 21. Moi I. M., Roslan N. N., Leow A. T. C., Mohamad Ali M. S., Rahman R. N. Z. R. A., Rahimpour A., Sabri S. The biology and the importance of *Photobacterium* species. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, vol. 101, iss. 11, pp. 4371–4385. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8300-y>
 22. Niu S., Wang S., Shi C., Zhang S. Studies on the fluorescence fiber-optic DNA biosensor using *p*-hydroxyphenylimidazo[f]1,10-phenanthroline ferrom(III) as indicator. *Journal of Fluorescence*, 2008, vol. 18, iss. 1, pp. 227–235. <https://doi.org/10.1007/s10895-007-0266-1>
 23. Patent 2358009 RU, MPK C12N 1/20, C12Q 1/04. *Isolation Method of Bioluminescent Bacteria* / M. A. Sazykina, I. E. Tsybulskii, K. S. Abrosimova, Southern Federal University. No. 2007114379/13, zayvl. 16.04.2007, opubl. 10.06.2009. Bul. no. 16. (in Russ.)
 24. Patent 2368658 RU, MPK C12N 1/20, C12Q 1/04. *Nutrient Medium for Bioluminescent Bacteria Cultivation* / M. A. Sazykina, I. E. Tsybulskii, K. S. Abrosimova, Southern Federal University. No. 2007114380/13, zayvl. 16.04.2007, opubl. 27.09.2009. Bul. no. 27. (in Russ.)
 25. Saitou N., Nei M. The neighbor-joining method: A new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology and Evolution*, 1987, vol. 4, iss. 4, pp. 406–425. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a040454>

26. Sanger F., Nicklen S., Coulson A. R. DNA sequencing with chain-terminating inhibitors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1977, vol. 74, no. 12, pp. 5463–5467. <https://doi.org/10.1073/pnas.74.12.5463>
27. Sazykin I. S., Sazykina M. A., Khammami M. I., Khmelevtsova L. E., Kostina N. V., Trubnik R. G. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of lower reaches of the Don River (Russia) and their ecotoxicologic assessment by bacterial lux-biosensors. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, vol. 187, no. 5, art. no. 277 (12 p.). <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4406-9>
28. Sazykin I. S., Sazykina M. A., Khmelevtsova L. E., Mirina E. A., Kudeevskaya E. M., Rogulin E. A., Rakin A. V. Biosensor-based comparison of the ecotoxicological contamination of the wastewaters of Southern Russia and Southern Germany. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, vol. 13, iss. 3, pp. 945–954. <http://doi.org/10.1007/s13762-016-0936-0>
29. Sönmez A. Y., Sazykina M., Bilen S., Gültepe N., Sazykin I., Khmelevtsova L. E., Kostina N. V. Assessing contamination in sturgeons grown in recirculating aquaculture system by lux-biosensors and metal accumulation. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2016, vol. 25, no. 4, pp. 1028–1037.
30. Taga M. E., Bassler B. L. Chemical communication among bacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, vol. 100, no. suppl_2, pp. 14549–14554. <https://doi.org/10.1073/pnas.1934514100>
31. Thompson F. L., Iida T., Swings J. Biodiversity of *Vibrios*. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2004, vol. 68, no. 3, pp. 403–431. <https://doi.org/10.1128/MMBR.68.3.403-431.2004>
32. Thompson F. L., Hoste B., Vandemeulebroecke K., Swings J. Reclassification of *Vibrio hollisae* as *Griptomontia hollisae* gen. nov., comb. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2003, vol. 53, iss. 5, pp. 1615–1617. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.02660-0>
33. Thyssen A., Ollevier F. *Photobacterium*. In: *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons : Bergey's Manual Trust, 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118960608.gbm01076>
34. Tsybulskii I. E., Sazykina M. A. New biosensors for assessment of environmental toxicity based on marine luminescent bacteria. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2010, vol. 46, iss. 5, pp. 505–510. <https://doi.org/10.1134/S0003683810050078>
35. Urbanczyk H., Ast J. C., Dunlap P. V. Phylogeny, genomics, and symbiosis of *Photobacterium*. *FEMS Microbiology Reviews*, 2011, vol. 35, iss. 2, pp. 324–342. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2010.00250.x>
36. Urbanczyk H., Ast J. C., Higgins M. J., Carson J., Dunlap P. V. Reclassification of *Vibrio fischeri*, *Vibrio logei*, *Vibrio salmonicida* and *Vibrio wodanis* as *Aliivibrio fischeri* gen. nov., comb. nov., *Aliivibrio logei* comb. nov., *Aliivibrio salmonicida* comb. nov. and *Aliivibrio wodanis* comb. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2007, vol. 57, iss. 12, pp. 2823–2829. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.65081-0>
37. Wang Y., Zhang X.-H., Yu M., Wang H., Austin B. *Vibrio atypicus* sp. nov., isolated from the digestive tract of the Chinese prawn (*Penaeus chinensis* O'sbeck). *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2010, vol. 60, iss. 11, pp. 2517–2523. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.016915-0>
38. Yoshizawa S., Karatani H., Wada M., Yokota A., Kogure K. *Aliivibrio sifae* sp. nov., luminous marine bacteria isolated from seawater. *Journal of General and Applied Microbiology*, 2010a, vol. 56, iss. 6, pp. 509–518. <https://doi.org/10.2323/jgam.56.509>
39. Yoshizawa S., Tsuruya Y., Fukui Y., Sawabe T., Yokota A., Kogure K., Higgins M., Carson J., Thompson F. L. *Vibrio jasicida* sp. nov., a member of the Harveyi clade, isolated from marine animals (packhorse lobster, abalone and Atlantic salmon). *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2012, vol. 62, iss. Pt_8, pp. 1864–1870. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.025916-0>
40. Yoshizawa S., Wada M., Kita-Tsukamoto K., Ikemoto E., Yokota A., Kogure K. *Vibrio azureus* sp. nov., a luminous marine bacterium isolated from seawater. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2009a, vol. 59, iss. 7, pp. 1645–1649. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.004283-0>

41. Yoshizawa S., Wada M., Kita-Tsukamoto K., Yokota A., Kogure K. *Photobacterium aquimaris* sp. nov., a luminous marine bacterium isolated from seawater. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2009b, vol. 59, iss. 6, pp. 1438–1442. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.004309-0>
42. Yoshizawa S., Wada M., Yokota A., Kogure K. *Vibrio sagamiensis* sp. nov., luminous marine bacteria isolated from sea water. *Journal of General and Applied Microbiology*, 2010b, vol. 56, iss. 6, pp. 499–507. <https://doi.org/10.2323/jgam.56.499>
43. Zheng H., Liu L., Lu Y., Long Y., Wang L., Ho K.-P., Wong K.-Y. Rapid determination of nanotoxicity using luminous bacteria. *Analytical Science*, 2010, vol. 26, iss. 1, pp. 125–128. <https://doi.org/10.2116/analsci.26.125>

БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ БАКТЕРИИ ЧЁРНОГО И АЗОВСКОГО МОРЕЙ

А. М. Кацев¹, И. С. Сазыкин², Л. Е. Хмелевцова², С. Л. Сафронюк¹, Ш. К. Карчавва²,
М. В. Климова², М. И. Хаммами², М. А. Сазыкина²

¹Институт биохимических технологий, экологии и фармации, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, Симферополь, Российская Федерация

²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

E-mail: katsev@mail.ru

Целью настоящего исследования было выделить биолюминесцентные бактерии из прибрежных акваторий Чёрного и Азовского морей, изучить их морфологические и биохимические характеристики и идентифицировать их на основе последовательностей генов 16S рРНК, *recA* и *gyrB*. Из морских гидробионтов выделены 9 изолятов, из морской воды — 12. Результаты биохимических и молекулярно-генетических исследований показали, что выделенные светящиеся бактерии относятся к родам *Vibrio*, *Aliivibrio* и *Photobacterium*. Установлено, что все 5 люминесцентных штаммов, выделенных из воды и гидробионтов Азовского моря, принадлежат виду *Photobacterium leiognathi*. Бактерии, выделенные из Чёрного моря, отнесены к родам *Aliivibrio* и *Vibrio*. Род *Aliivibrio* представлен 2 штаммами *Aliivibrio fischeri*, ассоциированными с различными гидробионтами; 14 штаммов рода *Vibrio* отнесены к видам *Vibrio campbellii*, *V. jasicida*, *V. harveyi*, *V. owensii* и *V. aquamarinus* sp. nov. Таким образом, таксономический состав культивируемых люминесцентных бактерий в Азовском и Чёрном морях существенно различается.

Ключевые слова: люминесцентные бактерии, идентификация, таксономический состав, биоразнообразие, Чёрное море, Азовское море

УДК 599.537-111.11:57.087

ИНДЕКСЫ В ОЦЕНКЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ КЛЕТОК КРОВИ ДЕЛЬФИНА-АФАЛИНЫ *TURSIOPS TRUNCATUS* (MONTAGU, 1821)

© 2024 г. Т. В. Селиверстова

Мурманский морской биологический институт РАН, Мурманск, Российская Федерация
E-mail: minzyuk@mail.ru

Поступила в редакцию 10.05.2023; после доработки 17.08.2023;
принята к публикации 27.08.2024; опубликована онлайн 09.09.2024.

Содержание катионного белка в гранулоцитах дельфина-афалины *Tursiops truncatus* (Montagu, 1821) определяли методом расчёта среднего цитохимического коэффициента. Обоснованы его недостатки при визуальном установлении интенсивности окрашивания продукта цитохимической реакции на препаратах крови и при распределении клеток на группы по количеству в них белка. Применены современные методы оценки активности вещества в клетке с использованием компьютерных программ и светового микроскопа, что позволяет минимизировать погрешности морфометрических измерений объектов. Рассчитаны индивидуальные параметры по степени заполнения и интенсивности окрашивания катионного белка в гранулоцитах у афалин с учётом и без учёта содержания белка во всём объёме крови. Такие показатели позволяют проводить сравнительные возрастные, внутри- и межвидовые исследования животных. Установлено, что содержание катионного белка в гранулоцитах может сильно различаться у разных особей афалин, а с возрастом его количество меняется незначительно.

Ключевые слова: морфометрия, средний цитохимический коэффициент, интегральный цитохимический показатель, катионный белок, гранулоциты, афалина

В России содержание морских млекопитающих в океанариумах и дельфинариях связано в основном с коммерческой деятельностью. Небольшое число таких организаций ведёт научно-исследовательскую работу по оценке состояния здоровья ластоногих и китообразных и их иммунного статуса [Андреева и др., 2013; Васильева, 2019; Дёрко и др., 2018; Дуванова, Денисенко, 2018; Захаренко, 2019; Каганова, 2018; Романов и др., 2023; Семёнов и др., 2020; Lauderdale et al., 2021]. Для определения функционального состояния здоровья морских млекопитающих широко применяют клинический, биохимический и цитоморфологический анализ крови. К настоящему времени проведено большое количество таких исследований с использованием гематологических и биохимических анализаторов, проточного цитометра и т. д. [CRC Handbook, 2018; Keogh et al., 2011; Lauderdale et al., 2021; Nouri-Shirazi et al., 2017; Tryland et al., 2006]. Возможности сбора и доставки образцов крови, полученных от животных в природной среде обитания, зачастую ограничены удалённостью мест обитаний морских млекопитающих от лабораторий и допустимыми сроками хранения биоматериала. Мазки крови, полученные от животных как в условиях неволи, так и в природной среде обитания, могут храниться длительно и позволяют описать и оценить состояние здоровья млекопитающих позднее, с использованием современного оборудования.

Точные математические измерения клеточных структур с применением методов компьютерной морфометрии позволяют проводить сравнительные возрастные, внутри- и межвидовые исследования животных. Количественные и качественные методы эффективно применяются в оценке функциональной активности клеток крови млекопитающих. Количественный анализ направлен на выявление отдельных групп клеток и на определение их соотношения (например, лейкоцитарная формула), подсчёт количества гранул, ядерных элементов в отдельных клетках, а также на измерение площадей окрашенного различными цитохимическими реакциями вещества. Качественный анализ связан с определением интенсивности окрашивания продукта цитохимической реакции. В основе каждого из этих методов лежит использование размерных (длины, ширины, радиуса, площади и др.) и количественных (числа гранул и сегментов) характеристик анализируемых объектов.

Проведение качественного анализа требует определения не только размерных величин, но и цветовых характеристик (к примеру, оптической плотности) продукта реакции. Такая оценка функциональной активности изучаемой клетки предполагает применение специального оборудования. В то же время точные размерные и цветовые параметры не зависят от субъективности и опыта исследователя. При определении морфометрических показателей клеток на мазках крови используют абсолютные и относительные параметры. К абсолютным относят площадь, диаметр и форму клеток, а также количество в них гранул и клеточных элементов. Для этого в каждом мазке проводят измерения клеток, свободно расположенных в видимом поле без наложений друг на друга и без деформации от близлежащих клеток, чтобы исключить их сжатие в зависимости от плотности мазка. Использование относительных параметров позволяет определять характеристики клеточных структур вне зависимости от плотности мазка.

Количественные характеристики просты и удобны при определении функциональной активности клеток, но дают субъективную и лишь общую оценку интенсивности клеточных процессов. Широко используют полуколичественный метод — расчёт среднего цитохимического коэффициента [Лецкий, 1973], позволяющего по характеру распределения окрашенного вещества в клетке оценить среднюю цитохимическую активность всего живого организма. Эффективно применяют подсчёт лейкоцитарной формулы крови и на её основе определяют лейкоцитарные индексы [Гаркави и др., 1990; Кальф-Калиф, 1941; Мустафина и др., 1999; Островский и др., 2006, 2007; Сперанский и др., 2009; Davis et al., 2008]. Комплексное использование гематологических индексов даёт большой объём информации и позволяет оценить развитие, тяжесть и течение воспалительного процесса и эндогенной интоксикации, проанализировать общую иммунологическую реактивность организма. Применение данных коэффициентов и индексов информативно как по отдельности, так и совместно. В то же время некоторые существующие количественные показатели несовершенны.

Цель данной работы — изучить возможность применения дополнительных коэффициентов и индексов для оценки функциональной активности белков и ферментов в клетках крови афалины на примере катионного белка в гранулоцитах.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объект исследования — дельфины *Tursiops truncatus* (Montagu, 1821) возрастом от 1 до 16 лет. Материал от 14 особей получен в океанариуме города Севастополя. Кровь брали из вен хвостового плавника афалин. Мазки крови изготавливали общепринятым способом, перед окраской фиксировали в метаноле в течение 5 мин. Препараты окрашивали прочным зелёным по методике М. Олферта и И. Гешвинда [Бутенко и др., 1974] и изучали, используя масляную иммерсию, с помощью микроскопа Axio Imager M1, оснащённого цифровой видеокамерой AxioCam и программным обеспечением для анализа изображений микробъектов AxioVision (фирма Zeiss).

Для определения содержания катионного белка (далее — КБ) вычисляли средний цитохимический коэффициент [Лецкий, 1973], определяли площадь клетки, а также площадь и оптическую плотность продукта цитохимической реакции. Рассчитывали следующие цитохимические характеристики: показатель заполнения клетки (далее — ПЗК) и интегральный цитохимический показатель (далее — ИЦП) [Славинский, 2000].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для вычисления среднего цитохимического коэффициента (далее — СЦК) визуально определяют степень интенсивности реакции по количеству окрашенного вещества в цитоплазме клетки (рис. 1). Гранулоциты делят на группы: 0 (отсутствие окраски или гранул в цитоплазме); А — малоактивные клетки (наличие единичных гранул или окраски); В — среднеактивные (исследуемое вещество в лейкоцитах заполняет почти всю клетку, но могут оставаться неокрашенные участки цитоплазмы); С — высокоактивные (интенсивно окрашенные зёрна [вещество] заполняют всю цитоплазму). СЦК рассчитывают по формуле $СЦК = (3С + 2В + А) / 200$. В каждом мазке учитывают 200 гранулоцитов.

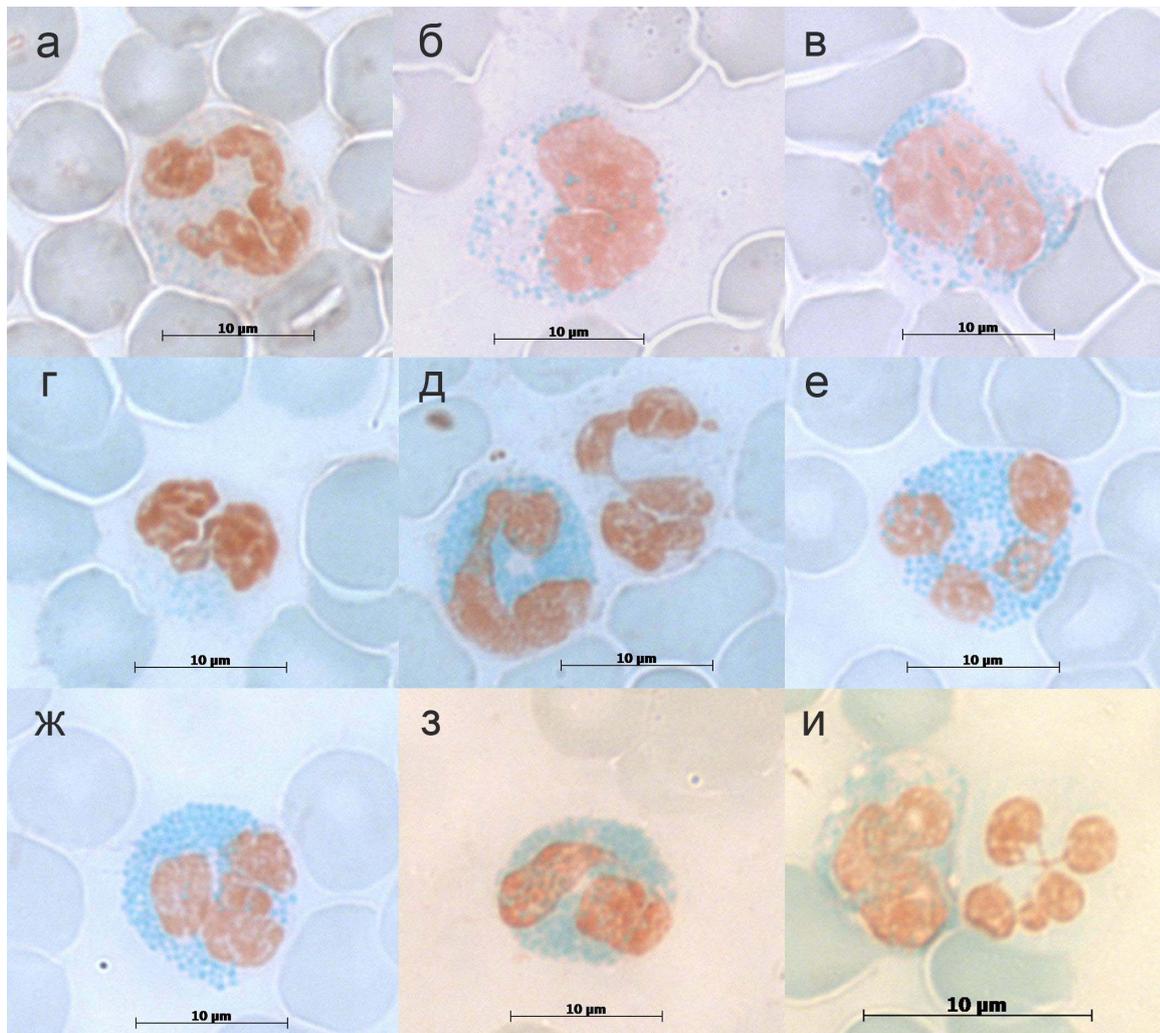


Рис. 1. Гранулоциты афалины. Окраска на катионный белок по методу М. Олферта и И. Гешвинда [Бутенко и др., 1974] (пояснения см. в тексте)

Fig. 1. Bottlenose dolphin granulocytes. Staining for cationic protein after M. Alfert and I. Geschwind [Butenko et al., 1974] (see text for explanation)

Визуально распределять клетки по вышеописанным группам, особенно относить к категориям А и В, сложно. К малоактивным клеткам с наличием единичных гранул (А) можно причислить клетку и с одной гранулой, и с небольшим участком окрашенного вещества, заполняющего четверть клетки или менее (рис. 1а, б, г). Среднеактивные гранулоциты (В) представлены также большим разбросом вариантов — от трети окрашенного вещества в клетке (рис. 1в, и) до почти полного заполнения зёрнами или активным веществом (рис. 1д, е, ж, з). При распределении клеток по группам к высокоактивным гранулоцитам (С) можно причислить те, в которых активное вещество занимает почти всю клетку и имеются лишь маленькие участки, свободные от зёрен или окрашенного вещества (рис. 1ж, з), однако, согласно классификации, данный тип окрашивания относится к группе В.

Для снижения доли окрашенных клеток, ошибочно отнесённых к той или иной группе, мы использовали дополнительные параметры оценки активности вещества. Для этого определяли площадь клетки, оптическую плотность и площадь продукта цитохимической реакции (рис. 2). Рассчитывали ПЗК и ИЦП [Славинский, 2000]. ПЗК — доля суммарной площади измеряемых структур (окрашенных гранул КБ) в площади клетки (рис. 2а, б). ИЦП — произведение суммарной площади продукта цитохимической реакции в клетке и его оптической плотности, соответствующее количеству окрашенного КБ (рис. 2б).

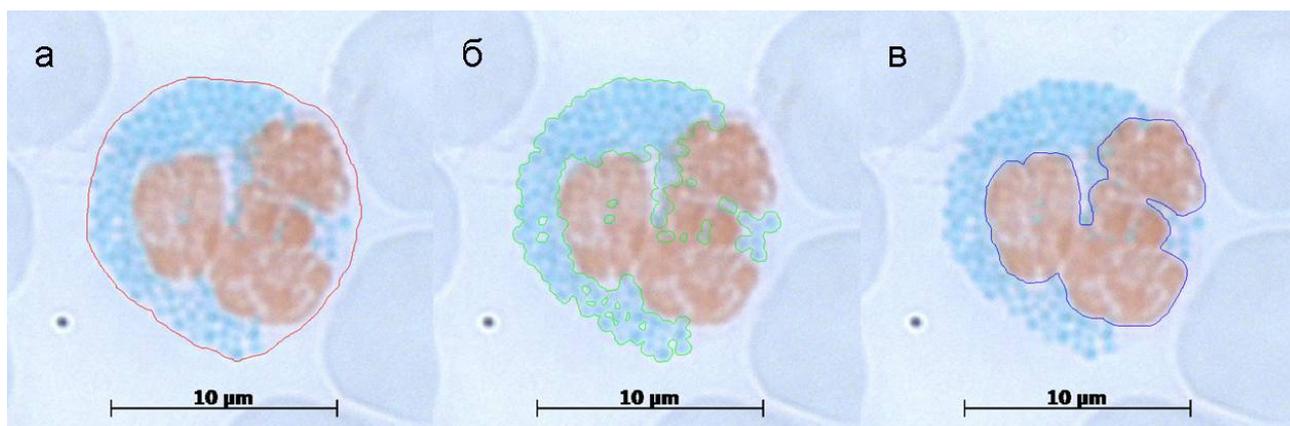


Рис. 2. Гранулоцит афалины: а — выделены границы всей клетки; б — выделена область продукта цитохимической реакции; в — выделена площадь ядра. Окраска на катионный белок по методу М. Олферта и И. Гешвинда [Бутенко и др., 1974]

Fig. 2. Bottlenose dolphin granulocytes: а, the structures of the entire cell are highlighted; б, the area of the cytochemical reaction product is highlighted; в, the area of the nucleus is highlighted. Staining for cationic protein after M. Alfert and I. Geschwind [Butenko et al., 1974]

ПЗК — удобный морфометрический параметр: он является относительным и позволяет проводить измерения вне зависимости от плотности мазка. В то же время данный параметр недостаточно информативен и требует дополнения в расчётной формуле. Вероятно, она будет более точной, если из площади клетки (рис. 2а) вычесть площадь ядра (рис. 2в) и уже данную разность разделить на суммарную площадь измеряемых структур (окрашенных гранул КБ) (рис. 2б). В таком случае можно оценить интенсивность заполнения активным веществом непосредственно в объёме цитоплазмы клетки, а не во всём объёме клетки. Недостатком ИЦП является то, что необходимо использовать клетки, свободно расположенные в видимом поле, чтобы показатели оптической плотности окрашенного вещества не изменялись при наложении или сжатии клеток.

Результаты определения СЦК, ИЦП и ПЗК в гранулоцитах афалин представлены на рис. 3 и 4. Количество лейкоцитов, содержащих КБ (количество КБ + лейкоцитов), интенсивность окрашивания и степень заполнения клеток (ПЗК) продуктом цитохимической реакции (ИЦП) меняются у дельфинов с возрастом. Значения СЦК у афалин выше, чем таковые у серых и гренландских тюленей, но ниже, чем у человека (рис. 3).

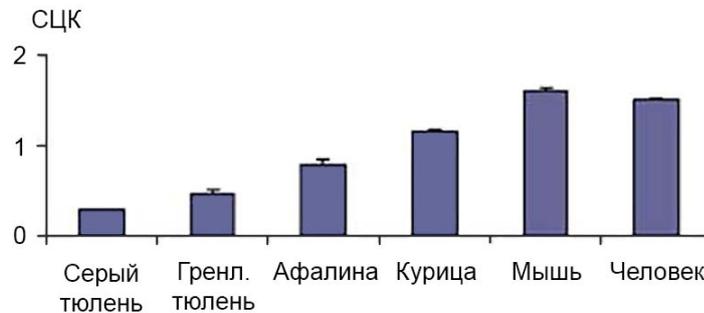


Рис. 3. Содержание катионного белка в гранулоцитах взрослых животных разных видов (по: [Будыка и др., 2009; Клетикова, 2010; Стойко, Ермаков, 2004])

Fig. 3. The content of cationic protein in granulocytes of adult animals of different species (according to: [Budyka et al., 2009; Kletikova, et al., 2010; Stoiko, Ermakov, 2004])

Нами дополнительно были введены коэффициенты. Так, средние значения ПЗК и ИЦП для выборок из 200 гранулоцитов выражали в коэффициенте показателя заполнения клетки (кПЗК) и коэффициенте интегрального цитохимического показателя (кИЦП). Использование двух последних параметров связано с необходимостью проведения сравнительных исследований между группами и отдельными видами животных, значительно отличающихся по активности белков в клетках (с такой же целью применим и средний цитохимический коэффициент). В частности, у самок афалин возрастом 4–5 лет (рис. 4, обведено кружком) при высоком значении ПЗК (то есть при самой высокой интенсивности заполнения цитоплазмы КБ + лейкоцитов окрашенными гранулами) и среднем значении ИЦП отмечены самые низкие значения СЦК, кПЗК и кИЦП, что обусловлено низким процентным содержанием КБ + лейкоцитов у животного. Такие индивидуальные колебания в распределении активного вещества в лейкоцитах (по индексу ПЗК) у афалин указывают на возрастное снижение согласно линии тренда на графике. Усреднение полученных данных как по интенсивности заполнения клеток гранулами активного вещества, так и по степени окрашивания белка в клетках показывает, что содержание КБ в гранулоцитах животных с возрастом меняется незначительно. У тюленей при средних значениях СЦК содержание активных клеток является высоким, но интенсивность заполнения активным веществом — низкой или средней.

Приведённые индексы и коэффициенты имеют преимущества и недостатки. Применение ИЦП требует чёткого соблюдения методики окрашивания по соотношению окрашивающих компонентов и времени проведения самой процедуры, а также использования клеток без наложений друг на друга, так как уплотнение мазка приводит к сгущению красящего вещества и, соответственно, к неправильному толкованию полученных результатов. ПЗК удобно применять на любых мазках вне зависимости от их плотности. Определение всех морфометрических показателей требует больших временных затрат, но компьютерные технологии и автоматические программы измерения позволяют сократить время на данные исследования. При этом использование ИЦП и ПЗК по отдельности даёт небольшой объём информации, и лучше применять их в совокупности друг с другом и с рядом других качественных и количественных параметров для оценки

функциональной активности вещества в изучаемых клетках. Следовательно, при сравнительном анализе функционального состояния организма животных на основе различных цветоярких характеристик клеток необходимо рассчитывать дополнительные индексы и коэффициенты, что продемонстрировано на примере определения содержания КБ в гранулоцитах афалины. Данные показатели могут быть эффективно применены не только при оценке содержания КБ в клетках крови, но и при определении активности других ферментов (щелочной фосфатазы, сукцинатдегидрогеназы, миелопероксидазы и т. д.).

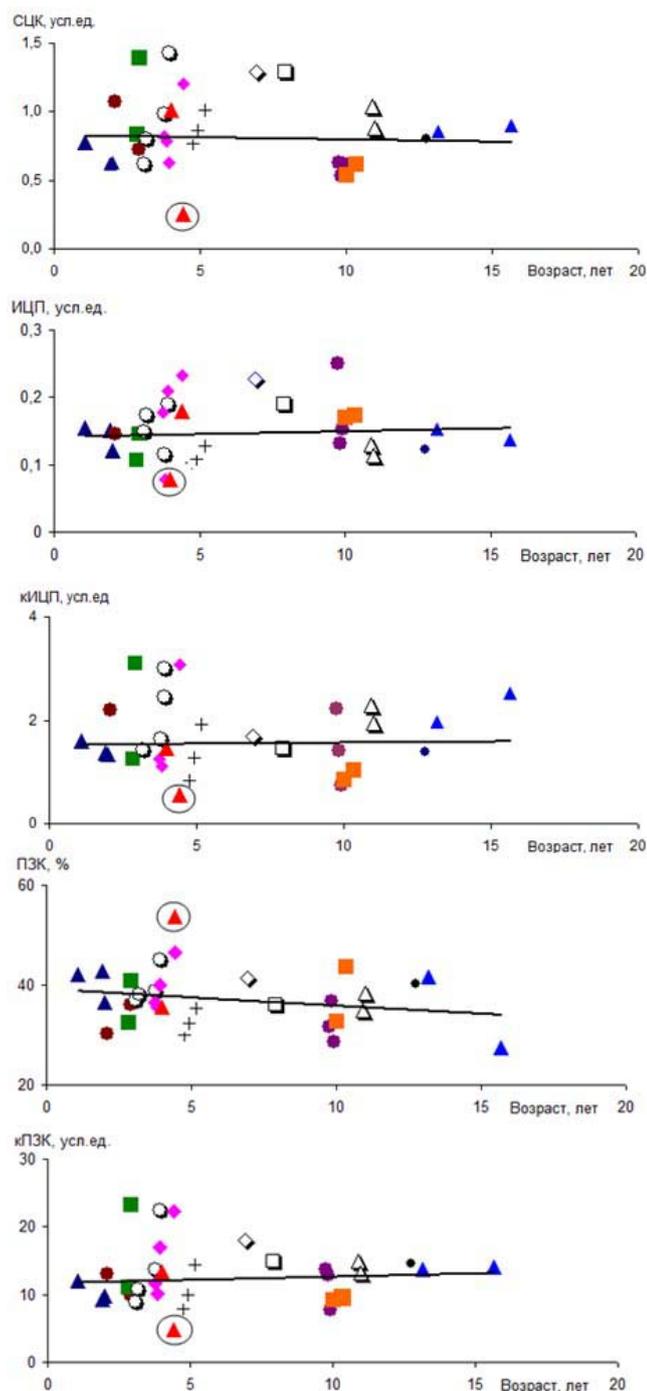


Рис. 4. Возрастные изменения цитохимических показателей содержания катионного белка в гранулоцитах афалины (для каждого отдельного животного свой символ)

Fig. 4. Age-related changes in cytochemical parameters of the content of cationic protein in granulocytes of bottlenose dolphins (each individual animal is marked with its own symbol)

Морфометрическое измерение клетки как отдельной структуры позволяет определять индивидуальные параметры для каждого организма. Несмотря на трудоёмкость дополнительных измерений и подсчётов при использовании компьютерной морфометрии, индексы дают точную количественную информацию о содержании веществ в клетках. Результаты определения морфометрических клеточных параметров морских млекопитающих необходимы в качестве дополнительных данных для оценки иммунологического статуса животных. Особенно это актуально для ластоногих и китообразных при их адаптации и длительном содержании в океанариумах и дельфинариях. Биоматериал, полученный от морских млекопитающих в естественной среде обитания, часто бывает очень разрозненным по возрастным, половым, весовым и видовым характеристикам животных, а также испорченным или недостаточным по объёму (сохраняются только мазки крови), а точность и максимальная информативность микроскопии крови животных позволяют проводить сравнительные возрастные, внутри- и межвидовые исследования морских млекопитающих.

Работа выполнена в рамках плана НИР и государственного задания ММБИ РАН на 2021–2023 гг. № FMEE-2021-0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андреева Н. А., Остапчук Т. В., Лискун О. В., Мазовская С. В. Микробиологическая адаптация дельфинов-афалин (*Tursiops truncatus*) к условиям содержания в океанариуме // *Учёные записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Биология, химия*. 2013. № 3. С. 3–14. [Andreeva N. A., Ostapchuk T. V., Liskun O. V., Mazovska S. V. Microbiological adaptation of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) to life in captivity. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya, khimiya*, 2013, no. 3, pp. 3–14. (in Russ.)]
2. Будыка Д. А., Абзаева Н. В., Руднев С. М., Иванова Г. Ф., Фисун А. А., Гостищева С. Е., Бондаренко А. И. Бактерицидная активность полиморфно-ядерных лейкоцитов крови белых мышей, привитых против чумы, и в различных схемах инфицирования чумной инфекцией // *Проблемы особо опасных инфекций*. 2009. № 2 (100). С. 50–56. [Budyka D. A., Abzaeva N. V., Rudnev S. M., Ivanova G. F., Fissun A. A., Gostischeva S. E., Bondarenko A. I. Bactericidal activity of polymorphonuclear blood leucocytes of white mice vaccinated against plague and in different schemes of introduction of plague infection. *Problemy osobo opasnykh infektsii*, 2009, no. 2 (100), pp. 50–56. (in Russ.)]. [https://doi.org/10.21055/0370-1069-2009-2\(100\)-56-60](https://doi.org/10.21055/0370-1069-2009-2(100)-56-60)
3. Бутенко З. А., Глузман Д. Ф., Зак К. П., Филатова Р. С., Шляховенко В. А. *Цитохимия и электронная микроскопия клеток крови и кроветворных органов*. Киев : Наукова думка, 1974. 248 с. [Butenko Z. A., Gluzman D. F., Zak K. P., Filatova R. S., Shlyakhovenko V. A. *Tsitokhimiya i elektronnyaya mikroskopiya kletok krovi i krovotvornykh organov*. Kyiv : Naukova dumka, 1974, 248 p. (in Russ.)]
4. Васильева С. В. Сравнительный анализ показателей красной крови у морских млекопитающих в условиях дельфинария открытого типа // *Академическая публицистика*. 2019. № 12. С. 262–264. [Vasileva S. V. Sravnitel'nyi analiz pokazatelei krasnoi krovi u morskikh mlekopitayushchikh v usloviyakh del'finariya otkrytogo tipa. *Akademicheskaya publitsistika*, 2019, no. 12, pp. 262–264. (in Russ.)]
5. Гаркави Л. Х., Квакина Е. Б., Уколова М. А. *Адаптационные реакции и резистентность организма*. Ростов-на-Дону : Изд-во Ростовского ун-та, 1990. 224 с. [Garkavi L. Kh., Kvakina E. B., Ukolova M. A. *Adaptatsionnye reaktcii i rezistentnost' organizma*. Rostov-on-Don : Izd-vo Rostovskogo un-ta, 1990, 224 p. (in Russ.)]
6. Дёрко А. А., Алексеев А. Ю., Романов В. В., Алекнайте И. А., Шестопалов А. М. Серологическое исследование некоторых патогенов байкальской нерпы (*Phoca sibirica* Gmelin, 1788), содержащейся в условиях неволи // *Научный альманах*. 2018. № 5-2 (43). С. 170–173. [Derko A. A., Alekseev A. Yu., Romanov V. V.,

- Aleknaite I. A., Shestopalov A. M. Serosurvey of selected pathogens in the Baikal seal (*Phoca sibirica* Gmelin, 1788) in captivity. *Nauchnyi al'manakh*, 2018, no. 5-2 (43), pp. 170–173. (in Russ.)]
7. Дуванова М. А., Денисенко Т. Е. Гематологические, биохимические, цитологические и микробиологические показатели состояния здоровья китообразных при диагностике заболеваний репродуктивной системы // *Морские млекопитающие Голарктики* : сборник научных трудов по материалам IX международной конференции. Москва : РОО «Совет по морским млекопитающим», 2018. Т. 1. С. 171–173. [Duvanova M. A., Denisenko T. E. Hematological, biochemical, cytological and microbiological indicators of the health status of cetaceans in the diagnosis of disease of the reproductive system. In: *Marine Mammals of the Holarctic* : collection of scientific papers. Moscow : РОО «Совет по морским млекопитающим», 2018, vol. 1, pp. 171–173. (in Russ.)]
 8. Захаренко П. Г. Основные гематологические показатели крови морских млекопитающих океанариума ДВО РАН // *Актуальные вопросы и инновационные технологии в ветеринарной медицине, животноводстве и природоохранном комплексе* : материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 40-летию юбилею со дня образования ветеринарного факультета. Уссурийск, 2019. Ч. 1. С. 162–165. [Zakharenko P. G. The main haematological blood parameters of the marine mammals in the oceanarium of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science. In: *Aktual'nye voprosy i innovatsionnye tekhnologii v veterinarnoi meditsine, zhivotnovodstve i prirodookhrannom komplekse* : materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 40-letnemu yubileyu so dnya obrazovaniya veterinarnogo fakul'teta. Ussuriisk, 2019, pt 1, pp. 162–165. (in Russ.)]
 9. Каганова Н. В. Уровень фибриногена и время свёртывания крови как критерий динамики трёхмесячной послеотловной адаптации афалин (*Tursiops truncatus ponticus* Barabash, 1940) к условиям неволи // *Морские млекопитающие Голарктики* : сборник научных трудов по материалам IX международной конференции. Москва : РОО «Совет по морским млекопитающим», 2018. Т. 1. С. 195–202. [Kaganova N. V. Fibrinogen level and blood clotting time as a criterion of the dynamics of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus ponticus* Barabash, 1940) after three-month adaptation to captive environment. In: *Marine Mammals of the Holarctic* : collection of scientific papers. Moscow : РОО «Совет по морским млекопитающим», 2018, vol. 1, pp. 195–202. (in Russ.)]
 10. Кальф-Калиф Я. Я. О лейкоцитарном индексе интоксикации и его практическом значении // *Врачебное дело*. 1941. № 1. С. 31–35. [Kal'f-Kalif Ya. Ya. O leukotsitarnom indekse intoksikatsii i ego prakticheskom znachenii. *Vrachebnoe delo*, 1941, no. 1, pp. 31–35. (in Russ.)]
 11. Клетикова Л. В. Содержание катионных белков в гранулоцитах птиц // *Естествознание и гуманизм* : межвузовский сборник. Томск, 2010. Т. 6, № 1. С. 51–52. [Kletikova L. V. Soderzhanie kationnykh belkov v granulotsitakh ptits. *Natural Sciences & Humanism*. Tomsk, 2010, vol. 6, no. 1, pp. 51–52. (in Russ.)]
 12. Лецкий В. Б. *Цитохимические исследования лейкоцитов. Возрастные колебания цитохимических показателей*. Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1973. 33 с. [Letsky V. B. *Tsitokhimicheskie issledovaniya leukotsitov. Vozrastnye kolebaniya tsitokhimicheskikh pokazatelei*. Leningrad : Izd-vo LGU, 1973, 33 p. (in Russ.)]
 13. Мустафина Ж. Г., Крамаренко Ю. С., Кобцева В. Ю. Интегральные гематологические показатели в оценке иммунологической реактивности организма у больных с офтальмопатологией // *Клиническая лабораторная диагностика*. 1999. № 5. С. 47–48. [Mustafina Zh. G., Kramarenko Yu. S., Kobtseva V. Yu. Integral'nye gematologicheskie pokazateli v otsenke immunologicheskoi reaktivnosti organizma u bol'nykh s oftal'mopatologiei. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika*, 1999, no. 5, pp. 47–48. (in Russ.)]
 14. Островский В. К., Машенко А. В., Макаров С. В. Оценка тяжести и прогноз гнойно-деструктивных заболеваний органов брюшной полости // *Хирургия. Журнал имени Н. И. Пирогова*. 2007. № 1. С. 33–37. [Ostrovsky V. K., Mashchenko A. V., Makarov S. V. Assessment of severity and prognosis of pyodestructive abdominal diseases. *Khirurgiya. Zhurnal imeni N. I. Pirogova*, 2007, no. 1, pp. 33–37. (in Russ.)]

15. Островский В. К., Машченко А. В., Янголенко Д. В., Макаров С. В. Показатели крови и лейкоцитарного индекса интоксикации в оценке тяжести и определении прогноза при воспалительных, гнойных и гнойно-деструктивных заболеваниях // *Клиническая лабораторная диагностика*. 2006. № 6. С. 50–53. [Ostrovsky V. K., Mashchenko A. V., Yangolenko D. V., Makarov S. V. The parameters of blood and leukocytic intoxication index in the evaluation of the severity of inflammatory, purulent, and pyodestructive diseases. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika*, 2006, no. 6, pp. 50–53. (in Russ.)]
16. Романов В. В., Чистяева М. В., Белокобыльский И. Ф. Ферритин сыворотки крови как один из важнейших индикаторов воспаления и тест для дифференциальной диагностики анемий у китообразных // *Морские млекопитающие Голарктики* : сборник научных трудов по материалам XI международной конференции. Москва : РОО «Совет по морским млекопитающим», 2023. С. 253–262. [Romanov V. V., Chistyayeva M. V., Belokobylsky I. F. Serum ferritin as one of the most important indicators of inflammation and a test for the differential diagnosis of anemia in cetaceans. In: *Marine Mammals of the Holarctic* : collection of scientific papers. Moscow : РОО “Sovet po morskim mlekopitayushchim”, 2023, pp. 253–262. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.35267/978-5-9904294-8-2-2023-253-262>
17. Семёнов В. А., Родин И. А., Седов А. В., Яковец М. Г., Капустин А. В. К вопросу о влиянии различных веществ, растворённых в воде, на гематологические показатели // *Ветеринария Кубани*. 2020. № 4. С. 31–33. [Semenov V. A., Rodin I. A., Sedov A. V., Yakovets M. G., Kapustin A. V. On influence of various substances dissolved in water on hematological parameters. *Veterinariya Kubani*, 2020, no. 4, pp. 31–33. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.33861/2071-8020-2020-4-31-33>
18. Славинский А. А. *Критерии функциональной активности нейтрофильных лейкоцитов, основанные на компьютерном анализе изображения и люминесценции* : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 14.01.29. Москва, 2000. 38 с. [Slavinsky A. A. *Kriterii funktsional'noi aktivnosti neitrofil'nykh leukotsitov, osnovannye* na komp'yuternom analize izobrazheniya i lyuminestsentsii : avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk : 14.01.29. Moscow, 2000, 38 p. (in Russ.)]
19. Сперанский И. И., Самойленко Г. Е., Лобачева М. В. Общий анализ крови – все ли его возможности исчерпаны? Интегральные индексы интоксикации как критерии оценки тяжести течения эндогенной интоксикации, её осложнений и эффективности проводимого лечения // *Здоровье Украины*. 2009. Т. 19, № 6. С. 51–57. [Speransky I. I., Samoilenko G. E., Lobacheva M. V. Obshchii analiz krovi – vse li ego vozmozhnosti ischerpany? Integral'nye indeksy intoksikatsii kak kriterii otsenki tyazhesti techeniya endogennoi intoksikatsii, ee oslozhnenii i effektivnosti provodimogo lecheniya. *Zdorov'e Ukrainy*, 2009, vol. 19, no. 6, pp. 51–57. (in Russ.)]
20. Стойко Ю. М., Ермаков Н. А. Клинические и фармакоэкономические аспекты консервативного лечения хронической венозной недостаточности нижних конечностей // *Хирургия. Приложение к журналу Consilium Medicum*. 2004. Т. 6, № 2. С. 23–26. [Stoiko Yu. M., Ermakov N. A. Klinicheskie i farmakoekonomicheskie aspekty konservativnogo lecheniya khronicheskoi venoznoi nedostatocchnosti niznikh konechnostei. *Khirurgiya. Prilozhenie k zhurnaluu Consilium Medicum*, 2004, vol. 6, no. 2, pp. 23–26. (in Russ.)]
21. Davis A. K., Maney D. L., Maerz J. C. The use of leukocyte profiles to measure stress in vertebrates: A review for ecologists. *Functional Ecology*, 2008, vol. 22, iss. 5, pp. 760–772. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2008.01467.x>
22. *CRC Handbook of Marine Mammal Medicine* / F. M. D. Gulland, L. A. Dierauf, K. L. Whitman (Eds). 3rd edition. Boca Raton, Florida : CRC Press, 2018, 1144 p.
23. Keogh M. J., Spoon T., Ridgway S. H., Jensen E., Van Bonn W., Romano T. A. Simultaneous measurement of phagocytosis and respiratory burst of leukocytes in whole blood from bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) utilizing flow cytometry. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 2011, vol. 144, iss. 3–4, pp. 468–475. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2011.08.017>
24. Lauderdale L. K., Walsh M. T., Mitchell K. A., Granger D. A., Mellen J. D., Miller L. J. Health reference intervals and values for common

- bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*), Indo-Pacific bottlenose dolphins (*Tursiops aduncus*), Pacific white-sided dolphins (*Lagenorhynchus obliquidens*), and beluga whales (*Delphinapterus leucas*). *PLoS One*, 2021, vol. 16, iss. 8, art. no. e0250332 (28 p.). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250332>
25. Nouri-Shirazi M., Bible B. F., Zeng M., Tamjidi S., Bossart G. D. Phenotyping and comparing the immune cell populations of free-ranging Atlantic bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) and dolphins under human care. *BMC Veterinary Research*, 2017, vol. 13, iss. 1, art. no. 78 (14 p.). <https://doi.org/10.1186/s12917-017-0998-3>
26. Tryland M., Thoresen S. I., Kovacs K. M., Lydersen C. Serum chemistry of free-ranging white whales (*Delphinapterus leucas*) in Svalbard. *Veterinary Clinical Pathology*, 2006, vol. 35, iss. 2, pp. 199–203. <https://doi.org/10.1111/j.1939-165x.2006.tb00114.x>

INDICES

IN THE EVALUATION OF THE FUNCTIONAL ACTIVITY OF BLOOD CELLS OF THE BOTTLENOSE DOLPHIN *TURSIOPS TRUNCATUS* (MONTAGU, 1821)

T. Seliverstova

Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation

E-mail: minzyuk@mail.ru

The content of cationic protein in granulocytes of the bottlenose dolphin *Tursiops truncatus* (Montagu, 1821) was established by calculating the average cytochemical coefficient. Its shortcomings were substantiated in visually determining the intensity of staining of the product of a cytochemical reaction on blood products and distributing cells into groups according to the amount of protein they contain. To assess the activity of a substance in a cell, computer programs were applied and a light microscope was used, which allows to minimize errors in morphometric measurements of objects. Individual parameters were calculated for the degree of filling and intensity of staining of cationic protein in granulocytes in bottlenose dolphins with and without taking into account the protein content in the entire blood volume. Such indicators allow carrying out comparative age-related, intraspecific, and interspecific studies in animals. As established, the content of cationic protein in granulocytes can vary greatly in different individuals of bottlenose dolphins, and its amount changes slightly with age.

Keywords: morphometry, average cytochemical coefficient, integral cytochemical index, cationic protein, granulocytes, bottlenose dolphin

УДК 594.185-15(268.45.04)

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОПУЛЯЦИИ
И ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ *MYA ARENARIA* LINNAEUS, 1758
В КОЛЬСКОМ ЗАЛИВЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ**

© 2024 г. **О. В. Смолькова**

Мурманский морской биологический институт РАН, Мурманск, Российская Федерация
E-mail: sm.olj@mail.ru

Поступила в редакцию 11.04.2023; после доработки 27.10.2023;
принята к публикации 27.08.2024; опубликована онлайн 09.09.2024.

Mya arenaria Linnaeus, 1758 (мия) — двустворчатый моллюск бореального происхождения. Ареал вида охватывает прибрежные умеренные воды Атлантического океана и северо-восточную часть Тихого океана, а также моря Северного Ледовитого океана — Баренцево и Белое. Поселения мии могут занимать обширные пространства в прибрежной полосе, где моллюски образуют большие скопления и являются доминирующим по биомассе видом среди представителей литорального макрозообентоса. *M. arenaria* способны выдерживать флуктуации факторов среды, а также оказывать влияние на процессы детритообразования и осадконакопления. Молодь моллюсков, заселяющая верхние слои грунта, представляет собой важный кормовой объект для морских птиц и промысловых видов рыб. Высокая эврибионтность позволяет рассматривать мию в качестве индикатора для оценки влияния климатических изменений на природную среду Арктики. Получение новых данных об особенностях биологии *M. arenaria* необходимо как для выявления общих закономерностей развития бентосных организмов в динамичных условиях морской среды, так и для понимания адаптивных особенностей отдельных видов долгоживущих эврибионтных моллюсков и оценки влияния на них различных экологических факторов. Изучение биологии *M. arenaria* может иметь практическое значение: не исключено, что мия станет перспективным объектом марикультуры в Арктическом регионе. В работе представлены результаты исследования современного состояния популяции и особенностей распространения моллюсков в Кольском заливе Баренцева моря. Материал собран в ходе экспедиции ММБИ РАН в 2021 г. Изучены количественные характеристики и размерно-возрастной состав поселений мии. Скопления *M. arenaria* зафиксированы на литорали западного и восточного берегов среднего и южного колен залива. Впервые за весь период исследований Кольского залива (1921–2021 гг.) моллюски обнаружены в эстуарной его части — на литорали у мыса Еловый (устье реки Тулома). Наибольшие показатели обилия отмечены на восточном берегу среднего колена залива — в губе Хлебная (67,1 экз.·м⁻²), наименьшие зарегистрированы на западном берегу — в губе Белокаменная (5,0 экз.·м⁻²). На мелководных участках в районе Абрамыса и в губе Ваенга мия плотных скоплений не образует. Исследованные поселения залива представлены особями в возрасте от 4 до 14 лет с вариацией размеров от 17,5 до 91,2 мм. Распространение *M. arenaria*, а также количественные и морфометрические характеристики её поселений связаны, вероятно, с гидрологическими особенностями залива (с интенсивностью движения водных масс в губах и бухтах, а также с циклоническим перемещением водных масс в южном колене). Отмеченное увеличение численности моллюсков и расширение ареала можно, по-видимому, интерпретировать как отклик вида на климатические изменения, происходящие в Арктическом регионе, и показатель снижения антропогенной нагрузки на прибрежные сообщества залива в целом.

Ключевые слова: двустворчатый моллюск *Mya arenaria*, распространение, состояние популяции, плотность, биомасса, размерно-возрастная структура, литораль, Кольский залив

Mya arenaria Linnaeus, 1758 — двустворчатый моллюск бореального происхождения, зарывающийся в грунт на глубину до 40 см [Свешников, 1963; Pfitzenmeyer, Drobeck, 1963, 1967]. Ареал охватывает прибрежные умеренные воды северной части Атлантического океана и северо-восточную часть Тихого океана, а также моря Северного Ледовитого океана — Баренцево и Белое. Вид встречается на атлантическом и тихоокеанском побережье Северной Америки, в Балтийском, Чёрном и Средиземном морях Восточной Атлантики [Голиков и др., 1985; Федяков, 1986; Carlton, 1992; Strasser, 1999; Wheaton et al., 2008; Zhang et al., 2018]. Поселения *M. arenaria* (далее — мия) могут занимать обширные пространства в прибрежной полосе, где моллюски образуют большие скопления и являются доминирующим по биомассе видом среди литорального макрозообентоса. Мия способна выдерживать изменения факторов среды в широких диапазонах [Федяков, 1986]. Вид устойчив к колебаниям солёности в пределах от 1 до 30 ‰ [Бергеп, 1986; Хлебович, Станкявичюс, 1979]; благоприятная для него температура — от +4 до +16 °C [GISD, 2023]. *M. arenaria* обладает высокой устойчивостью к содержанию в воде сероводорода и к дефициту кислорода [Свешников, 1963; Thumdrup, 1935]. Эврибионтность позволяет рассматривать этих моллюсков в качестве индикатора для оценки влияния долговременных климатических изменений на природную среду Арктики.

M. arenaria — один из ключевых компонентов прибрежных сообществ. Её скопления оказывают влияние на процессы детритообразования и осадконакопления, что определяет её роль в качестве вида-эдификатора. Молодь мии, заселяющая верхние слои илистого грунта, относится к числу важных кормовых объектов для морских птиц и для промысловых видов рыб [Marshall, Elliott, 1997; Piersma et al., 1998; Sutherland et al., 2000]. Моллюски отфильтровывают взвешенное органическое вещество водной толщи, улучшая качество воды [Forster, Zettler, 2004]. Как и другие двустворчатые моллюски-фильтраторы, *M. arenaria* служит индикатором состояния водной среды. Фильтруя воду, моллюски способны аккумулировать различные токсины, окислять органическое вещество и в некоторой степени регулировать трофность водоёмов [Loo, Rosenberg, 1996].

Получение новых данных об особенностях биологии мии необходимо как для выявления общих закономерностей развития бентосных организмов в динамичных условиях морской среды, так и для понимания адаптивных особенностей отдельных видов долгоживущих эврибионтных моллюсков и оценки влияния на них различных экологических факторов. Изучение биологии *M. arenaria* может иметь практическое значение. В Северной Америке мия является важным промысловым видом [Beal, 2002; Brousseau, 1979; Connell et al., 2007; Newcombe, 1935, 1936]. В Европе коммерческая эксплуатация моллюска практически не ведётся. Между тем имеются работы, посвящённые изучению особенностей роста мии. Так, датским учёным рассмотрена возможность использования этого вида в качестве промыслового объекта [Munch-Petersen, 1973]. Не исключено, что *M. arenaria* станет одним из перспективных объектов марикультуры и в Арктическом регионе.

В России исследования данного вида сосредоточены главным образом в Белом и Балтийском морях [Максимович, 1978; Cardoso et al., 2009; Gerasimova et al., 2016]. Имеются работы по изучению мии из Азово-Черноморского бассейна [Золотницкий, Сытник, 2020; Савикин, 2020; Савчук, 1970], где она является инвазивным видом. В дальневосточных морях проводится комплексный таксономический анализ *Mya japonica* Jay, 1857 — близкородственного для *M. arenaria* вида [Zhang et al., 2018]. Исследования сконцентрированы на уточнении таксономического статуса и географического ареала мии. Они показали, что ареал *M. arenaria* охватывает северо-восточную часть Тихого океана, а близкородственная *M. japonica* распространена в северной его части.

Сведения о биологии и особенностях распространения *M. arenaria* в Кольском заливе фрагментарны. Первые описания моллюсков мелководной части Кольского залива даны К. М. Дерюгиным [1915]. В 1921–1925 гг. сотрудниками Мурманской биологической станции проведены

исследования отдельных прибрежных участков, по результатам которых мия отмечена от губы Оленьей в северной части залива до устья реки Лавна в южном колене [Гурьянова и др., 1929]. В последующие 40 лет регулярного изучения донных сообществ залива не было. Мониторинг был возобновлён лишь в 1970-е гг. В 1984 г. сотрудники ПИНРО изучили центральную часть залива. В 1989 г. экспедиция ММБИ повторила эту съёмку. Данные исследования были проведены с судна с помощью дночерпателя Ван Вина и охватили донные сообщества глубоководной части залива. В 1991–1993 гг. выполнена бентосная съёмка литорали эстуария реки Тулома, по результатам которой моллюски отмечены не были [Гудимов, Фролов, 1997]. В 2005–2007 гг. в ходе береговых экспедиций ММБИ *M. arenaria* зарегистрирована в верхней сублиторали Кольского залива от посёлка Ретинское до Абрам-мыса на глубинах от 4 до 12 м [Фролов, 2009]; на литорали моллюски не встречены [Любина и др., 2009].

Кольский залив — крупнейший залив российской части Баренцева моря. Это типичный фьорд тектонно-эрозионно-ледникового происхождения [Берера, 1991]. Глубина залива постепенно убывает от входа в северном колене к вершине в южном колене. В берега залива вдаётся много губ, в его вершину впадают реки Тулома и Кола. Протяжённость по створным линиям составляет 58,7 км, расстояние по прямой от входа до вершины — 51 км. Общая площадь акватории залива — около 180 км². На его гидрологический режим оказывает влияние тёплое Мурманское прибрежное течение, при этом в кутовой части наиболее значительно воздействуют метеорологические условия примыкающей суши и пресноводный сток.

Со второй половины XX в. происходит увеличение средней глобальной температуры воздуха [Жилина, 2021]. Арктика — один из наиболее уязвимых для изменения климата регионов Земли: здесь потепление происходит быстрее, чем на планете в целом [Жилина, 2021; Пономарев и др., 2005]. Экологическая обстановка в арктических морях в настоящее время является напряжённой; основные проблемы — загрязнение окружающей среды, влияние последствий от происходящих глобальных изменений климата, снижение биоразнообразия и сокращение морских биологических ресурсов [Нерсесов, Римский-Корсаков, 2021; Стишов и др., 2013; Якименко, Иваненко, 2021]. В течение последних 30 лет температура увеличивалась во всех регионах северной полярной области. В целом линейный рост среднегодовой температуры составил около 2,43 °C за 30 лет (<http://www.aari.ru>). В арктических морях для 1936–2019 гг. всюду знак тренда положительный. За последний 30-летний период вода Баренцева моря потеплела примерно на 2,2 °C. С 1990-х гг. последствия климатических изменений неоднократно регистрировали в акватории и прибрежной зоне Кольского залива [Анциферова, Давыдов, 2009; Давыдов, 2001; Дженюк и др., 1997]. Климатические изменения сказываются на состоянии экосистем, и особенно чувствительны к потеплению бореальные виды; они реагируют на повышение температуры расширением ареала и увеличением численности [Матишов и др., 2014]. Для мониторинга изменений, происходящих в прибрежье, крайне важны исследования биологии и условий существования гидробионтов.

Цель данной работы — изучение распространения двустворчатого моллюска *Mya arenaria* в Кольском заливе Баренцева моря, оценка современного состояния популяции, описание и анализ морфометрических показателей и выделение факторов, оказывающих ключевое влияние на распространение мии в заливе.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Данные о распространении *M. arenaria* в Кольском заливе получены в ходе комплексной береговой экспедиции ММБИ РАН в 2021 г. Исследования проведены на литорали среднего и южного колена залива, от губы Ретинская до мыса Усов в устьевой части реки Тулома на западном берегу залива и от губы Ваенга до ручья Фадеев на восточном берегу. В южной части

залива (от мыса Усов до Абрам-мыса) отбор проб произведён в июне — после полного схода ледового покрова и припая, образующихся здесь в зимний период. На участках литорали среднего колена (губы Белокаменная, Ретинская, Хлебная и Ваенга), доступ к которым возможен круглый год, пробы отобраны в марте. Всего за период исследований собрано 234 экз. *M. arenaria*.

Количественный учёт мии проводили на литорали во время отлива рамкой площадью 0,1 м²; грунт изымали на глубину до 30–40 см и промывали через сито с размером ячеек 0,5 мм. В каждом районе отбирали по 10 проб. Солёность и температуру воды измеряли одновременно с отбором проб с помощью портативного рефрактометра и термометра с точностью до 1 ‰ и 1 °С соответственно. При морфометрическом анализе у каждого моллюска определяли штангенциркулем длину (L, мм), высоту (H, мм) и толщину раковины (D, мм) с точностью до 0,01 мм (рис. 1). Измеряли общую массу моллюска (W, г), массу раковины (W_r, г) и мягких тканей (W_m, г). Массу мантийной жидкости (W_w, г) рассчитывали как разницу между общей массой *M. arenaria* и массой раковины и мягких тканей. Для этого перед взвешиванием моллюсков содержали в ёмкостях с морской водой. Взвешивание производили на электронных весах с точностью до 0,01 г. Массу мягких тканей определяли после просушивания на фильтровальной бумаге. Оценивали долю массы раковины и мягких тканей в общей массе моллюсков (W_r/W и W_m/W соответственно). При описании размерно-весовых характеристик для каждого района исследования рассчитывали средние значения признаков (M, мм) и стандартное отклонение ($\pm SD$). Возраст мии определяли путём подсчёта годовых колец на раковине, которые образуются при зимней остановке роста и представляют собой утолщённые линии нарастания [Методы изучения двустворчатых моллюсков, 1990; Haskin, 1954].

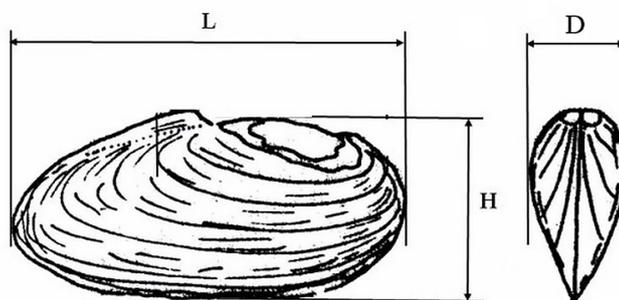


Рис. 1. Схема измерений раковины двустворчатых моллюсков [Наумов, 2006]: L — длина; H — высота; D — толщина

Fig. 1. Scheme of measurements of a bivalve shell [Naumov, 2006]: L, length; H, height; D, convexity

Характер распределения количественных и размерных показателей оценивали по критерию Колмогорова — Смирнова. Достоверность различий определяли с использованием индекса Уилкоксона — Манна — Уитни. Различия считали недостоверными при $p \geq 0,05$. Математические расчёты и классификацию данных проводили с помощью программного пакета STATISTICA 10.0 и электронных таблиц MS Office Excel 2010. Наличие связей внутри всей совокупности морфометрических признаков моллюсков определяли с применением кластерного анализа. Многомерный анализ проводили, используя значения морфометрических параметров моллюсков (размеров и массы тела). В качестве основных процедур были выбраны иерархический анализ и кластеризация методом k -средних. Оценку расстояний между группами признаков проводили методом Варда с указанием евклидовых расстояний между ними. Значимость различий между средними в группах проверяли с помощью дисперсионного анализа при уровне значимости $p \geq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В Кольском заливе поселения двустворчатого моллюска *M. arenaria* отмечены на литорали в губах Ретинская, Белокаменная и Хлебная, а также на литорали около мыса Еловый (рис. 2). В указанных районах мия образует скопления преимущественно в среднем горизонте литорали. Встречаемость в пробах — 70–100 %.

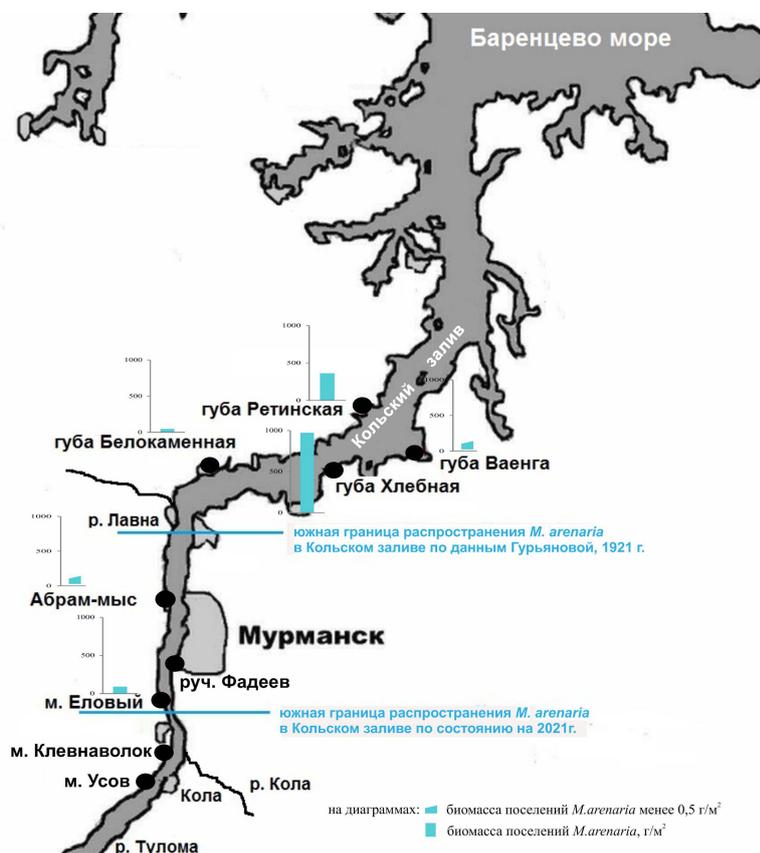


Рис. 2. Распространение и количественные характеристики поселений двустворчатых моллюсков *Mya arenaria* в Кольском заливе Баренцева моря

Fig. 2. Distribution and quantitative characteristics of the bivalve *Mya arenaria* settlements in the Kola Bay of the Barents Sea

M. arenaria встречена также на литорали в районе Абрам-мыса и в губе Ваенга, однако плотных скоплений в данных биотопах моллюски не формируют. Встречаемость мии в этих биотопах — 10–30 %. Южнее мыса Еловый (мыс Клевनावолок и мыс Усов) *M. arenaria* не обнаружена. Самой северной точкой, охваченной исследованиями, являлась губа Ретинская. Средние размеры моллюсков в изученных районах варьировали от $(32,8 \pm 5,11)$ мм на литорали губы Ваенга до $(55,6 \pm 13,4)$ мм в губе Ретинская при средней массе тела $(7,0 \pm 1,5)$ г и $(18,2 \pm 9,6)$ г соответственно. Наибольшие размеры и массу тела имели особи, собранные в губах Хлебная и Ретинская и около мыса Еловый, наименьшие — в губе Ваенга и на литорали Абрам-мыса. Максимальные размеры составили $91,2 \times 51,5 \times 36,8$ мм при массе тела 36,8 г (этот моллюск был обнаружен на литорали губы Хлебная).

Отдельные поселения мии в значительной степени различаются по размерно-возрастному составу. Наиболее крупное скопление расположено на восточном берегу среднего колена Кольского залива в биотопе заиленного мелкого песка губы Хлебная. Поселение занимает юго-восточную часть губы вблизи ручья и представлено особями в возрасте от 4 до 14 лет с длиной раковины от 30,0 до 91,2 мм. Моллюски сосредоточены преимущественно в среднем и нижнем

горизонтах литорали. Плотность поселения — $67,1 \text{ экз.}\cdot\text{м}^{-2}$, биомасса — $974 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$. Основную долю (40 %) в поселении составляют *M. arenaria* в возрасте 7–8 лет с длиной раковины 50,0–59,9 мм (рис. 3). Литораль губы пологая, представлена разными типами грунтов. Солёность воды в губе около уреза — 16–31 ‰, температура воды — от +1 °С в марте до +16 °С в августе.

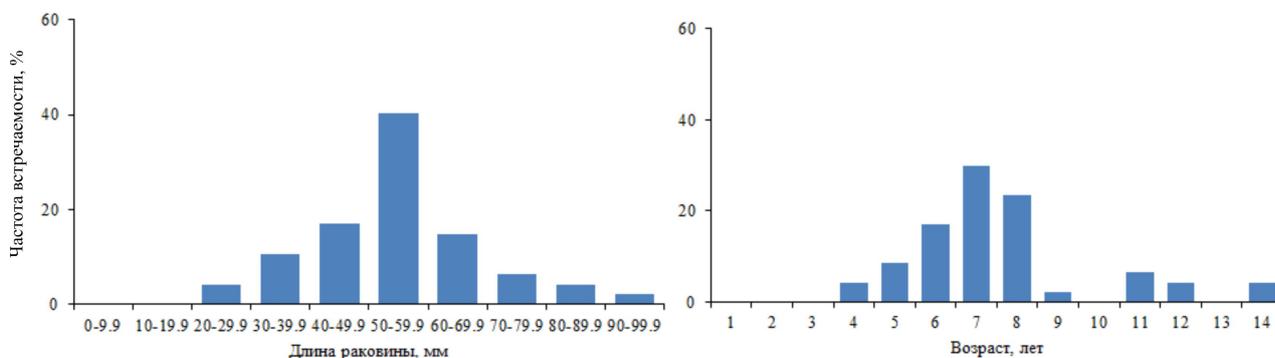


Рис. 3. Частотное распределение моллюсков *Mya arenaria* губы Хлебная по размеру и возрасту

Fig. 3. Frequency distribution of the size and age structure of the molluscs *Mya arenaria* in the Khlebnaya Bay

Южной границей распространения *M. arenaria* в Кольском заливе является небольшой участок литорали южного колена около мыса Еловый (эстуарий реки Тулома). Плотность поселения мии здесь составляет $8,2 \text{ экз.}\cdot\text{м}^{-2}$, биомасса — $92,3 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}$ (рис. 2). Размеры моллюсков варьируют от 23,4 до 68,2 мм. Возрастной ряд представлен особями от 4 до 11 лет. Наиболее часто встречаются *M. arenaria* в возрасте 6–7 лет (56 %) с длиной раковины от 40,0 до 70,0 мм (рис. 4). Доля особей старших возрастных групп (9–10 лет) составляет в поселении 17,4 %. Единично встречены моллюски 4 и 11 лет. По данным выборки можно прийти к выводу, что 2015 г. был наиболее благоприятным для пополнения этого поселения молодью. Биотоп литорали эстуария реки Тулома характеризуется наличием многочисленных литоральных ванн. Друг от друга они отделены грядами камней и песка. Наиболее крупные литоральные ванны имеют стоки. Литораль около мыса Еловый имеет протяжённость 150 м и представлена илисто-песчаным грунтом с валунными фракциями с фукоидами. Биотоп характеризуется высокой степенью распреснения. Солёность у уреза воды в отлив может составлять всего 7 ‰; температура воды в литоральных лужах в июне — +7 °С.

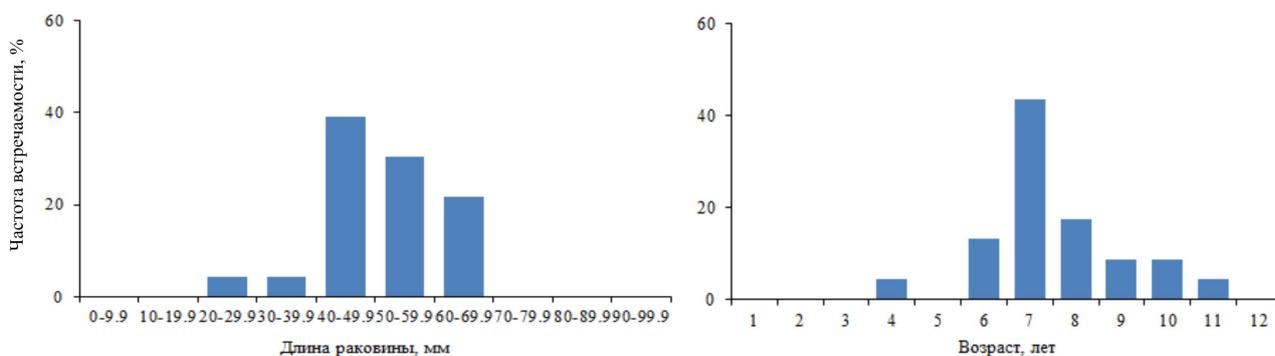


Рис. 4. Частотное распределение моллюсков *Mya arenaria* на литорали у мыса Еловый по размеру и возрасту

Fig. 4. Frequency distribution of the size and age structure of the molluscs *Mya arenaria* off the Elovoyi Cape

В губе Ретинская поселение мии расположено в устье впадающего ручья. Оно представлено особями в возрасте от 5 до 10 лет с длиной раковины от 30,5 до 80,0 мм. Плотность поселения — $35,0 \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$, биомасса — $364,0 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$. Основную долю ($> 60 \%$) составляют *M. arenaria* 6, 7 и 8 лет с длиной раковины 50 мм и более. Солёность воды в губе в течение года — 10–25 ‰, в мае в устье ручья значение снижается до 3 ‰. Ширина литорали — 30–50 м. Грунт — преимущественно илистый песок.

Скопление мии в губе Белокаменная расположено вблизи вытекающего на литораль ручья. Поселение моллюсков на литорали губы находится в угнетённом состоянии. Здесь отмечены самые низкие значения плотности и биомассы — $5 \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$ и $48 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$ соответственно (рис. 2). Размерное распределение характеризуется наличием двух групп *M. arenaria* — возрастом от 3 до 5 лет с длиной раковины 10–30 мм (39 %) и возрастом от 6 до 8 лет с длиной раковины более 50 мм (47,7 %). Средний размер особей составляет $(43,4 \pm 15,2)$ мм, масса тела — $(10,0 \pm 8,9)$ г. Губа отделена от залива не резко и представляет собой небольшую бухту на его западном берегу, расположенную к северу от мыса Белокаменный. Литораль широкая (протяжённость от берега до уреза воды в отлив — 130 м), с многочисленными валунными фракциями и поясом бурых водорослей в нижнем горизонте. Солёность воды в отлив около уреза воды колеблется от 14 до 22 ‰.

Моллюски в губе Ваенга встречаются единично, плотность распределения не превышает $(0,3 \pm 0,04) \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$ при биомассе $0,13 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$ (рис. 2). Губа расположена на восточном берегу Кольского залива и образует широкую открытую бухту. В кут губы впадает крупная река Ваенга, опресняющая исследуемый район до 16 ‰. Грунт в губе представлен в основном каменистыми россыпями, которые лишь изредка сменяются небольшими илистыми участками. Их фауна чрезвычайно бедна [Гурьянова и др., 1929]. На участке литорали около Абрам-мыса *M. arenaria* отмечена единично, плотность распределения не превышает $(0,1 \pm 0,03) \text{ экз.} \cdot \text{м}^{-2}$ при биомассе $0,47 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$. Биотоп характеризуется интенсивным движением воды и значительными колебаниями солёности за счёт стока крупных рек Кола и Тулома. Солёность во время прилива составляет 34 ‰, во время отлива — 10 ‰ [Малавенда, Малавенда, 2012]. Ширина приливно-отливной зоны — около 100 м, уклон литорали не превышает 5° [Кольский залив, 2009]. Размерно-весовые характеристики мии, отмеченной на литорали губы Ваенга и Абрам-мыса, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Размерно-весовые показатели моллюсков *Mya arenaria*, обитающих на литорали губы Ваенга и Абрам-мыса

Table 1. Size and weight indicators of the molluscs *Mya arenaria* inhabiting the intertidal zone of the Vayenga Bay and cape Abram-mys

Район исследования	L, мм	H, мм	D, мм	W, г	W _г , г	W _м , г	W _в , г
Губа Ваенга (N = 6)	$32,8 \pm 5,1$	$24,9 \pm 4,5$	$15,0 \pm 4,2$	$7,0 \pm 1,5$	$2,7 \pm 1,0$	$3,9 \pm 0,9$	$1,5 \pm 0,03$
Абрам-мыс (N = 3)	$34,3 \pm 10,5$	$16,3 \pm 1,8$	$8,4 \pm 1,3$	$12,1 \pm 0,2$	$4,6 \pm 0,1$	$3,8 \pm 0,2$	$1,2 \pm 0,03$

Примечание: N — количество моллюсков. Использованные сокращения расшифрованы в разделе «Материал и методы».

Note: N, the number of molluscs. The abbreviations used are explained in “Material and Methods” section.

В исследуемых районах относительная масса раковины варьирует от 38 до 61 % от общей массы тела моллюска (рис. 5). Наибольшие показатели выявлены для губы Хлебная, наименьшие — для губы Белокаменная. Доля массы раковины (W_r/W) *M. arenaria* в губе Ретинская и в районе Абрам-мыса составила 55 %, на литорали мыса Еловый — 48 %, в губе Ваенга — 39 %. Относительная масса мягких тканей максимальна у мии в губе Ваенга (56 %) и минимальна у моллюсков

в губе Белокаменная (33 %). Среднее количество мантийной жидкости — 6,5 %, с колебанием от 2 % (губа Хлебная) до 29 % (губа Белокаменная). Соотношение массы раковины и массы мягких тканей у особей на литорали около Абрам-мыса и у мыса Еловый составляло практически 1 : 1, доля мантийной жидкости не превышала 0,5 %.

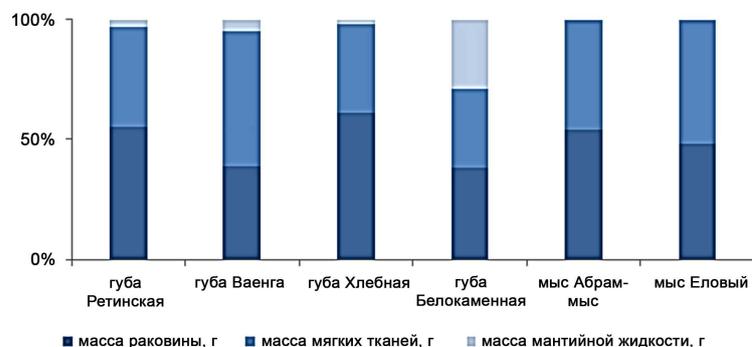


Рис. 5. Процентное соотношение весовых показателей моллюсков *Mya arenaria* в исследованных районах Кольского залива

Fig. 5. The ratio between weight parameters of the molluscs *Mya arenaria* in the studied areas of the Kola Bay

Изменение размеров и массы тела мии в зависимости от широтного расположения исследуемых районов выявить не удалось, поэтому для установления связей в пределах всей совокупности морфологических признаков особей, собранных на литорали Кольского залива, использован кластерный анализ (рис. 6).

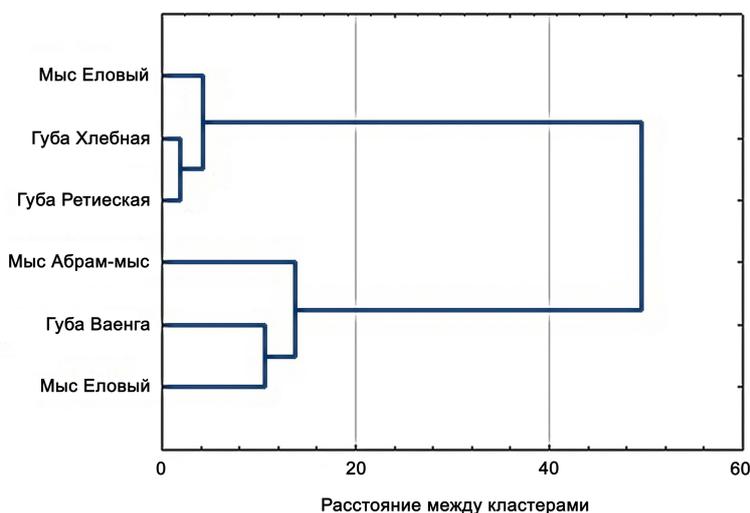


Рис. 6. Дендрограмма сходства морфометрических характеристик поселений моллюсков *Mya arenaria* на литорали исследованных районов Кольского залива

Fig. 6. Dendrogram of similarity of morphometric characters for settlements of the molluscs *Mya arenaria* in the intertidal zone in the studied areas of the Kola Bay

Анализируемую совокупность разделили на две группы. Группу 1 составили моллюски, обитающие в биотопах губ Ретинская и Хлебная, а также мыса Еловый. Поселения имели наибольшие показатели плотности и биомассы; *M. arenaria* характеризовалась максимальными средними значениями длины, высоты и толщины раковины. Группу 2 составляли моллюски из поселений в губах Ваенга и Белокаменная и в районе Абрам-мыса. В этих биотопах поселения имели наименьшие показатели плотности и биомассы, а *M. arenaria* характеризовалась более низкими значениями морфометрических признаков, чем у первой группы (табл. 2).

Таблица 2. Классификация морфометрических характеристик моллюсков *Mya arenaria* (метод *k*-средних) и оценка значимости различий (критерий Фишера)

Table 2. Classification of morphometric characters of the molluscs *Mya arenaria* (*k*-means clustering) and assessment of the significance of differences (*F*-test)

Параметр	Группа 1, <i>M</i> ± <i>SD</i>	Группа 2, <i>M</i> ± <i>SD</i>	Дисперсионный анализ	
			<i>F</i> -критерий	уровень значимости (<i>p</i>)
Длина раковины (L, мм)	54,0 ± 1,83	36,8 ± 5,74	24,37953	0,007830
Высота раковины (H, мм)	32,6 ± 0,87	22,3 ± 5,18	11,61329	0,027081
Толщина раковины (D, мм)	20,3 ± 1,03	13,1 ± 4,13	8,43078	0,043960

Примечание: *M* — среднее значение; *SD* — стандартное отклонение.

Note: *M*, the mean value; *SD*, the standard deviation.

Дополнение полученных данных проведено методом *k*-средних. Дисперсионный анализ показал достоверность различий между двумя группами ($p < 0,05$). Наибольшим сходством размерных характеристик в группе 1 обладают особи в губах Хлебная и Ретинская (евклидово расстояние 0,82), в группе 2 — в губах Ваенга и Белокаменная (евклидово расстояние 1,58).

ОБСУЖДЕНИЕ

Распространение *M. arenaria* и количественные и морфометрические характеристики поселений в различных районах Кольского залива весьма разнообразны. Наибольшая плотность поселения отмечена в губе Хлебная. Сравнительно высокие показатели обилия получены в губе Ретинская. Наименьшая плотность поселений моллюсков зафиксирована на литорали губы Белокаменная. На мелководных участках в районе Абрам-мыса и губы Ваенга мия плотных скоплений не образует. Показатели обилия моллюсков сопоставимы с количественными характеристиками этого вида из других районов. Схожие значения численности отмечены в Белом море [Smolkova, 2021] и в Керченском проливе Чёрного моря [Иванов, Синегуб, 2007]. Количественные характеристики поселения *M. arenaria* губы Хлебная, относящейся к умеренно загрязнённым районам Кольского залива [Информационный бюллетень, 2012], близки к показателям обилия моллюсков в юго-восточной части Онежского залива Белого моря [Smolkova, 2021] и превышают показатели поселений мелководных и более чистых районов Восточного Мурмана [Смолькова, Мещеряков, 2023]. Размерно-возрастной состав исследованных поселений Кольского залива представлен особями размером от 30,0 до 91,2 мм в возрасте от 4 до 14 лет, с превалированием средних возрастных групп, от 6 до 8 лет (частота встречаемости — от 47 до 69 %). Отмечено отсутствие в пробах моллюсков в возрасте 1–2 лет и сеголетов, что для поселений этого вида является вполне закономерным и описанным ранее явлением [Максимович, 2004]. Неоднородность размерно-возрастных характеристик поселений мии возникает из-за различий режима пополнения молодью, внутривидовой и межвидовой конкуренции, а также гибели *M. arenaria* на ранних стадиях развития.

Ведущими факторами, оказывающими влияние на распределение моллюсков в заливе и на количественные показатели поселений, являются, скорее всего, гидрологические процессы (динамика вод, течения и водообмен). Суммарный перенос вод в заливе складывается из приливных, стоковых и ветровых течений. Основную роль играют приливные течения, вызванные баренцевоморской приливной волной. Приливные течения здесь правильные полусуточные, они изменяются в зависимости от площади поперечного сечения залива. Скорость течения уменьшается от поверхностного горизонта к придонному и на горизонте менее 10 м не превышает 5–10 см·с⁻¹

в среднем колене и $5 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ в северном. Наибольшая скорость течений характерна для южной части залива: здесь значения достигают $100 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ [Кольский залив, 1997]. Приливно-отливные течения в Кольском заливе захватывают практически всю водную массу в губах и заливах и служат основным источником поступления органических веществ и кислорода, необходимых для жизнедеятельности моллюсков. Однако в условиях интенсивного движения водных масс молодые, недавно осевшие особи могут быть подвержены постларвальному пассивному переносу в толще воды [Roegner et al., 1995].

Для юго-восточной части Северного моря показано, что при интенсивном движении водных масс вместе с донными отложениями возможно перемещение большого количества молодежи мии с длиной раковины до 15 мм [Emerson, Grant, 1991]. В Балтийском море пассивный перенос в толще воды отмечен для моллюсков с длиной раковины до 25 мм [Kube, 1996]. Прибрежные акватории у мыса Еловый и Абрам-мыса характеризуются наибольшей динамикой движения водных масс, поэтому молодые особи, обитающие в поверхностных слоях грунта, могут быть снесены течением в более закрытые акватории залива с менее динамичным гидрологическим режимом. Кутовые участки губ Ретинская и Хлебная — закрытые от основной части залива акватории, имеющие пологую литораль и характеризующиеся слабой интенсивностью приливно-отливных течений. Ручьи, впадающие в кутовые части этих губ, оказывают умеренное распресняющее воздействие и обеспечивают вынос органического вещества, пригодного для питания моллюсков. Условия существования здесь вполне благоприятны для *M. arenaria*, что отражается в сравнительно высоких показателях плотности и биомассы поселений.

Помимо гидрологических условий, на распространение мии в Кольском заливе могут влиять климатические изменения и связанные с ними процессы образования первичной продукции и переноса взвешенного вещества. Рост средней годовой температуры воды и воздуха привёл к тому, что прибрежные акватории залива стали более подвержены распреснению за счёт интенсивного таяния снега весной. Увеличение пресного стока в кутовой части определяет повышение интенсивности движения воды [Кравец, 2012]. В зоне смешения морских и пресных вод отмечено высокое содержание взвешенного вещества [Митяев, Герасимова, 2009]; здесь происходит интенсивное образование первичной продукции за счёт продукционной деятельности фитопланктона [Макаревич и др., 2004]. Распределение взвеси связано с циклоническим перемещением водных масс в заливе. С юга опреснённые водные массы распространяются вдоль восточного берега южного колена, в зоне сопряжения южного и среднего колен они сталкиваются с морскими водами, которые движутся с севера, и, совершая разворот, возвращаются вдоль западного берега южного колена. Восточный берег южной части залива — зона транзита взвешенного вещества, а западный — зона его концентрации и, возможно, аккумуляции [Митяев, Герасимова, 2009].

Взвешенное вещество играет большую роль в жизнедеятельности литоральных организмов. По способу питания *M. arenaria* является малоподвижным сестонофагом, фильтрующим седиментатором [Бескупская, 1963; Методы изучения двустворчатых моллюсков, 1990]; для её питания требуется постоянный приток взвешенного вещества. Мия профильтровывает придонную воду, отбирая из неё питательные частицы. Основную часть пищи этого вида составляет взвешенный детрит, а также диатомовые водоросли рода *Coscinodiscus* и частицы макрофита *Ascophyllum nodosum* [Бескупская, 1963]. Кроме того, малоподвижный образ жизни снижает способность этих моллюсков конкурировать за благоприятные участки литорали с более подвижными представителями беспозвоночных, обитающими в схожих условиях (другими видами *Bivalvia*, многощетинковыми червями и пр.) [Свешников, 1963]. В силу этого *M. arenaria* приспособилась к обитанию в биотопах, которые недоступны для многих других видов (кутовые сильно распреснённые участки губ и заливов, с солёностью от 10 ‰), где моллюски имеют возможность получать достаточное количество пищи, снижая при этом затраты на конкуренцию [Смолькова, 2012].

Известно, что в начале XX в. южной границей распространения *M. arenaria* в Кольском заливе был предустьевый участок реки Лавна на западном берегу [Гурьянова и др., 1929]. Далее, при продвижении на юг вдоль устья реки Тулома до острова Немецкий, моллюски встречены не были; начиная от острова Немецкий, исследователи наблюдали постепенный переход от морской фауны к пресноводной. По данным наших работ, проведённых в 2021 г., южной границей распространения мии в заливе является участок литорали около мыса Еловый, что на 15 км южнее участка реки Лавна. Литораль около мыса Еловый, где нами отмечены моллюски *M. arenaria* (впервые за весь период исследований литорали Кольского залива), располагается на западном берегу южного колена, в зоне концентрации и аккумуляции взвеси.

Различия количественных показателей поселений мии в заливе могут также быть связаны с влиянием антропогенных факторов на среду обитания. Даже при высоком пороге устойчивости к изменению факторов среды *M. arenaria* находится в угнетённом состоянии в биотопах, подверженных значительному антропогенному влиянию и представляющих собой заиленные эвтрофированные участки литорали. Сильное заиление негативно отражается на жизнедеятельности мии [Winther, Gray, 1985]. Наличие подвижных слоёв грунта препятствует формированию неоплывающих норок, что приводит к гибели моллюсков [Свешников, 1963]. Ранее при описании скоплений мии на литорали губы Хлебная была отмечена сильная обратная зависимость между содержанием в грунте мелких алевритовых и пелитовых фракций и плотностью поселения моллюсков [Смолькова, Мещеряков, 2023]. В районах, акватории которых подвержены большему антропогенному прессу и характеризуются более интенсивной эвтрофикацией (губы Ваенга и Белокаменная, Абрам-мыс), поселения *M. arenaria* находятся в угнетённом состоянии, их количественные показатели имеют низкие значения. В районах с меньшей антропогенной нагрузкой (губы Ретинская и Хлебная) скопления имеют более высокую плотность и биомассу. А присутствие мии в южной части Кольского залива может быть связано не только с влиянием климатических изменений, но и с улучшением качества вод, а также со снижением антропогенного пресса.

Кольский залив отнесён к умеренно загрязнённым участкам морской акватории на мурманском побережье Баренцева моря [Информационный бюллетень, 2012]. Современный уровень фонового загрязнения вод и особенно донных осадков Кольского залива ещё достаточно высок, однако фиксируемое с 1980-х гг. постепенное снижение, несомненно, ведёт к улучшению состояния донной фауны [Павлова и др., 2019]. По данным ежегодного мониторинга ГОИН [2021], качество вод в районе водопоста в торговом порту города Мурманска в 2021 г. значительно улучшилось. Индекс загрязнённости вод (ИЗВ = 0,70) снизился до II класса («чистые»). В 2018–2020 гг. ИЗВ составлял 0,93–1,13 и относился к III классу («умеренно загрязнённые»). Содержание фосфатов в 2021 г. сократилось в среднем в 1,5 раза по сравнению с таковым в предыдущем году. Приоритетными загрязняющими веществами остаются нефтяные углеводороды, медь и железо. Концентрация нефтяных углеводородов в 2021 г. впервые была ниже уровня ПДК и составила 0,034 мг·дм⁻³. Максимальное значение зафиксировано в мае — 1,3 ПДК. Средняя концентрация меди стала меньше и немного превысила норму (5,2 мкг·дм⁻³). Среднегодовое содержание железа также стало ниже прошлогоднего, значение составило 0,46 ПДК. Концентрация кислорода в поверхностном слое вод в районе водопоста города Мурманска (станция отбора воды, наиболее близкая к южной границе распространения моллюсков в заливе) уменьшилась: среднегодовое содержание составило 9,3 мг О₂·дм⁻³ против 11,8 мг О₂·дм⁻³ в 2020 г.

Выводы. Получена новая информация о распространении двустворчатого моллюска *Mya arenaria* на литорали Кольского залива Баренцева моря. Впервые за период исследований залива (1921–2021 гг.) моллюски обнаружены в его эстуарной части, на литорали у мыса Еловый, что является, по-видимому, откликом на климатические изменения, происходящие в Арктическом регионе, и свидетельствует о формировании благоприятных условий обитания в районах,

ранее непригодных для этого. Наиболее крупное поселение мии расположено на юго-восточном берегу среднего колена залива в биотопе заиленного мелкого песка губы Хлебная. Южной границей распространения вида в Кольском заливе определён участок литорали западного берега около мыса Еловый (устье реки Тулома). Распространение моллюсков, вероятнее всего, определяется гидрологическими особенностями Кольского залива (интенсивностью движения водных масс в губах и заливах, циклоническим перемещением водных масс в южном колене и степенью заиления и эвтрофикации исследованных районов). Полученные данные о биологии и распространении двустворчатого моллюска *M. arenaria* в Кольском заливе Баренцева моря в дальнейшем послужат базой для мониторинга возможных изменений, вызванных антропогенным воздействием или климатическими флуктуациями.

Работа выполнена в рамках темы НИР ММБИ РАН № 9-22-01 (1.6.16) «Донные биоценозы Баренцева моря, его водосборного бассейна и сопредельных вод в современных условиях», № гос. регистрации 122020900044-2 (FMEE-2022-0001).

Благодарность. Выражаю большую благодарность сотрудникам ММБИ РАН к. б. н. М. М. Куклиной за помощь в работе над статьёй и к. б. н. Т. И. Широколовой за консультацию и помощь в поиске литературы по гидрологии Кольского залива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анциферова А. Р., Давыдов А. А. Современные климатические изменения // *Кольский залив: освоение и рациональное природопользование* / отв. ред. Г. Г. Матишов. Москва : Наука, 2009. С. 13–20. [Antsiferova A. R., Davydov A. A. Sovremennye klimaticheskie izmeneniya. In: *Kol'skii zaliv: osvoenie i ratsional'noe prirodopol'zovanie* / G. G. Matishov (Ed.). Moscow : Nauka, 2009, pp. 13–20. (in Russ.)]
2. Бергер В. Я. *Адаптации морских моллюсков к изменениям солёности среды*. Ленинград : Наука, Ленингр. отд-ние, 1986. 216 с. (Исследование фауны морей ; т. 32 (40)). [Berger V. Ya. *Adaptations of Marine Molluscs to Environmental Salinity Changes*. Leningrad : Nauka, Leningr. otd-nie, 1986, 216 p. (Explorations of the Fauna of the Sea ; vol. 32 (40)). (in Russ.)]
3. *Берега* / П. А. Каплин, О. К. Леонтьев, С. А. Лукьянова, Л. Г. Никифоров. Москва : Мысль, 1991. 479 с. (Природа мира). [Berega / P. A. Kaplin, O. K. Leont'ev, S. A. Luk'yanova, L. G. Nikiforov. Moscow : Mysl', 1991, 479 p. (Priroda mira). (in Russ.)]
4. Бескупская Т. И. Питание некоторых массовых литоральных беспозвоночных Белого моря // *Труды Кандалакшского государственного заповедника*. 1963. Вып. 4. С. 135–158. [Beskupskaia T. I. Pitaniye nekotorykh massovykh litoral'nykh bespozvonochnykh Belogo morya. *Trudy Kandalakshskogo gosudarstvennogo zapovednika*, 1963, iss. 4, pp. 135–158. (in Russ.)]
5. Голиков А. Н., Скарлато О. А., Максимович Н. В., Матвеева Т. А., Федяков В. В. Фауна и экология раковинных моллюсков губы Чупа Белого моря // *Биоценозы губы Чупа Белого моря и их сезонная динамика*. Ленинград : Наука, Ленингр. отд-ние, 1985. С. 185–229. (Исследования фауны морей ; т. 31 (39)). [Golikov A. N., Skarlato O. A., Maksimovich N. V., Matveeva T. A., Fedyaev V. V. Composition and ecology of shell-bearing molluscs of the Chupa inlet (White Sea). In: *Biocenoses of the Chupa Inlet of the White Sea and Their Seasonal Dynamics*. Leningrad : Nauka, Leningr. otd-nie, 1985, pp. 185–229. (Explorations of the Fauna of the Sea ; vol. 31 (39)). (in Russ.)]
6. Гудимов А. В., Фролов А. А. Литоральные донные сообщества эстуария р. Тулома и кута залива // *Кольский залив: океанография, биология, экосистемы, поллютанты*. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 1997. С. 123–133. [Gudimov A. V., Frolov A. A. Litoral'nye donnye soobshchestva estuariya r. Tuloma i kuta zaliva. In: *Kol'skii zaliv: okeanografiya, biologiya, ekosistemy, pollyutanty*. Apatity : Izd-vo KNTs RAN, 1997, pp. 123–133. (in Russ.)]
7. Гурьянова Е. Ф., Закс И. Г., Ушаков П. В. Литораль Кольского залива. Часть II // *Труды Ленинградского общества естествоиспытателей*.

1929. Т. 59, вып. 2. С. 17–107. [Gur'yanova E. F., Zaks I. G., Ushakov P. V. Litoral' Kol'skogo zaliva. Chast' II. *Trudy Leningradskogo obshchestva estestvoispytatelei*, 1929, vol. 59, iss. 2, pp. 17–107. (in Russ.)]
8. Давыдов А. А. Изменения температуры воздуха на Кольском полуострове и ледовитости Баренцева моря во второй половине XX века // *Вековые изменения морских экосистем Арктики. Климат, морской перигляциал, биопродуктивность*. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2001. С. 291–297. [Davydov A. A. Izmeneniya temperatury vozdukhа na Kol'skom poluostrove i ledovitosti Barentseva moryа vo vtoroi polovine XX veka. In: *Vekovye izmeneniya morskikh ekosistem Arktiki. Klimat, morskoi periglyatsial, bioproduktivnost'*. Apatity : Izd-vo KNTs RAN, 2001, pp. 291–297. (in Russ.)]
 9. Дерюгин К. М. *Фауна Кольского залива и условия её существования*. Петроград : Типография Императорской академии наук, 1915. 929 с. (Записки Императорской академии наук. Сер. 8. 1915. Т. 34, № 1). [Deryugin K. M. *Fauna Kol'skogo zaliva i usloviya ee sushchestvovaniya*. Petrograd : Tipografiya Imperatorskoi akademii nauk, 1915, 929 p. (Zapiski Imperatorskoi akademii nauk, ser. 8, 1915, vol. 34, no. 1). (in Russ.)]
 10. Дженюк С. Л., Коротков С. В., Савельев С. П. Динамика вод // *Кольский залив: океанография, биология, экосистемы, поллютанты*. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 1997. Гл. 3.2. С. 59–67. [Dzhenyuk S. L., Korotkov S. V., Savel'ev S. P. Dinamika vod. In: *Kol'skii zaliv: okeanografiya, biologiya, ekosistemy, pollyutanty*. Apatity : Izd-vo KNTs RAN, 1997, chap. 3.2, pp. 59–67. (in Russ.)]
 11. Жилина И. Ю. Потепление в Арктике: возможности и риски // *Экономические и социальные проблемы России*. 2021. № 1 (45). С. 66–87. [Zhilina I. Yu. Warming in the Arctic: Opportunities and risks. *Ekonomicheskie i sotsial'nye problemy Rossii*, 2021, no. 1 (45), pp. 66–87. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.31249/espr/2021.01.04>
 12. Золотницкий А. П., Сытник Н. А. Характеристика аллометрического роста песчаной ракушки мии (*Mya arenaria* Linnaeus, 1758) Южной части Азовского моря // *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2020. Т. 3, № 3. С. 56–66. [Zolotnitskiy A. P., Sytnik N. A. Characterization of the allometric growth of soft-shell clam (*Mya arenaria* Linnaeus, 1758) in the southern Azov Sea. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya*, 2020, vol. 3, no. 3, pp. 56–66. (in Russ.)]. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2020_3_3_56
 13. Иванов Д. А., Синегуб И. А. Трансформация биоценозов Керченского пролива после вселения хищного моллюска *Rapana thomasiаna* и двустворчатых *Mya arenaria* и *Cunearca cornea* // *Современные проблемы экологии Азово-Черноморского региона : материалы III Международной конференции* (Керчь, 10–11 октября 2007 г.). Керчь : Изд-во ЮГНИРО, 2007. С. 45–51. [Ivanov D. A., Sinegub I. A. Transformation of the Kerch Strait biocenoses after invasion of predatory mollusc *Rapana thomasiаna* and bivalves *Mya arenaria* and *Cunearca cornea*. In: *Current Problems of the Azov–Black Sea Region Ecology : materials of the III International Conference* (Kerch, 10–11 October, 2007). Kerch : YugNIRO Publishers', 2007, pp. 45–51. (in Russ.)]
 14. *Информационный бюллетень о состоянии геологической среды прибрежно-шельфовых зон Баренцева, Белого и Балтийского морей в 2012 г.* Санкт-Петербург : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. 111 с. [*Informatsionnyi byulleten' o sostoyanii geologicheskoi sredy pribrezhno-shel'fovyykh zon Barentseva, Belogo i Baltiiskogo morei v 2012 g.* Saint Petersburg : Kartografi-cheskaya fabrika VSEGEI, 2013, 111 p. (in Russ.)]
 15. *Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2021*. Москва : Наука, 2022. С. 115–123. [*Kachestvo morskikh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam. Ezhegodnik 2021*. Moscow : Nauka, 2022, pp. 115–123. (in Russ.)]
 16. *Кольский залив: океанография, биология, экосистемы, поллютанты*. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 1997. 256 с. [*Kol'skii zaliv: okeanografiya, biologiya, ekosistemy, pollyutanty*. Apatity : Izd-vo KNTs RAN, 1997, 256 p. (in Russ.)]
 17. *Кольский залив: освоение и рациональное природопользование* / отв. ред. Г. Г. Матишов. Москва : Наука, 2009. 381 с. [*Kol'skii zaliv: osvoenie i ratsional'noe prirodopol'zovanie* / G. G. Matishov (Ed.). Moscow : Nauka, 2009, 381 p. (in Russ.)]

18. Кравец П. П. Состояние поселений *Mytilus edulis* L. Мурманского побережья Баренцева моря // *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2012. Т. 15, № 3. С. 526–532. [Kravets P. P. Sostoyanie poselenii *Mytilus edulis* L. Murmanskogo poberezh'ya Barentseva morya. *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 15, no. 3, pp. 526–532. (in Russ.)]
19. Любина О. С., Ахметчина О. Ю., Фролова Е. А., Фролов А. А., Дикаева Д. Р., Гарбуль Е. А. Зообентос литорали и sublиторали. Количественное распределение, пространственно-временная изменчивость // *Кольский залив: освоение и рациональное природопользование* / отв. ред. Г. Г. Матишов. Москва : Наука, 2009. С. 161–182. [Lyubina O. S., Akhmetchina O. Yu., Frolova E. A., Frolov A. A., Dikaeva D. R., Garbul E. A. Zoobentos litorali i sublitorali. Kolichestvennoe raspredelenie, prostranstvenno-vremennaya izmenchivost'. In: *Kol'skii zaliv: osvoenie i ratsional'noe prirodopol'zovanie* / G. G. Matishov (Ed.). Moscow : Nauka, 2009, pp. 161–182. (in Russ.)]
20. Макаревич П. Р., Ларионов В. В., Дружкова Е. И. Динамика фитопланктона в эстуарных областях северных морей в период полярной ночи // *Альгология*. 2004. Т. 14, № 2. С. 137–142. [Makarevich P. R., Larionov V. V., Druzhkova E. I. Phytoplankton dynamics in estuary areas of northern seas in the polar night period. *Al'gologiya*, 2004, vol. 14, no. 2, pp. 137–142. (in Russ.)]
21. Максимович Н. В. *О закономерностях организации популяций морских двустворчатых моллюсков* : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 00.03.18. Санкт-Петербург, 2004. 48 с. [Maksimovich N. V. *O zakonomernostyakh organizatsii populyatsii morskikh dvustvorchatykh molluskov* : avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk : 00.03.18. Saint Petersburg, 2004, 48 p.]
22. Максимович Н. В. Особенности экологии и биоэнергетические свойства популяций *Mya arenaria* L. (Bivalvia) в губе Чупа // *Вестник Ленинградского государственного университета. Серия 3: Биология*. 1978. № 21. С. 28–36. [Maksimovich N. V. Osobennosti ekologii i bioenergeticheskie svoystva populyatsii *Mya arenaria* L. (Bivalvia) v gube Chupa. *Vestnik Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 3: Biologiya*. 1978. № 21. С. 28–36. (in Russ.)]
23. Малавенда С. С., Малавенда С. В. Черты деградации в фитоценозах южного и среднего колен Кольского залива Баренцева моря // *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2012. Т. 15, № 4. С. 794–802. [Malavenda S. S., Malavenda S. V. Cherty degradatsii v fitotsenozakh yuzhnogo i srednego kolen Kol'skogo zaliva Barentseva morya. *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 15, no. 4, pp. 794–802. (in Russ.)]
24. Матишов Г. Г., Дженюк С. Л., Жичкин А. П., Моисеев Д. В. Экосистемы арктического шельфа в условиях современных климатических изменений // *Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата* : сборник тезисов Всероссийской конференции с международным участием / сост. С. В. Рябченко ; Северный Арктический федеральный университет имени М. В. Ломоносова. Архангельск : ИД САФУ, 2014. С. 86–87. [Matishov G. G., Dzhenyuk S. L., Zhichkin A. P., Moiseev D. V. Ekosistemy arkticheskogo shel'fa v usloviyakh sovremennykh klimaticheskikh izmenenii. In: *Sostoyanie arkticheskikh morei i territorii v usloviyakh izmeneniya klimata* : sbornik tezisov Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem / S. V. Ryabchenko (Contr.) ; Severnyi Arkticheskii federal'nyi universitet imeni M. V. Lomonosova. Arkhangelsk : ID SAFU, 2014, pp. 86–87. (in Russ.)]
25. *Методы изучения двустворчатых моллюсков* / под ред. Г. Л. Шкорбатова, Я. И. Старобогатова. Ленинград : Зоологический институт, 1990. 208 с. (Труды Зоологического института АН СССР ; т. 219). [Metody izucheniya dvustvorchatykh molluskov / G. L. Shkorbatov, Ya. I. Starobogatov (Eds). Leningrad : Zoologicheskii institut, 1990, 208 p. (Trudy Zoologicheskogo instituta AN SSSR ; vol. 219). (in Russ.)]
26. Митяев М. В., Герасимова М. В. Взвешенное вещество в южном и среднем коленах залива // *Кольский залив: освоение и рациональное природопользование* / отв. ред. Г. Г. Матишов. Москва : Наука, 2009. С. 52–55. [Mityaev M. V., Gerasimova M. V. Vzveshennoe veshchestvo v yuzhnom i srednem kolenakh zaliva. In: *Kol'skii*

- zaliz: osvoenie i ratsional'noe prirodopol'zovanie / G. G. Matishov (Ed.). Moscow : Nauka, 2009, pp. 52–55. (in Russ.)]
27. Наумов А. Д. *Двустворчатые моллюски Белого моря. Опыт эколого-фаунистического анализа*. Санкт-Петербург : Зоол. ин-т РАН, 2006. 351 с. (Исследования фауны морей ; т. 59 (67)). [Naumov A. D. *Clams of the White Sea. Ecological and Faunistic Analysis*. Saint Petersburg : Zool. in-t RAN, 2006, 351 p. (Explorations of the Fauna of the Sea ; vol. 59 (67)). (in Russ.)]
 28. Нерсесов Б. А., Римский-Корсаков Н. А. Результаты экологических исследований российских арктических морей // *Российская Арктика*. 2021. № 2 (13). С. 14–25. [Nersesov B. A., Rimsky-Korsakov N. A. Results of ecological studies of the Russian Arctic sea. *Rossiiskaya Arktika*, 2021, no. 2 (13), pp. 14–25. (in Russ.)]
 29. Павлова Л. В., Ахметчина О. Ю., Гарбуль Е. А., Дикаева Д. Р., Зимина О. Л., Носкович А. Э., Фролов А. А., Фролова Е. А. Современное состояние зообентоса сублиторали Кольского залива (Баренцево море) // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2019. Т. 10, № 3–6. С. 35–75. [Pavlova L. V., Akhmetchina O. Yu., Garbul E. A., Dikaeva D. R., Zimina O. L., Noskovich A. E., Frolov A. A., Frolova E. A. The new data on the benthos condition of the Kola Bay (Barents Sea). *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2019, vol. 10, no. 3–6, pp. 35–75. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.3.35-75>
 30. Пономарев В. И., Каплуненко Д. Д., Крохин В. В. Тенденции изменений климата во второй половине XX века в Северо-Восточной Азии, на Аляске и северо-западе Тихого океана // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 2. С. 15–26. [Ponomarev V. I., Kaplunenko D. D., Krokhin V. V. Tendentsii izmenenii klimata vo vtoroi polovine XX veka v Severo-Vostochnoi Azii, na Alyaske i severo-zapade Tikhogo okeana. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2005, no. 2, pp. 15–26. (in Russ.)]
 31. Савикин А. И. Новые данные о распространении *Mya arenaria* Linnaeus, 1758 в Таганрогском заливе Азовского моря // *Наука Юга России*. 2020. Т. 16, № 4. С. 84–87. [Savikin A. I. New data on the distribution of *Mya arenaria* Linnaeus, 1758 in the Taganrog Bay of the Sea of Azov. *Nauka Yuga Rossii*, 2020, vol. 16, no. 4, pp. 84–87. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S25000640200409>
 32. Савчук М. Я. Распространение и некоторые особенности биологии двустворчатого моллюска *Mya arenaria* L. в прибрежном мелководье северо-западной части Чёрного моря и в лиманах // *Океанология*. 1970. Т. 10, вып. 3. С. 521–528. [Savchuk M. Ya. Distribution and some peculiarities of the bivalved mollusc *Mya arenaria* L. in the coastal shallow water of the northwestern Black Sea and in limans. *Okeanologiya*, 1970, vol. 10, iss. 3, pp. 521–528. (in Russ.)]
 33. Свешников В. А. Биоценотипические связи и условия существования некоторых кормовых беспозвоночных инфауны литорали Кандалакшского залива Белого моря // *Труды Кандалакшского государственного заповедника*. 1963. Вып. 4. С. 114–134. [Sveshnikov V. A. Biotsenotipicheskie svyazi i usloviya sushchestvovaniya nekotorykh kormovoykh bespozvonochnykh infauny litoral'noy Kandalakshskogo zaliva Belogo morya. *Trudy Kandalakshskogo gosudarstvennogo zapovednika*, 1963, iss. 4, pp. 114–134. (in Russ.)]
 34. Смолькова О. В., Мещеряков Н. И. Двустворчатый моллюск *Mya arenaria* Linnaeus, 1758 (Myidae) на мелководных участках губ Зеленецкая и Ярнышная Баренцева моря: особенности аллометрического роста // *Зоологический журнал*. 2023. Т. 102, № 2. С. 141–152. [Smolkova O. V., Meshcheryakov N. I. The soft-shell clam, *Mya arenaria* Linnaeus, 1758 (Myidae), in the shallow waters of Zelenetskaya and Yarnyshnaya inlets of the Barents Sea: Allometric growth. *Zoologicheskii zhurnal*, 2023, vol. 102, no. 2, pp. 141–152. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S0044513423010099>
 35. Смолькова О. В. *Биология двустворчатого моллюска *Mya arenaria* в экосистемах литорали Белого моря* : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.04. Петрозаводск, 2012. 20 с. [Smolkova O. V. *Biologiya dvustvorchatogo mollyuska Mya arenaria v ekosistemakh litoral'noy Belogo morya* : avtoref. dis. ... kand. biol. nauk : 03.02.04. Petrozavodsk, 2012, 20 p. (in Russ.)]
 36. Стишов М. С., Липка О. Н., Постнова А. И., Кокорин А. О., Суткайтис О. К., Никифоров В. В., Элиас В. В., Шварц Е. А., Жбанова П. И., Краснопольский В. Г., Згуровский К. А., Уваров С. А. Воздействие

- изменений климата и антропогенной нагрузки на экосистемы острова Вайгач // *Вестник Пермского университета. Серия: Биология*. 2013. № 2. С. 53–58. [Stishov M. S., Lipka O. N., Postnova A. I., Kokorin A. O., Sutkaitis O. K., Nikiforov V. V., Elias V. V., Shvarts E. A., Zhanova P. I., Krasnopol'sky V. G., Zgurovsky K. A., Uvarov S. A. Impacts of climate changes and anthropogenic pressures on Vaigach Island ecosystems. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Biologiya*, 2013, no. 2, pp. 53–58. (in Russ.)]
37. Федяков В. В. *Закономерности распределения моллюсков Белого моря*. Ленинград : Зоологический институт АН СССР, 1986. 125 с. [Fedyakov V. V. *White Sea's Molluscs. Objective Laws of Distribution*. Leningrad : Zoologicheskii institut AN SSSR, 1986, 125 p. (in Russ.)]
 38. Фролов А. А. Двустворчатые моллюски верхней сублиторали среднего и южного колена залива // *Кольский залив: освоение и рациональное природопользование* / отв. ред. Г. Г. Матишов. Москва : Наука, 2009. С. 182–202. [Frolov A. A. Dvustvorchatye molluski verkhnei sublitorali srednego i yuzhnogo kolena zaliva. In: *Kol'skii zaliv: osvoenie i ratsional'noe prirodopol'zovanie* / G. G. Matishov (Ed.). Moscow : Nauka, 2009, pp. 182–202. (in Russ.)]
 39. Хлебович В. В., Станкявичюс А. Б. Пределы ступенчатой адаптации *Macoma balthica*, *Mytilus edulis* и *Mya arenaria* из восточной части Балтийского моря // *Моллюски. Основные результаты их изучения* : авторефераты докладов. Ленинград : Наука, Ленингр. отд-ние, 1979. С. 42–43. (АН СССР, Зоологический институт ; Шестое совещание по изучению моллюсков. Научный совет по проблеме «Биологические основы освоения, реконструкции и охраны животного мира» ; сб. 6). [Khlebovich V. V., Stankyavichyus A. B. Predely stupenchatoi adaptatsii *Macoma balthica*, *Mytilus edulis* i *Mya arenaria* iz vostochnoi chasti Baltiiskogo morya. In: *Mollyuski. Osnovnye rezul'taty ikh izucheniya* : avtoreferaty докладov. Leningrad : Nauka, Leningr. otd-nie, 1979, pp. 42–43. (AN SSSR, Zoologicheskii institut ; Shestoe soveshchanie po izucheniyu molluskov. Nauchnyi sovet po probleme "Biologicheskie osnovy osvoeniya, rekonstruktsii i okhrany zhivotnogo mira" ; sb. 6). (in Russ.)]
 40. Якименко Л. В., Иваненко Н. В. Арктическое природопользование: новая парадигма // *Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса*. 2021. Т. 13, № 2. С. 109–119. [Yakimenko L. V., Ivanenko N. V. Arctic nature management. A new paradigm. *Territoriya novykh vozmozhnostei. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 109–119. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.24866/VVSU/2073-3984/2021-2/109-119>
 41. Beal B. F. Adding value to live, commercial size soft-shell clams (*Mya arenaria* L.) in Maine, USA: Results from repeated, small-scale, field impoundment trials. *Aquaculture*, 2002, vol. 210, iss. 1–4, pp. 119–135. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00016-9)
 42. Brousseau D. J. Analysis of growth rate in *Mya arenaria* using the von Bertalanffy equation. *Marine Biology*, 1979, vol. 51, iss. 3, pp. 221–227. <https://doi.org/10.1007/BF00386801>
 43. Cardoso J. F. M. F., Witte J. I., van der Veer H. W. Differential reproductive strategies of two bivalves in the Dutch Wadden Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, vol. 84, iss. 1, pp. 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.05.026>
 44. Carlton G. T. Introduced marine and estuarine mollusks of North America: An end-of-the-20th-century perspective. *Journal of Shellfish Research*, 1992, vol. 11, no. 2, pp. 489–505.
 45. Connell L. B., MacQuarrie S. P., Twarog B. M., Iszard M., Bricelj V. M. Population differences in nerve resistance to paralytic shellfish toxins in softshell clam, *Mya arenaria*, associated with sodium channel mutations. *Marine Biology*, 2007, vol. 150, iss. 6, pp. 1227–1236. <https://doi.org/10.1007/s00227-006-0432-z>
 46. Emerson C. W., Grant J. The control of soft-shell clam (*Mya arenaria*) recruitment on intertidal sandflats by bedload sediment transport. *Limnology and Oceanography*, 1991, vol. 36, iss. 7, pp. 1288–1300. <https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.7.1288>
 47. Forster S., Zettler M. L. The capacity of the filter-feeding bivalve *Mya arenaria* L. to affect water transport in sandy beds. *Marine Biology*, 2004, vol. 144, iss. 6, pp. 1183–1189. <https://doi.org/10.1007/s00227-003-1278-2>

48. Gerasimova A. V., Martynov F. M., Filipova N. A., Maximovich N. V. Growth of *Mya arenaria* L. at the northern edge of the range: Heterogeneity of soft-shell clam growth characteristics in the White Sea. *Helgoland Marine Research*, 2016, vol. 70, art. no. 6 (14 p.). <https://doi.org/10.1186/s10152-016-0457-8>
49. *Global Invasive Species Database (GISD)*. Species profile: *Mya arenaria*. URL: <https://www.iucngisd.org/gisd/species.php?sc=1159> [accessed: 19.03.2023].
50. Haskin H. H. Age determination in molluscs. *Transactions of the New York Academy of Sciences*, 1954, vol. 6, iss. 6, ser. II, pp. 300–304. <https://doi.org/10.1111/j.2164-0947.1954.tb00390.x>
51. Kube J. Spatial and temporal variations in the population structure of the soft-shell clam *Mya arenaria* in the Pomeranian Bay (southern Baltic Sea). *Journal of Sea Research*, 1996, vol. 35, iss. 4, pp. 335–344. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(96\)90760-1](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(96)90760-1)
52. Loo L.-O., Rosenberg R. Production and energy budget in marine suspension feeding populations: *Mytilus edulis*, *Cerastoderma edule*, *Mya arenaria* and *Amphiura filiformis*. *Journal of Sea Research*, 1996, vol. 35, iss. 1–3, pp. 199–207. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(96\)90747-9](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(96)90747-9)
53. Marshall S., Elliott M. A comparison of univariate and multivariate numerical and graphical techniques for determining inter- and intraspecific feeding relationships in estuarine fish. *Journal of Fish Biology*, 1997, vol. 51, iss. 3, pp. 526–545. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1997.tb01510.x>
54. Munch-Petersen S. An investigation of a population of the soft clam (*Mya arenaria* L.) in a Danish estuary. *Meddelelser fra Kommissionen for Danmarks Fiskeri -og Havundersøgelser, New Serie*, 1973, bind 7, pp. 47–73.
55. Newcombe C. L. Growth of *Mya arenaria* L. in the Bay of Fundy region. *Canadian Journal of Research*, 1935, vol. 13d, no. 6, pp. 97–137. <https://doi.org/10.1139/cjr35d-009>
56. Newcombe C. L. Validity of concentric rings of *Mya arenaria*, L. for determining age. *Nature*, 1936, vol. 137, pp. 191–192. <https://doi.org/10.1038/137191a0>
57. Piersma T., van Aelst R., Kurk K., Berkhoudt H., Maas L. R. M. A new pressure sensory mechanism for prey detection in birds: The use of principles of seabed dynamics? *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1998, vol. 265, iss. 1404, pp. 1377–1383. <https://doi.org/10.1098/rspb.1998.0445>
58. Pfitzenmeyer H. T., Drobeck K. G. Benthic survey for populations of soft-shelled clams, *Mya arenaria*, in the lower Potomac River, Maryland. *Chesapeake Science*, 1963, vol. 4, iss. 2, pp. 67–74. <https://doi.org/10.2307/1350824>
59. Pfitzenmeyer H. T., Drobeck K. G. Some factors influencing reburrowing activity of soft-shell clam, *Mya arenaria*. *Chesapeake Science*, 1967, vol. 8, iss. 3, pp. 195–199. <https://doi.org/10.2307/1351384>
60. Roegner C., André C., Lindegarth M., Eckman J. E., Grant J. Transport of recently settled soft-shell clams (*Mya arenaria* L.) in laboratory flume flow. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1995, vol. 187, iss. 1, pp. 13–26. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(94\)00166-B](https://doi.org/10.1016/0022-0981(94)00166-B)
61. Smolkova O. V. Linear growth and yield of bivalve mollusks *Mya arenaria* Linnaeus, 1758 in the conditions of the littoral of the Barents and White seas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 937, art. no. 022078 (10 p.). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/2/022078>
62. Strasser M. *Mya arenaria* – an ancient invader of the North Sea coast. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1999, vol. 52, no. 3–4, pp. 309–324. <https://doi.org/10.1007/BF02908905>
63. Sutherland T. F., Shepherd P. C. F., Elner R. W. Predation on meiofaunal and macrofaunal invertebrates by western sandpipers (*Calidris mauri*): Evidence for dual foraging modes. *Marine Biology*, 2000, vol. 137, iss. 5–6, pp. 983–993. <https://doi.org/10.1007/s002270000406>
64. Thumdrup H. M. Beiträge zur Ökologie der Wattfauna auf experimenteller Grundlage. *Meddelelser fra Kommissionen for Danmarks Fiskeri -og Havundersøgelser. Serie: Fiskeri*, 1935, bind X, nr. 2, pp. 62–65.
65. Zhang J. L., Yurchenko O. V., Lutaenko K. A., Kalachev A. V., Nekhaev I. O., Aguilar R., Zhan Z. F., Ogburn M. B. A tale of two soft-shell clams: An integrative taxonomic analysis confirms *Mya japonica* as a valid species distinct from *Mya arenaria* (Bivalvia:

- Myidae). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 2018, vol. 184, iss. 3, pp. 605–622. <https://doi.org/10.1093/zoolinlean/zlx107>
66. Wheaton F. W., Schaffer G. U., Ingling A. L., Douglass L. W. Physical properties of soft shell clams, *Mya arenaria*. *Aquacultural Engineering*, 2008, vol. 38, iss. 3, pp. 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.03.002>
67. Winther U., Gray J. S. The biology of *Mya arenaria* (Bivalvia) in the eutrophic inner Oslofjord. *Sarsia*, 1985, vol. 70, iss. 1, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1080/00364827.1985.10420613>

CURRENT STATE OF THE POPULATION AND FEATURES OF THE DISTRIBUTION OF THE SOFT-SHELL CLAMS *MYA ARENARIA* LINNAEUS, 1758 IN THE KOLA BAY OF THE BARENTS SEA

O. Smolkova

Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation
E-mail: sm.olj@mail.ru

The soft-shell clam *Mya arenaria* Linnaeus, 1758 is a boreal bivalve. The range of this species covers coastal waters of the Atlantic Ocean, the northeastern Pacific Ocean, and seas of the Arctic Ocean (the Barents and White seas). *M. arenaria* settlements can occupy vast areas along the coasts, where the molluscs form large aggregations and prevail in biomass among representatives of littoral macrozoobenthos. This species can withstand fluctuations in environmental factors and affect detritus formation and sedimentation. The mollusc juveniles inhabiting upper layers of the sediment are an important food object for seabirds and commercial fish species. High tolerance allows considering *M. arenaria* as an indicator of the effect of climate change on the Arctic ecosystem. Obtaining new data on peculiarities of the species biology is necessary to identify general patterns of development of benthic organisms under varying conditions of the marine environment, to understand adaptive characteristics of certain long-lived high-tolerant molluscs, and to assess the effect of environmental factors on them. The investigation of *M. arenaria* biology may be of practical significance as well: this species may become one of promising objects of mariculture in the Arctic region. The paper provides the results of a study of the current state of the soft-shell clam population and features of its distribution in the Kola Bay of the Barents Sea. Material was sampled during MMBI RAS coastal expedition in 2021. Quantitative characteristics and size and age structure of the mollusc settlements were analyzed. *M. arenaria* aggregations were recorded in the intertidal zone of the western and eastern shores of the middle and southern bay areas. The mollusc settlements in the intertidal zone off the Elovyi Cape (the Tuloma River mouth) were found for the first time during the entire period of research in the Kola Bay (1921–2021). The highest abundance was registered in the Khlebnaya Bay (67.1 ind.·m⁻²), and the lowest one was noted in the Belokamennaya Bay (5.0 ind.·m⁻²). There were no abundant aggregations in the intertidal zone off the cape Abram-mys and in the Vayenga Bay. Settlements in the Kola Bay are represented by the soft-shell clams aged 4 to 14 years, with the size varying 17.5 to 91.2 mm. Apparently, *M. arenaria* distribution and quantitative and morphometric characters of its settlements are related to hydrological features of the bay (the intensity of movement of water masses in small bights and cyclonic movement of water masses in the southern bay area). An increase in the mollusc abundance and an expansion of its range may be interpreted as a response to climate change in the Arctic region and an indicator of reduction of anthropogenic load on coastal communities throughout the Kola Bay.

Keywords: *Mya arenaria*, distribution, state of the population, density, biomass, size and age structure, intertidal zone, Kola Bay

УДК 581.526.325(262.54.04)“2009/2019”

ВИДОВОЙ СОСТАВ, ЧИСЛЕННОСТЬ И БИОМАССА ФИТОПЛАНКТОНА В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ В 2009–2019 ГГ.

© 2024 г. О. Н. Ясакова

Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
E-mail: yasak71@mail.ru

Поступила в редакцию 21.06.2022; после доработки 28.06.2023;
принята к публикации 27.08.2024; опубликована онлайн 09.09.2024.

В работе представлены результаты исследований планктонных водорослей Керченского пролива в весенне-осенний период 2009–2019 гг. В составе фитопланктона обнаружено 114 видов и несколько таксонов, определённых до рода, из 11 классов водорослей, в том числе 64 вида динофитовых и 32 вида диатомовых. Средние значения численности и биомассы — 140 тыс. кл.·л⁻¹ и 0,386 г·м⁻³ соответственно. Цианопрокарियोты доминировали по численности (44 % общего числа клеток). Диатомовые и динофитовые составили основу (62 и 35 %) биомассы и значительную часть численности фитопланктона (19 и 18 %). Представители криптофитовых, кокколитофорид и зелёных водорослей в сумме формировали 18 % общего обилия фитопланктона. Весной доминировали мелкие диатомовые *Skeletonema costatum* и *Cyclotella caspia*. В летний период преобладали мелкие и крупные виды диатомовых и динофитовых, а также кокколитофорида *Emiliania huxleyi*. Осенью наиболее многочисленными были цианопрокарियोты (*Planktolyngbya limnetica*), криптофитовые (из рода *Plagioselmis*) и зелёные водоросли (из родов *Binuclearia* и *Nannochloris*). Диатомовые (*Pseudosolenia calcar-avis*) и динофитовые из родов *Prorocentrum*, *Protoperdinium* и *Ceratium* формировали основу биомассы фитопланктона.

Ключевые слова: фитопланктон, таксономический состав, численность, биомасса, Керченский пролив

Керченский пролив соединяет Азовское и Чёрное моря. Его обитатели подвержены влиянию как природных, так и антропогенных факторов: интенсивного судоходства, строительства гидротехнических сооружений, работы портовых и рейдовых перегрузочных комплексов, эксплуатации береговых нефтехранилищ в Тамани и порту Кавказ, а также перевалки нефти и сыпучих грузов. Всё более серьёзной становится проблема поступления биогенных элементов с хозяйственно-бытовыми сточными водами [Жугайло и др., 2011]. На фоне климатических изменений, роста интенсивности морских грузоперевозок, развития туризма и индустриализации водного отдыха необходимо проводить постоянный мониторинг среды в Азово-Черноморском бассейне [Матишов, Иванов, 2012; Матишов и др., 2013]. В связи с этим исследование современного состояния планктонного фитоценоза Керченского пролива — одного из наиболее чувствительных компонентов морских экосистем — представляет существенный интерес. Несмотря на большое внимание к изучению планктонных сообществ Керченского пролива, данных о сезонной динамике состава, численности и биомассы фитопланктона этого района недостаточно. Задача наших исследований — проанализировать пространственно-временную изменчивость видового богатства и обилия фитопланктона под влиянием факторов среды в период с 2009 по 2019 г.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В настоящей работе представлены результаты, полученные в экспедициях в акватории Керченского пролива (рис. 1) на НИС «Денеб» ЮНЦ РАН в апреле 2009 г., июле 2010 г., июне и сентябре 2011 г., июле 2012 г., мае и июле 2013 г., а также на НИС «Пеленг» Севастопольского отделения ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова» в августе 2016 и 2019 гг. по проектам EMBLAS-II (Improving Environmental Monitoring in the Black Sea – Phase II, ENPI/2013/313-169) и EMBLAS-Plus (Selected Measures, ENI/2017/389-859).

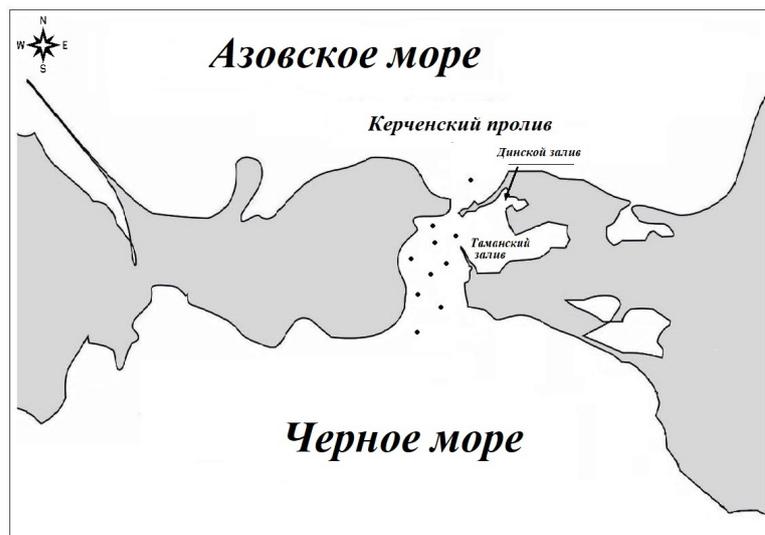


Рис. 1. Район отбора проб фитопланктона в акватории Керченского пролива в 2009–2019 гг.

Fig. 1. A scheme of phytoplankton sampling sites in the Kerch Strait waters in 2009–2019

Отобрана и обработана 51 проба. В сентябре 2011 г., мае и июле 2013 г. и августе 2016 г. пробы отбирали в верхнем слое моря, 0–1 м. Изучение вертикальной структуры фитопланктона в апреле 2009 г., июне 2011 г. и июле 2010 г. проводили на двух горизонтах (поверхность и дно), в июле 2012 г. и августе 2019 г. — на горизонтах 0–1 м, 5 м, 10 м и дно. Пробы воды отбирали в дневное время суток с борта судна с помощью батометров, сгущали методом осаждения, фиксировали 5%-ным кислым раствором Люголя, нейтральным формалином или кислым раствором Уотермеля до конечной концентрации 1–2 % [Макаревич, Дружков, 1989]. Количественный учёт фитопланктона производили с помощью микроскопа «Микмед-2» с увеличением $\times 100$, $\times 200$ и $\times 400$ в счётной камере Нажотта объёмом 0,05 мл. Минимальный размер учитываемых клеток — 3–5 мкм. Для трихомных цианопрокариот за одну условную единицу счёта принимали колонию длиной 50–100 мкм. При идентификации видов использовали руководства [Голлербах и др., 1953; Дедусенко-Щеголева и др., 1959; Киселев, 1950; Косинская, 1948; Прошкина-Лавренко, 1955, 1963; Dodge, 1982; Identifying Marine Phytoplankton, 1997]. Биомассу фитопланктона определяли исходя из размеров и форм клеток согласно их подобию наиболее сходным стереометрическим фигурам, считая удельный вес водорослей равным единице [Брянцева и др., 2005]. В настоящей работе следовали классификации водорослей, принятой в AlgaeBase [2023]. Для оценки сходства таксономического состава сообществ микроводорослей Керченского пролива в разные периоды исследований использовали коэффициент Сёренсена — Чекановского [Clarke et al., 2014].

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Таксономический состав фитопланктона. В Керченском проливе обнаружено 114 видов и несколько не определённых до вида водорослей (табл. 1), относящихся к 11 классам. Высоким видовым разнообразием отличались классы Dinophyceae (64 вида) и Bacillariophyceae (32 вида).

В июне 2011 г. и августе 2019 г. видовой состав фитопланктона (табл. 1) характеризовался наибольшим богатством (58 и 53 вида соответственно). В июле 2013 г. наблюдали наименьшее разнообразие (16 видов). В другое время общее число видов водорослей варьировало от 34 до 45. Максимальное разнообразие динофлагеллят отмечено в июне 2011 г. и августе 2019 г. (37 и 41 вид соответственно); в другие периоды исследований количество видов составляло от 6 до 27. Диатомовые были наиболее широко представлены в апреле 2009 г. (19 видов); число видов в остальные периоды — от 7 до 14. Количество видов из других классов изменялось в зависимости от сезона и года в диапазоне от 3 (июль 2012 г. и июль 2013 г.) до 10 (апрель 2009 г. и июль 2010 г.).

Таблица 1. Видовой состав фитопланктона в Керченском проливе в 2009–2019 гг.

Table 1. Species composition of phytoplankton in the Kerch Strait in 2009–2019

Класс и вид водоросли	Год, месяц	2009	2010	2011		2012	2013		2016	2019
		IV	VII	VI	IX	VII	V	VII	VIII	VIII
BACILLARIOPHYCEAE										
<i>Chaetoceros affinis</i> Lauder		–	+	++	–	+	–	++	–	+
<i>Chaetoceros curvisetus</i> Cleve		++	–	+	–	–	–	–	–	–
<i>Chaetoceros peruvianus</i> Brightwell		–	–	–	–	–	–	–	+	–
<i>Chaetoceros scabrosus</i> Proshkina-Lavrenko		–	–	–	–	–	–	–	+	–
<i>Chaetoceros simplex</i> Ostefeld		+	–	–	–	–	–	–	+	–
<i>Chaetoceros subtilis</i> Cleve		+	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Chaetoceros</i> spp.		+	+	–	–	–	–	–	–	–
<i>Cerataulina pelagica</i> (Cleve) Hendey		+	++	+	–	–	–	–	+	–
<i>Climaconeis inflexa</i> (Brébisson ex Kützing) E. J. Cox [= <i>Amphora inflexa</i> (Brébisson ex Kützing) Cleve]		+	–	+	–	–	–	–	–	+
<i>Cocconeis scutellum</i> Ehrenberg		+	–	–	–	–	–	–	+	–
<i>Coscinodiscus granii</i> L. F. Gough		++	+	+	++	–	++	–	+	–
<i>Coscinodiscus janischii</i> A. W. F. Schmidt		–	–	+	+	–	++	++	–	–
<i>Coscinodiscus subtilis</i> Ehrenberg		–	–	–	+	–	–	–	–	–
<i>Coscinodiscus</i> sp.		++	+	+	+	–	+	–	+	–
<i>Cyclotella caspia</i> Grunow		+++	+++	–	++	–	–	–	–	–
<i>Cyclotella</i> sp.		–	–	–	+	–	+	–	+	–
<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenberg) Reimann & J. C. Lewin		–	–	–	–	–	–	–	+	–
<i>Dactyliosolen fragilissimus</i> (Bergon) Hasle		+	–	+	–	–	–	–	–	++
<i>Ditylum brightwellii</i> (T. West) Grunow		–	+++	–	++	–	–	–	–	–
<i>Gyrosigma</i> sp.		++	–	–	+	–	–	–	+	–
<i>Halamphora hyaline</i> (Kützing) Rimet & R. Jahn (= <i>Amphora hyaline</i> Kützing)		+	–	–	–	–	–	–	–	+
<i>Hemiaulus hauckii</i> Grunow ex Van Heurck		–	–	–	+	–	–	–	–	–
<i>Leptocylindrus danicus</i> Cleve		–	–	–	–	–	–	–	++	–
<i>Licmophora ehrenbergii</i> (Kützing) Grunow		+	–	–	–	–	–	++	–	–
<i>Licmophora flabellata</i> (Greville) C. Agardh		+	–	–	–	–	+	–	–	–

Продолжение на следующей странице...

Класс и вид водоросли	Год, месяц	2009	2010	2011		2012	2013		2016	2019
		IV	VII	VI	IX	VII	V	VII	VIII	VIII
<i>Melosira moniliformis</i> (Link) C. Agardh		–	–	–	–	–	+	–	–	–
<i>Nitzschia tenuirostris</i> Manguin		++	+++	+	+	+	–	–	++	–
<i>Pleurosigma elongatum</i> W. Smith		+	+	+	–	+	–	+	+	–
<i>Pleurosigma</i> sp.		+	+	–	–	–	–	–	–	+
<i>Proboscia alata</i> (Brightwell) Sundström		–	–	–	–	+	–	–	–	++
<i>Pseudosolenia calcar-avis</i> (Schultze) B. G. Sundström		–	+++	++	++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Pseudo-nitzschia pseudodelicatissima</i> (Hasle) Hasle (complex)		+	++	+	++	++	–	+	+	+++
<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.		+	–	+	–	–	–	–	+	–
<i>Skeletonema costatum</i> (Greville) Cleve		+++	++	++	–	–	–	–	+	–
<i>Striatella delicatula</i> (Kützing) Grunow ex Van Heurck		+	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Striatella unipunctata</i> (Lyngbye) C. Agardh		+	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Surirella gemma</i> (Ehrenberg) Kützing		–	–	–	–	–	+	–	–	–
<i>Thalassionema nitzschioides</i> (Grunow) Mereschkowsky		+	+++	+++	++	++	+	+	+	++
<i>Thalassiosira</i> sp.		+	+	–	++	–	–	–	+	–
DINOPHYCEAE										
<i>Akashiwo sanguinea</i> (K. Hirasaka) G. Hansenet Moestrup (= <i>Gymnodinium sanguineum</i> K. Hirasaka)		++	–	+	+	+	–	–	+	+
<i>Alexandrium tamarense</i> (Lebour) Balech		–	–	–	–	–	–	–	–	+
<i>Amphidinium</i> sp.		–	–	–	–	–	–	–	+	–
<i>Amphidinium crassum</i> Lohmann		–	+	–	–	–	–	–	–	–
<i>Amphidinium longum</i> Lohmann		–	–	+	–	–	++	–	–	–
<i>Amphidinium flagellans</i> J. Schiller		–	–	–	–	–	–	–	–	+
<i>Amphidinium fusiforme</i> G. W. Martin		–	+	–	–	–	–	–	–	–
<i>Blixaea quinquecornis</i> (T. H. Abé) Gottschling (= <i>Peridinium quinquecorne</i> Abé)		–	–	–	–	–	–	–	+	–
<i>Dinophysis acuminata</i> Claparède & Lachmann		+	–	+	–	–	+	–	–	–
<i>Dinophysis acuta</i> Ehrenberg		–	–	+	+	–	–	–	–	+
<i>Dinophysis caudata</i> Kent		–	+	++	–	+	–	–	+	+
<i>Dinophysis fortii</i> Pavillard		–	+	+	–	–	–	–	–	–
<i>Dinophysis sacculus</i> F. Stein		+	–	+	–	+	+	–	–	–
<i>Dinophysis</i> sp.		–	–	+	–	–	–	–	–	–
<i>Diplopsalis lenticula</i> Bergh		+	+	–	+	++	+	–	+	+
<i>Diplopsalis</i> sp.		–	–	–	+	–	–	–	–	–
<i>Glenodinium pilula</i> (Ostenfeld) J. Schiller		–	–	+	+	–	+	–	–	+
<i>Glenodinium</i> sp.		+	+	+	–	–	+	–	–	–
<i>Gymnodinium agiliforme</i> J. Schiller		–	–	–	–	–	+	–	–	+
<i>Gymnodinium blax</i> T. M. Harris		–	–	+	–	++	–	++	–	++
<i>Gymnodinium elongatum</i> B. Hope		–	–	–	–	–	++	–	–	–
<i>Gymnodinium simplex</i> (Lohmann) Kofoid & Swezy		+	–	+++	–	++	–	–	+	++
<i>Gymnodinium wulfii</i> J. Schiller		+	+	++	–	+	+	+	+	+
<i>Gymnodinium</i> spp.		++	+++	+++	+	++	+++	++	++	+

Продолжение на следующей странице...

Класс и вид водоросли	Год, месяц	2009	2010	2011		2012	2013		2016	2019
		IV	VII	VI	IX	VII	V	VII	VIII	VIII
<i>Gyrodinium lacryma</i> (Meunier) Kofoid & Swezy		-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Gyrodinium fusiforme</i> Kofoid & Swezy		+	++	+++	++	++	++	-	+	+
<i>Gyrodinium spirale</i> (Bergh) Kofoid & Swezy		-	-	+	+	+	-	-	-	++
<i>Gyrodinium</i> sp.		+	+	+	++	++	++	++	+	++
<i>Gonyaulax digitale</i> (Pouchet) Kofoid		-	+	-	+	+	-	-	-	-
<i>Gonyaulax spinifera</i> (Claparède & Lachmann) Diesing		-	+	-	+	+	-	-	-	-
<i>Gonyaulax polygramma</i> F. Stein		-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Gonyaulax</i> sp.		-	-	-	-	-	-	-	+	+
<i>Katodinium glaucum</i> (Lebour) A. R. Loeblich III		-	+	++	+	+	-	-	+	++
<i>Lingulodinium polyedra</i> (F. Stein) J. D. Dodge		-	-	+	-	-	-	-	-	-
<i>Margalefidinium citron</i> (Kofoid & Swezy) F. Gómez, Richlen & D. M. Anderson (= <i>Cochlodinium citron</i> Kofoid & Swezy)		-	-	+	-	-	-	-	-	+
<i>Mesoporos perforatus</i> (Gran) Lillick		-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Heterocapsa rotundata</i> (Lohmann) G. Hansen [= <i>Katodinium rotundatum</i> (Lohmann) Loeblich III]		-	-	+	-	-	-	-	-	-
<i>Heterocapsa triquetra</i> (Ehrenberg) F. Stein		-	-	+	+	+	-	-	-	-
<i>Heterocapsa</i> sp.		-	-	-	-	-	-	-	+	+
<i>Ensiculifera carinata</i> Matsuoka, Kobayashi & Gains		-	-	+	++	+	-	-	+	-
<i>Oblea baculifera</i> Balech		+	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Oblea rotunda</i> (Lebour) Balech		+	+	-	+	+	-	-	+	++
<i>Oxyrrhis marina</i> Dujardin		-	+++	+	+	-	-	++	-	-
<i>Oxytoxum caudatum</i> J. Schiller		-	+	-	-	-	-	-	-	-
<i>Phalacroma rotundatum</i> (Claparède & Lachmann) Kofoid & J. R. Michener [= <i>Dinophysis rotundata</i> (Claparède & Lachmann) Balech]		-	-	+	+	+	+	-	+	+
<i>Polykrikos kofoidii</i> Chatton		-	+	+	+++	+++	+	-	++	+
<i>Polykrikos schwartzii</i> Bütschli		-	+	+	-	-	-	-	-	-
<i>Pronocitluca pelagica</i> Fabre-Domergue		-	-	+	-	-	-	-	-	++
<i>Prorocentrum compressum</i> (Bailey) T. H. Abé ex J. D. Dodge		+	+	++	+	+	+	-	+	+
<i>Prorocentrum cordatum</i> (Ostenfeld) J. D. Dodge [= <i>P. minimum</i> (Pavillard) J. Schiller]		+	++	++	+	++	++	+	+	++
<i>Prorocentrum micans</i> Ehrenberg		+	++	++	+++	++	+++	++	+++	++
<i>Prorocentrum</i> sp.		-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Protoceratium reticulatum</i> (Claparède & Lachmann) Bütschli		-	+	-	-	++	-	-	-	++
<i>Protoperidinium bipes</i> (Paulsen) Balech		+	-	+	-	-	-	-	-	+
<i>Protoperidinium brevipes</i> (Paulsen) Balech		-	-	+	-	-	-	-	+	+
<i>Protoperidinium conicum</i> (Gran) Balech		-	-	-	-	-	+	-	-	+
<i>Protoperidinium crassipes</i> (Kofoid) Balech		-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Protoperidinium depressum</i> (Bailey) Balech		-	-	-	-	-	+	-	+	++

Продолжение на следующей странице...

Класс и вид водоросли	Год, месяц	2009	2010	2011		2012	2013		2016	2019
		IV	VII	VI	IX	VII	V	VII	VIII	VIII
<i>Protoperidinium divergens</i> (Ehrenberg) Balech		–	+	–	++	++	++	–	–	++
<i>Protoperidinium excentricum</i> (Paulsen) Balech		–	–	–	–	–	–	–	+	–
<i>Protoperidinium globulus</i> (F. Stein) Balech		–	+	–	–	–	–	–	–	–
<i>Protoperidinium granii</i> (Ostenfeld) Balech		+	–	+	–	–	–	–	–	+
<i>Protoperidinium knipowitschii</i> (Usachev) Balech		–	–	–	+	–	–	–	–	–
<i>Protoperidinium pallidum</i> (Ostenfeld) Balech		–	–	+	–	–	–	–	–	+
<i>Protoperidinium pellucidum</i> Bergh		–	–	+	–	–	–	–	–	–
<i>Protoperidinium steinii</i> (Jørgensen) Balech		+	–	–	+	+	+	–	–	+
<i>Protoperidinium</i> spp.		++	+	–	++	+	–	–	+	–
<i>Scrippsiella acuminata</i> (Ehrenberg) Kretschmann, Elbrächter, Zinssmeister, S. Soehner, Kirsch, Kusber & Gottschling [= <i>Scrippsiella trochoidea</i> (F. Stein) A. R. Loeblich III]		++	+	–	+	+	+	+	–	++
<i>Speroidium fungiforme</i> (Anisimova) Moestrup & Calado [= <i>Katodinium fungiforme</i> (Anisimova) A. R. Loeblich III]		–	–	+	–	–	–	–	–	–
<i>Torodinium robustum</i> Kofoid & Swezy		–	+	+	–	+	–	–	–	++
<i>Tripos furca</i> (Ehrenberg) F. Gómez [= <i>Ceratium furca</i> (Ehrenberg) Claparède & Lachmann]		–	–	+	++	++	++	–	+	++
<i>Tripos fusus</i> (Ehrenberg) F. Gómez [= <i>Ceratium fusus</i> (Ehrenberg) Dujardin]		–	–	+	+	+	+	–	–	++
<i>Tripos muelleri</i> Bory [= <i>Ceratium tripos</i> (O. F. Müller) Nitzsch]		–	–	++	–	–	++	–	–	++
<i>Warnowia</i> aff. <i>maculate</i> (Kofoid & Swezy) Lindemann		–	–	–	–	–	–	–	–	+
COCCOLITHOPHYCEAE										
<i>Emiliana huxleyi</i> (Lohmann) W. W. Hay & H. P. Mohler		+	+	+++	–	+++	+++	–	–	++
CRYPTOPHYCEAE										
<i>Plagioselmis</i> spp.		+	+++	++	++	++	++	+++	++	++
EUGLENOPHYCEAE										
<i>Eutreptia lanowii</i> Steuer		+	+	+	–	+	–	++	+	–
<i>Euglena viridis</i> (O. F. Müller) Ehrenberg		–	–	–	–	–	–	–	–	+
<i>Euglena</i> sp.		–	+	+	++	–	–	–	+	–
ULVOPHYCEAE										
<i>Binuclearia lauterbornii</i> (Schmidle) Proshkina-Lavrenko		+	+++	+	++	–	+	–	+	–
CHLOROPHYCEAE										
<i>Ankistrodesmus convolutus</i> Corda		+	–	+	+	–	–	–	–	–
<i>Golenkinia radiata</i> Chodat		+	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Komárková-Legnerová		+	++	+	–	–	++	–	+	–
<i>Scenedesmus bicaudatus</i> Dedusenko		–	+	–	–	–	–	–	–	–
<i>Scenedesmus falcatus</i> Chodat		+	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Scenedesmus obliquus</i> (Turpin) Kützing		–	+	–	–	–	–	–	–	–
<i>Scenedesmus quadricauda</i> Chodat		+	+	+	+	–	–	–	–	–

Продолжение на следующей странице...

Класс и вид водоросли	Год, месяц	2009	2010	2011		2012	2013		2016	2019
		IV	VII	VI	IX	VII	V	VII	VIII	VIII
<i>Tetraselmis</i> sp.		–	–	–	+	–	–	–	–	–
TREBOUXIOPHYCEAE										
<i>Oocystis</i> sp.		+	–	–	–	–	–	–	–	–
aff. <i>Nannochloris</i> sp.		–	+	+	++	–	–	–	–	–
PYRAMIMONADOPHYCEAE										
<i>Pterosperma undulatum</i> Ostenfeld		–	+	+	–	+	+	–	–	+
<i>Pterosperma</i> sp.		+	+	–	–	–	–	–	+	–
DICTYOCOPHYCEAE										
<i>Octactis octonaria</i> (Ehrenberg) Hovasse		–	–	–	–	–	–	–	–	+
CYANOPHYCEAE										
<i>Anabaena flos-aquae</i> Brébisson ex Bornet & Flauhault f. <i>major</i> Elenkin		–	–	–	–	–	–	++	+	–
<i>Anabaena spiroides</i> Klebahn		–	–	–	–	–	–	–	++	–
<i>Anabaena</i> sp.		–	+	–	+	–	–	++	++	–
<i>Aphanizomenon</i> sp.		–	+	–	+	–	+	–	–	–
<i>Merismopedia punctata</i> Meyen		+	+	–	–	–	–	–	–	–
<i>Microcystis aeruginosa</i> (Kützing) Kützing		–	–	–	++	–	–	–	–	–
<i>Oscillatoria</i> spp.		+	++	+	–	–	–	–	+	–
<i>Planktolingbya limnetica</i> (Lemmermann) Komárková-Legnerová & Cronberg		+	+	+	+++	–	+	++	+++	–
<i>Spirulina</i> sp.		+	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание: + — редкий вид; ++ — обычный; +++ — массовый; – — отсутствует. Массовые виды формировали более 10 % общей численности или биомассы фитопланктона, обычные — от 1 до 10 %; редкие — до 1 %.

Note: +, rare species; ++, common; +++, abundant; and –, absent. Abundant species formed more than 10% of total phytoplankton abundance or biomass; common ones, 1 to 10%; and rare ones, up to 1%.

Наиболее высокие показатели сходства таксономического состава сообществ микроводорослей Керченского пролива [коэффициент Сёренсена — Чекановского (Дайса) ≥ 60 %] отмечены в тёплое время года (табл. 2), при максимальных значениях температуры воды (+21...+28 °C). В это время отмечали высокое видовое разнообразие микроводорослей (табл. 3).

Таблица 2. Показатели сходства [коэффициент Сёренсена — Чекановского (Дайса)] таксономического состава сообществ микроводорослей в Керченском проливе в разные периоды исследования

Table 2. Indicators of similarity [Sørensen–Czekanowski (Dice) coefficient] of taxonomic composition for microalgal communities in the Kerch Strait during different study periods

Год, месяц		2009	2010	2011		2012	2013		2016
		IV	VII	VI	IX	VII	V	VII	VIII
2010	VII	52							
2011	VI	52	55						
2011	IX	45	55	54					
2012	VII	44	62	59	63				
2013	V	43	44	50	52	51			
2013	VII	33	40	35	33	42	32		
2016	VIII	52	53	54	49	55	44	36	
2019	VIII	37	42	62	46	67	51	26	41

Примечание: бледно-розовые ячейки — значения коэффициента в диапазоне 26–37; светло-розовые — 40–49; розовые — 50–59; тёмно-розовые — 62–67.

Note: cells highlighted in pale pink depict the coefficient values within 26–37; light pink, 40–49; pink, 50–59; and dark pink, 62–67.

Таблица 3. Основные гидрологические характеристики и показатели фитопланктона в Керченском проливе в 2009–2019 гг.

Table 3. The basic hydrological and phytoplankton characteristics for the Kerch Strait in 2009–2019

Месяц	Год	Температура воды, °С / глубина, м	Ветер, м·с ⁻¹ / волнение, баллы	Фитопланктон		
				число видов	численность, тыс. кл.·л ⁻¹	биомасса, мг·м ⁻³
Апрель	2009	+9,8...+9,9 / 7–11	нет данных	45	130	57
Май	2013	+19...+19,8 / 10–12	E-ES 5–9 / 1–2	34	58	145
Июнь	2011	+22,6...+24 / 6–11	0 / 0	58	62	82
Июль	2010	+26,8...+27 / 3–15	E-ES 2–3 / 1	44	101	418
	2012	+22...+23 / 4–14	NW 5,3–5,7 / 1–2	37	72	217
	2013	+24...+24,4 / 10	S 2–3 / 0–1	16	19	242
Август	2016	+26,2...+28 / 4–16	ES 2–3 / 0–1	39	719	1922
	2019	+25,8...+26 / 24–28	S 2–2,5 / 0–1	53	22	302
Сентябрь	2011	+21,3...+21,5 / 3–12	SW 6–8 / 1–2	39	77	93
				Всего	В среднем	В среднем
				114	140	386

В фитопланктоне Керченского пролива наиболее распространены общие для Чёрного и Азовского морей виды диатомовых водорослей (*Cerataulina pelagica*, *Chaetoceros affinis*, *Chaetoceros curvisetus*, *Chaetoceros subtilis*, *Coscinodiscus granii*, *Cyclotella caspia*, *Ditylum brightwellii*, *Nitzschia tenuirostris*, *Pseudo-nitzschia pseudodelicatissima*, *Pseudosolenia calcar-avis*, *Skeletonema costatum* и *Thalassionema nitzschioides*), динофлагеллят (*Akashiwo sanguinea*, *Diplopsalis lenticula*, *Gymnodinium simplex*, *Gyrodinium fusiforme*, *Prorocentrum cordatum*, *Prorocentrum micans*, *Protoperidinium granii*, *Protoperidinium divergens*, *Protoperidinium steinii* и *Scrippsiella acuminata*) и кокколитофорид (*Emiliania huxleyi*) [Студеникина и др., 1999]. На фоне обилия видов диатомовых и динофлагеллят существенное развитие получили солоноватоводные виды классов Сруптоphyceae, Euglenophyceae, Chlorophyceae и Cyanophyceae, широко распространённые в планктоне Азовского моря. Малые глубины и высокая гидродинамическая активность в Керченском проливе способствуют обогащению фитопланктона перифитонными видами диатомовых (*Climaconeis inflexa*, *Cocconeis scutellum*, *Halamphora hyalina*, *Licmophora ehrenbergii*, *Licmophora flabellata*, *Melosira moniliformis* и *Pleurosigma elongatum*) и представителями родов *Gyrosigma* и *Striatella*.

Видовое богатство фитопланктона, зарегистрированное нами в Керченском проливе в 2009–2019 гг. (114 видов), выше описанного ранее (42–90 видов) [Брянцева и др., 2010; Заремба, 2013; Черникова, 2004]. Вероятно, это связано с более продолжительным периодом наших исследований и с охватом трёх сезонов (весна, лето и осень). Однако таксономический состав планктонных водорослей существенно уступал числу видов, которые были зарегистрированы в более обширном районе Керченского пролива, включающем Динской и Таманский заливы, в 1997–2000 гг. (154 вида) [Ковалева, 2008].

2. Сезонная динамика численности и биомассы фитопланктона. Значения численности и биомассы фитопланктона в Керченском проливе в период исследований (с апреля 2009 г. по август 2019 г.) варьировали в широком диапазоне — 19–719 тыс. кл.·л⁻¹ и 0,06–1,92 г·м⁻³ соответственно — и в среднем составляли (140 ± 220) тыс. кл.·л⁻¹ и (0,386 ± 0,587) г·м⁻³ (табл. 3, рис. 2). Цианопрокариоты доминировали по численности (44 % в среднем за период исследований). Диатомовые и динофлагелляты формировали существенную часть общей численности (в среднем 19 и 18 % соответственно) и биомассы (в среднем 62 и 35 %). Криптофитовые, кокколитофориды и зелёные водоросли составляли в среднем 18 % численности и 3 % биомассы

планктонного фитоценоза. На долю представителей других классов в сумме приходилось менее 1 % численности и биомассы. Максимум развития планктонных водорослей отмечен в августе 2016 г. — 719 тыс. кл.·л⁻¹ и 1,922 г·м⁻³. За счёт этого средние значения обилия фито-планктона в летний период (166 тыс. кл.·л⁻¹ и 0,531 г·м⁻³) в 2–5 раз превышали показатели, зарегистрированные весной и осенью (94 и 77 тыс. кл.·л⁻¹ и 0,101 и 0,093 г·м⁻³ соответственно).

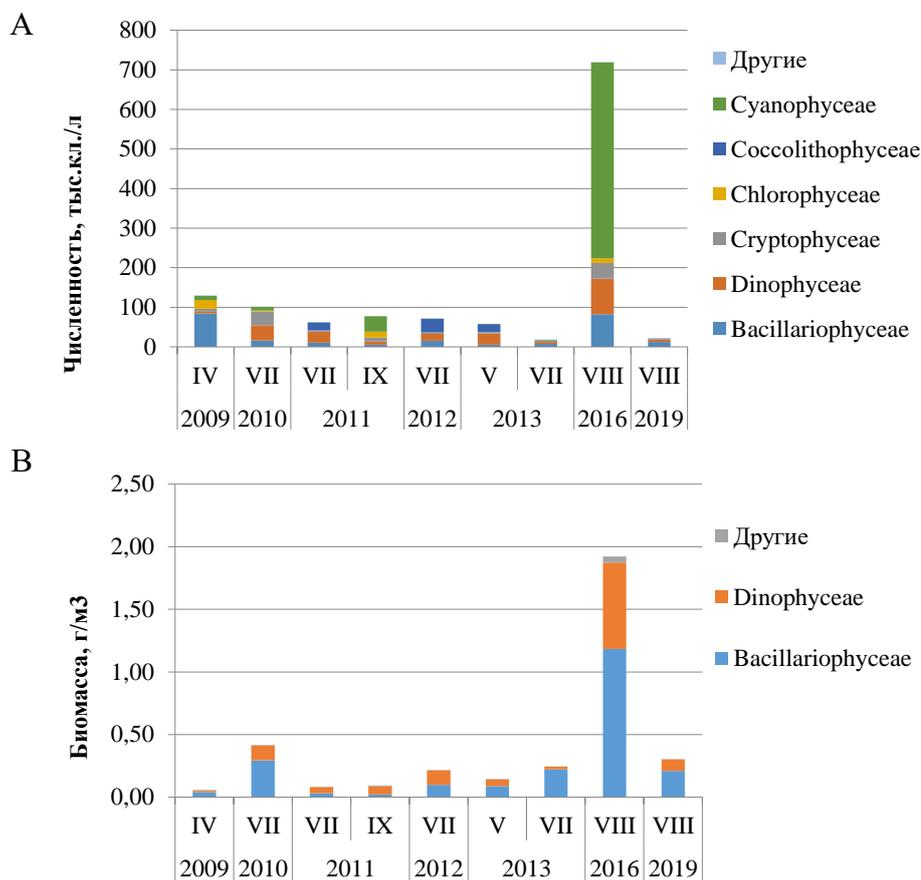


Рис. 2. Численность (А) и биомасса (Б) планктонных водорослей в Керченском проливе в 2009–2019 гг.

Fig. 2. Abundance (A) and biomass (Б) of planktonic algae in the Kerch Strait area in 2009–2019

В весенне-летний период 2009–2019 гг. распределение численности и биомассы фитопланктона по вертикали носило неоднородный характер и зависело от гидродинамической активности вод, способствующей более равномерному распределению планктонных водорослей в столбе воды. Так, в июле 2012 г. в результате интенсивной ветровой активности наблюдали относительно равномерное распределение кокколитофорид (они составляли 43–50 % общей численности) во всём столбе воды (0–14 м). При этом в июне 2011 г. в штилевую погоду кокколитофориды были сосредоточены (42 % численности) в верхнем слое моря (0–1 м) и отсутствовали у дна (6–11 м). Вследствие обильного развития в придонном слое пелагиали крупных видов (до 200 мкм) бенто-планктонных диатомовых водорослей, их биомасса у дна в апреле 2009 г., июне 2011 г. и августе 2019 г. была в 1,4–2 раза выше, чем в верхних слоях пролива (0–5 м).

Весна. В апреле 2009 г. в результате интенсивного развития в основном средне- и крупно-размерных динофлагеллят *A. sanguinea* (40–200 мкм) и перифитонных диатомовых родов *Gyrosigma* и *Striatella* количество фитопланктона в придонных слоях пролива было в 1,3 раза выше, чем на поверхности, а биомассы — в 1,9 раза. Диатомовые в среднем составили

65 % численности и 69 % биомассы пелагического фитопланктона, при этом в поверхностном слое пролива они формировали 61 % численности и 49 % биомассы, а у дна — 68 и 79 % соответственно. Среди них наиболее интенсивно развивались *S. costatum* и *C. caspia*; на уровне субдоминант отмечены *N. tenuirostris* и *C. curvisetus*. Представители родов *Coscinodiscus*, *Thalassiosira* и *Gyrosigma*, а также доминирующие по численности виды *S. costatum*, *C. caspia* и *C. curvisetus* составили основу биомассы диатомовых водорослей. Важную роль в формировании общей биомассы сообществ (в среднем 21 %) играли динофлагелляты — 33 % на поверхности пролива и 14 % у дна. При этом в общей численности их доля не превышала 2 %. Среди них основными были *Oblea baculifera*, *S. acuminata*, *A. sanguinea* и *P. micans*, а также виды родов *Gymnodinium* и *Protoberidinium*. В значительных количествах развивались некоторые виды зелёных водорослей (*Binuclearia lauterbornii* и *Monoraphidium contortum*), цианопрокариот (представители *Oscillatoria* и *Planktolynghya*) и криптофитовых (*Plagioselmis* spp.). Представители этих классов формировали 17, 8 и 6 % численности фитопланктона соответственно и суммарно около 9 % биомассы. Эпизодически в исследуемой акватории встречались мелкие жгутиковые водоросли со средней численностью 2 тыс. кл.·л⁻¹.

В мае 2013 г. диатомовые формировали 9 % численности и 60 % биомассы фитопланктона. Среди них наиболее интенсивно развивался крупноклеточный вид *P. calcar-avis* (89 % численности и 88 % биомассы диатомовых). На уровне субдоминант зарегистрированы *T. nitzschoides* и виды рода *Coscinodiscus*. Основной вид кокколитофорид, *E. huxleyi*, формировал 35 % общей численности и — вследствие мелких размеров клеток — лишь 2 % биомассы. Динофлагелляты составляли основу численности (48 %) и существенную часть (37 %) биомассы фитопланктона. Наиболее многочисленными среди них были виды родов *Gymnodinium* и *Prorocentrum*. Основная компонента биомассы динофитовых включала *P. micans* и крупные виды родов *Protoberidinium* и *Tripes*. На долю представителей других классов водорослей приходилось не более 6 % численности и 1 % биомассы.

Лето. В июне 2011 г. у поверхности вод заметным был вклад кокколитофориды *E. huxleyi*: она формировала 42 % численности фитопланктона. У дна, вероятно вследствие затемнения фотического слоя из-за взмучивания, этот вид не развивался. В верхнем слое численность водорослей (98 тыс. кл.·л⁻¹) была почти в 4 раза выше, а биомасса (0,067 г·м⁻³) — в 1,4 раза ниже, чем у дна (26 тыс. кл.·л⁻¹ и 0,096 г·м⁻³ соответственно). Доминировали динофлагелляты — 44 и 54 % численности и 67 и 56 % биомассы у поверхности и у дна соответственно; ведущими среди них по численности были виды рода *Gymnodinium* и *G. fusiforme*. В меньшем количестве встречены *P. minimum* и *Gyrodinium spirale*. Основой биомассы динофлагеллят были *Tripes furca*, *Tripes muelleri* и виды рода *Gyrodinium*. Диатомовые в среднем формировали 17 % численности фитопланктона (46 % у дна и 8 % на поверхности) и 37 % биомассы (27 и 44 % соответственно). Преваляровала по численности *T. nitzschoides*, в меньшем количестве встречены *P. pseudodelicatissima*, *C. affinis* и *C. granii*. Основу биомассы составляли крупные клетки *P. calcar-avis*, *C. granii* и многочисленный вид *T. nitzschoides*. Около 5 % общей численности фитопланктона приходилось на долю криптофитовых и зелёных водорослей.

В июле 2010 г. с увеличением глубины наблюдали снижение обилия — от 116 тыс. кл.·л⁻¹ на поверхности до 86 тыс. кл.·л⁻¹ у дна. Значения биомассы оставались практически постоянными на всех горизонтах — 0,41–0,43 г·м⁻³. В поверхностном слое динофлагелляты формировали 40 % численности и 31 % биомассы фитопланктона, а у дна — 36 и 27 % соответственно. В значительном количестве среди них на поверхности развивались *Oxyrrhis marina*, *P. micans* и представители родов *Amphidinium* и *Gymnodinium*; у дна — *P. cordatum*, *G. fusiforme* и *Katodinium glaucum*. Основой биомассы повсеместно были крупные *Dinophysis fortii*, *P. divergens*, *D. lenticula*, *Polykrikos kofoidii* и многочисленные виды *P. micans*, *O. marina* и *K. glaucum*. Диатомовые составили 15–16 % численности и 67–71 % биомассы на поверхности и у дна, среди них количественно

преобладали *C. caspia*, *D. brightwellii*, *N. tenuirostris*, *T. nitzschioides* и *P. calcar-avis*. Основу биомассы формировали *C. granii*, *P. calcar-avis*, *D. brightwellii* и *Coscinodiscus* sp.; у дна увеличивалась роль *P. calcar-avis* (26 % общей биомассы), а на поверхности — *D. brightwellii* (46 % биомассы). Отмечено обилие криптофитовых водорослей *Plagioselmis* spp. и цианопрокариот родов *Oscillatoria*, *Planktolyngbya* и *Aphanizomenon* — 30–38 и 9–10 % общей численности соответственно. Солоноватоводный вид *B. lauterbornii* и морской *Pterosperma undulatum* преимущественно развивались на верхнем горизонте моря, формируя 4 % общей численности.

В июле 2012 г. отмечено относительно равномерное распределение численности и биомассы фитопланктона по вертикали (67–80 тыс. кл.·л⁻¹ и 0,203–0,228 г·м⁻³ соответственно). Как и в летний период 2011 г., доминировала по численности (47 %) кокколитофориды *E. huxleyi*. Её максимальную численность (34–38 тыс. кл.·л⁻¹) наблюдали в верхнем слое пролива (0–5 м); с глубиной значение уменьшалось (29 тыс. кл.·л⁻¹). Из-за небольшого размера своих клеток *E. huxleyi* формировала не более 2 % общей биомассы. Диатомовые составили в среднем 22 % численности (от 15 % у дна до 21–28% в слое 0–5 м) и 45 % биомассы (от 33 % на поверхности и у дна до 67 % на горизонте 5 м). Численно доминировали *P. pseudodelicatissima*, *T. nitzschioides* и *P. calcar-avis*, при этом последний вид формировал около 42 % общей биомассы. Интенсивное развитие этого теплолюбивого вида связано с высокой температурой на поверхности пролива (+23 °С). Субдоминантами были *C. affinis*, *Proboscia alata*, *N. tenuirostris* и *P. elongatum*. Максимум для двух последних видов водорослей отмечен на придонном горизонте. Динофлагелляты формировали 24 % численности и 53 % биомассы фитопланктона. Обильно развивались виды родов *Gymnodinium* и *Gyrodinium*, среди них преобладали *Gymnodinium blax*, *G. simplex* и *G. fusiforme*. В значительном количестве зафиксированы *P. cordatum*, *P. micans* и *P. kofoidii*. Основная часть биомассы динофлагеллят была сформирована крупными видами *T. furca*, *P. kofoidii* и *P. divergens*; роль первого увеличивалась в придонном слое, а второй и третий виды преобладали в верхнем слое пролива (0–5 м). В формировании биомассы также участвовали *Dinophysis caudata*, *Phalacroma rotundatum*, *D. lenticula*, *P. micans* и *Protoceratium reticulatum*. В слое воды от 5 м до дна преобладали криптофитовые (5 % общей численности); на поверхности вегетировал мезосапробный вид эвгленовых водорослей *Eutreptia lanowii* с численностью до 2 тыс. кл.·л⁻¹. Среди зелёных водорослей встречен морской вид *P. undulatum*.

В июле 2013 г. доминировали диатомовые *C. affinis* и *P. pseudodelicatissima* (39 % численности и 91 % биомассы); на долю *P. calcar-avis* приходилось 58 % численности и 96 % биомассы диатомовых. На фоне интенсивного развития диатомовых динофлагелляты формировали не более 27 % численности и 8 % биомассы фитопланктона. Основными среди них были мелко- и средне-размерные виды *Gymnodinium nana*, *Gymnodinium* sp., *O. marina* и *P. micans*. Биомассу формировали *O. marina*, *P. micans*, *S. acuminata* и *Gyrodinium* sp. (96 % биомассы динофлагеллят). На долю криптофитовых и цианопрокариот родов *Planktolyngbya* и *Anabaena* приходилось 30 % общей численности фитопланктона. Эвгленовые были малочисленными (3 %).

В августе 2016 г. наибольшие значения численности и биомассы планктонных водорослей (3046 тыс. кл.·л⁻¹ и 4,589 г·м⁻³ соответственно, то есть на уровне, характерном для цветения воды) зарегистрированы на отдельных станциях в более отдалённых от берега районах, где в массе обнаружены мезосапробный вид динофитовых *P. micans* (272 тыс. кл.·л⁻¹ и 2,960 г·м⁻³) и цианопрокариоты (2411 тыс. кл.·л⁻¹ и 0,197 г·м⁻³). Наименьшие значения (34–44 тыс. кл.·л⁻¹ и 0,109–0,664 г·м⁻³) зафиксированы на прибрежных станциях. В целом в исследуемом районе пролива доминировали цианопрокариоты — *Planktolyngbya limnetica* и виды рода *Anabaena* (49 и 20 % общей численности соответственно). Диатомовые и динофлагелляты формировали значительную часть общей численности фитопланктона (11 и 12 % соответственно) и вносили основной вклад в его биомассу (62 и 36 %). Заметное развитие среди диатомовых

получил *P. calcar-avis* (5 % общей численности и 60 % биомассы сообществ). Также наблюдали вегетацию *Leptocylindrus danicus*, *N. tenuirostris*, *T. nitzschioides* и видов рода *Pseudo-nitzschia*, формировавших 56 % общей численности диатомовых. Среди динофлагеллят численно преобладали виды родов *Gymnodinium* и *Heterocapsa*, а также *P. micans* и *P. cordatum* (80 % динофлагеллят). Значительную часть (34 %) биомассы всего фитопланктона формировали клетки *P. micans*.

В августе 2019 г. доминировали диатомовые и динофлагелляты — в среднем 57 и 28 % общей численности фитопланктона и 69 и 30 % биомассы соответственно. Кокколитофорида, представленная *E. huxleyi*, и криптофитовые формировали не более 13 % общей численности. На долю других классов планктонных водорослей приходилось менее 2 % численности и 1 % биомассы. Наиболее высокие значения численности и биомассы (24 тыс. кл.·л⁻¹ и 0,361 г·м⁻³ соответственно) отмечены в слое воды 12–30 м. Показатели на поверхности были в 1,3–2 раза ниже (18 тыс. кл.·л⁻¹ и 0,185 г·м⁻³). На нижних горизонтах (30 м) максимальная доля численности (71 %) и биомассы (92 %) приходилась на диатомовые; на горизонтах 0–25 м их значение снижалось (52–56 % численности и 64–78 % биомассы). В среднем слое воды (12–25 м) доли динофлагеллят в численности и биомассе составляли 32 и 35 % соответственно; в нижнем слое (30 м) эти водоросли формировали 17 % численности и 8 % биомассы, а на поверхности — 26 и 21 % соответственно. Криптофитовые во всём изученном столбе воды характеризовались значениями от 9 до 12 % общей численности. На поверхности моря кокколитофорида составляли более 8 % общей численности фитопланктона. Среди диатомовых во всём районе исследований обильно развивались *P. pseudodelicatissima* и *P. calcar-avis*. Субдоминанты *P. alata* и *T. nitzschioides* формировали 6 % численности сообществ. Ключевыми видами среди динофлагеллят были *P. micans*, *P. cordatum*, *S. acuminata*, *Pronoctiluca pelagica*, *K. glaucum*, *Torodinium robustum* и представители родов *Tripos*, *Gymnodinium* и *Gyrodinium*. Основа биомассы фитопланктона была сформирована крупноклеточными видами диатомовых водорослей *P. calcar-avis* и динофитовыми: *P. kofoidii*, *P. divergens*, *P. reticulatum*, видами рода *Tripos*, а также доминирующими по численности представителями родов *Prorocentrum*, *Gymnodinium* и *Gyrodinium*.

Осень. В сентябре 2011 г. количественно доминировали цианопрокариоты, а также криптофитовые и зелёные водоросли (50, 13 и 19 % общей численности соответственно), при этом на их долю приходилось не более 7 % биомассы фитопланктона. В Азовском море наиболее многочисленным видом среди цианопрокариот был *P. limnetica*; в меньших количествах встречены *Microcystis aeruginosa*, *Merismopedia punctata* и представители родов *Aphanizomenon* и *Anabaena*. Среди зелёных водорослей преобладали *B. lauterbornii* и виды рода *Nannochloris*, на уровне субдоминант развивались *Scenedesmus quadricauda*, *M. contortum* и *Ankistrodesmus convolutus*. Диатомовые и динофлагелляты формировали не более 7 и 10 % численности фитопланктона соответственно и основную часть биомассы — 22 и 69 %. Среди динофитовых преобладали *P. micans*, *P. cordatum*, *G. fusiforme*, *Enciculifera carinata*, *K. glaucum*, *A. sanguinea*, *P. kofoidii*, *S. acuminata* и представители *Gymnodinium*. Основу биомассы составляли *P. micans*, *E. carinata*, редкие крупноклеточные виды из рода *Protoperdinium*, а также *P. kofoidii*. Самыми значимыми видами среди диатомовых были *C. caspia*, *P. pseudodelicatissima* и *T. nitzschioides*, субдоминантами — *P. calcar-avis* и *Thalassiosira* sp. По биомассе наибольшее значение имели диатомовые водоросли *P. calcar-avis* и многочисленные *Thalassiosira* sp. (58 %). Около 40 % биомассы приходилось на *C. caspia*, *D. brightwellii*, *T. nitzschioides* и на виды родов *Gyrosigma* и *Coscinodiscus*.

ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрологический режим Керченского пролива обусловлен его мелководностью, активным водообменом между Чёрным и Азовским морями и метеорологическими условиями [Сытник и др., 2017]. Нагревание и охлаждение водных масс происходят быстро по всей толще воды.

Годовой ход температуры воды характеризуется значительной амплитудой с выраженным минимумом в феврале-марте (до -1 °С) и максимумом в июле-августе (до $+30$ °С) (средние многолетние значения — $+2,0$ и $+24,2$ °С соответственно). Средняя годовая температура воды в проливе составляет около $+13$ °С. В более глубоководной центральной части пролива высота волн может достигать 2–3 м, тогда как у береговой линии, особенно при направлении ветра с берега, она не превышает 1,5 м. Солёность воды обычно колеблется от 12,0 до 18,0 ‰ и зависит от преобладающего типа течений. В районе пролива ветровые условия разнообразны, что определяется многообразием синоптических ситуаций и характером рельефа. Повторяемость штилей составляет от 1 до 2 %. Среднегодовая скорость ветра — $5,3$ – $6,9$ м·с⁻¹, максимальная может достигать 40 м·с⁻¹. Водные массы в проливе хорошо идентифицируются по солёности и содержанию биогенных элементов, визуально — по цвету и прозрачности воды. Общая повторяемость течений с учётом направленности смешанных потоков в среднем за год составляет для азовского потока 62 %, для черноморского — 38 %; при южных ветрах преобладающим становится черноморское течение.

В фитопланктоне Керченского пролива, Динского и Таманского заливов обнаружено 154 вида водорослей (табл. 4), относящихся к следующим отделам: диатомовые, динофитовые, зелёные, охрофитовые, криптофитовые, цианопрокариоты, прازیнофитовые, гаптофитовые и эвгленовые. Фитопланктон представлен морскими, пресноводными и солоноватоводными видами. Такому разнообразию способствовали большие диапазоны солёности и температуры воды. Высокие значения биомассы фитопланктона отмечены в тёплое время года — с октября по декабрь 2007 г., в августе 2008 и 2009 гг. и в июле 2010 г. Средние зафиксированы в мае 2003 г., октябре 2005 г., июне и сентябре 2008 г., августе 2011 г. и марте 2020 г. Низкие значения зарегистрированы в остальное время. Обильное развитие планктонных водорослей (на уровне, характерном для цветения воды) наблюдали в августе 2009 г. В другое время численность клеток фитопланктона была существенно ниже. Результаты исследований, проведённых в западной и центральной частях Керченского пролива в августе 2009 г., показали, что в этой сравнительно небольшой акватории значения численности и биомассы фитопланктона могут изменяться на несколько порядков [Брянцева и др., 2010].

В районе Керченского пролива отмечены значительные сезонные и межгодовые изменения видового богатства, численности и биомассы планктонных водорослей. Весной доминировали мелкие диатомовые *S. costatum* и *C. caspia*, характерные для этого времени года [Макаревич, 2022]. Летом преобладали как мелкие (*P. pseudodelicatissima*, *C. caspia* и *T. nitzschoides*), так и крупные диатомовые (*P. calcar-avis* и *D. brightwellii*), относительно мелкие динофлагелляты из родов *Gymnodinium*, *Gyrodinium*, *Oxyrrhis* и *Prorocentrum* и крупные динофлагелляты из родов *Dinophysis*, *Tripos*, *Polykrikos* и *Protoperidinium*. Возрастание роли крупных видов диатомовых и динофлагеллят в Чёрном и Азовском морях обычно приходится на позднелетний и осенний периоды [Макаревич, 2022; Ясакова, Макаревич, 2017]. Осенью 2011 г. количественно доминировали цианопрокариоты (*P. limnetica*), криптофитовые рода *Plagioselmis* и зелёные водоросли родов *Binuclearia* и *Nannochloris*. Вероятной причиной преобладания солоноватоводных форм планктонной флоры стало снижение в сентябре 2011 г. величин солёности вследствие предшествующего исследованиям сильного северо-восточного ветра, который сформировал в Керченском проливе азовский тип вод [Иванов и др., 2014]. Основу биомассы фитопланктона на протяжении всего периода изучения акватории преимущественно составляли крупные виды диатомовых (*P. calcar-avis*) и динофитовых водорослей (из родов *Protoperidinium* и *Tripos*). Интересно, что *P. micans* зачастую становится причиной красных приливов в мелководной северо-западной части Чёрного моря, а цветение цианопрокариот при формировании блокирующего слоя способно вызвать гипоксию в прибрежной зоне Азовского моря [Матишов, Фуштей, 2003; Нестерова, 2001].

Таблица 4. Основные гидрологические характеристики, количество таксонов, средние значения численности и биомассы фитопланктона в Керченском проливе и прилегающих акваториях в 1989–2020 гг.

Table 4. Main hydrological characteristics, number of taxa, and mean abundance and biomass of phytoplankton in the Kerch Strait and adjacent waters in 1989–2020

Период исследований	Район Керченского пролива	Количество видов	Т воды, °С / солёность, ‰	Численность, тыс. кл. · л ⁻¹	Биомасса, мг · м ⁻³	Источник
Май — сентябрь 1989 г.	Северная часть	90 таксонов	+17...+25 / 11–16	–	–	Черникова, 2004
Июнь 1997 и 2000 гг.; декабрь 1998 и 1999 гг.	Керченский пролив, Динской и Таманский заливы	154	0...+26 / 5–27	–	–	Ковалева, 2008
Ноябрь 2003 г.	Южная часть	44	–	43,5	81,9	Заремба, 2011
Октябрь 2005 г.	–"–	48	–	69,1	355,1	–"–
Октябрь 2007 г.	–"–	46	–	275,6	1514,7	–"–
Сентябрь 2008 г.	–"–	46	–	79,5	378,6	–"–
Июнь 2009 г.	Южная часть	47	–	27,8	111,3	Заремба, 2013
Июнь 2010 г.	–"–	46	–	26,9	263,3	–"–
Июнь 2011 г.	–"–	42	–	90,0	202,3	–"–
Июнь 2012 г.	–"–	54	–	65,9	209,2	–"–
Октябрь 2007 г.	Центральная часть	–	–	220	4500	Магишов и др., 2013
Ноябрь 2007 г.	–"–	42	+7,2...+11 / –	365	5800	–"–
Декабрь 2007 г.	–"–	–	–	250	1500	–"–
Апрель 2008 г.	–"–	–	–	405	200	–"–
Июнь 2008 г.	–"–	–	–	145	400	–"–
Август 2008 г.	–"–	–	–	205	1200	–"–
Август 2009 г.	Центральная и западная части	27	– / 11–14	2298 ± 1945 (96,12–9754,4)	4128 ± 2023 (162,2–9887,55)	Брянцева и др., 2010
Август 2011 г.	Центральная часть	72	+27,6 / 12,22–16,59	45,6	412,95	Троценко и др., 2012
Май — декабрь 2000–2011 гг.	Южная часть	–	+5...+27 / 15,11–17,78	–	436 (80–1400)	Жугайло и др., 2011
Сентябрь 2018 г.	Южная часть	84	+20...+21 / –	105,7 ± 22	227 ± 32	Ремизова, Теюбова, 2021
Март 2020 г.	Центральная часть	33	–	389,2 (356,8–421,6)	426,4 (346,0–506,7)	Загорская и др., 2021
Июнь 2020 г.	–"–		–	582,9 (553,3–612,4)	66,1 (53,1–79,0)	–"–
Август 2020 г.	–"–		–	37,9 (35,1–40,6)	28,4 (26,2–30,6)	–"–
Ноябрь 2020 г.	–"–		–	24,6 (20,6–28,5)	35,8 (34,1–37,4)	–"–

Примечание: прочерк (–) — нет данных; в скобках указаны диапазоны значений.

Note: a dash (–) denotes no data; in parentheses, the range of values are given.

Развитие кокколитофориды *E. huxleyi* в районе Керченского пролива наблюдали в июне 2011 г., июле 2012 г. и мае 2013 г.; вид формировал 34–47 % численности фитопланктона. Численность этой водоросли в Чёрном море в последнее время ежегодно достигает уровня, характерного для цветения воды; отмечена тенденция к усилению развития вида, что подтверждают спутниковые наблюдения [Силкин и др., 2009; Mikaelyan et al., 2006, 2011]. Аномальное по интенсивности и продолжительности (с мая по июль) цветение *E. huxleyi* в Чёрном море было зафиксировано в 2012 г. после холодной зимы и интенсивного ветрового перемешивания [Ясакова, Станичный, 2012]. В связи со способностью этого вида регулировать уровень CO₂ в атмосфере и, как следствие, влиять на температурный режим и климатические условия нашей планеты, исследования динамики развития *E. huxleyi* в современный период приобретают особую значимость [Yasakova et al., 2017].

В августе 2019 г. численность и биомасса фитопланктона в Керченском проливе существенно уступали показателям 2016 г.: численность — в 32 раза, биомасса — в 6 раз. Вероятной причиной столь резкого снижения обилия планктонных водорослей могло стать возведение гидротехнических сооружений Керченского моста в 2017–2019 гг. Значительное количество тяжёлых металлов (1–2,5 ПДК) и нефтепродуктов, аккумулированных в донных осадках, могло негативно повлиять на численность фитопланктона и фотосинтетическую активность водорослей, чувствительных к затемнению фотического слоя и к содержанию в воде различных поллютантов (табл. 5).

Таблица 5. Содержание загрязняющих веществ в донных отложениях (с поверхностного слоя дна, 0,0–0,2 м) района строительства Керченского моста [Сытник и др., 2017]

Table 5. The content of pollutants in bottom sediments (from the surface layer of the bottom, 0.0–0.2 m) of the Crimean Bridge construction area [Sytnik et al., 2017]

Химический элемент / загрязняющее вещество	ПДК, мг·кг ⁻¹	Содержание в донных отложениях, мг·кг ⁻¹
Ртуть	2,1	3,6–5,5
Нефтепродукты	данные отсутствуют	725,9–1147,4
Свинец	32	14,3–27,4
Мышьяк	2	0,9–1,8
Кадмий	0,5	0,6–1,32
Никель	20	1,1–3,2
3,4-бенз(а)пирен	0,01	≤ 0,01

Выводы:

1. Таксономический состав фитопланктона Керченского пролива в 2009–2019 гг. включал 114 видов микроводорослей. Наибольшее видовое разнообразие диатомовых отмечено в весенний период (апрель 2009 г.), динофлагеллят — в летний (июнь 2011 г. и август 2019 г.). Видовое богатство представителей других классов фитопланктона мало изменялось в зависимости от сезона. В водах пролива преимущественно встречались общие для Чёрного и Азовского морей виды диатомовых, динофитовых и кокколитофрид, а также солоноватоводные виды и перифитонные виды диатомовых.
2. Наиболее высокие показатели сходства [коэффициент Сёренсена — Чекановского (Дайса) ≥ 60 %] таксономического состава микроводорослевых сообществ Керченского пролива зарегистрированы в тёплое время года, с июня по сентябрь.

3. Весной доминировали мелкоклеточные диатомовые водоросли; летом преобладали кокколитофориды, мелкие и крупные виды диатомовых и динофлагеллят; в позднелетний и осенний сезоны возрастала роль цианопрокариот, а также крупных видов диатомовых и динофлагеллят.
4. Численность фитопланктона за период 2009–2019 гг. в районе Керченского пролива варьировала от 19 до 719 тыс. кл. · л⁻¹, биомасса — от 0,057 до 1,92 г · м⁻³. Наибольшие значения численности и биомассы наблюдали в августе 2016 г., когда самыми многочисленными были цианопрокариоты и динофлагелляты. Основу биомассы в это время формировали крупный вид диатомовых *Pseudosolenia calcar-avis* и многочисленный вид динофлагеллят *Prorocentrum micans*. Высокие значения биомассы летом 2010, 2012 и 2013 гг. связаны с присутствием в планктоне крупноклеточного *P. calcar-avis*. Этот вид характеризовался интенсивным развитием вследствие установления тёплой погоды.
5. Распределение численности и биомассы фитопланктона по вертикали было неоднородным и зависело от гидродинамической активности вод.
6. Возведение гидротехнических сооружений при строительстве Керченского моста в 2017–2019 гг., вероятно, стало причиной значительного снижения численности и биомассы фитопланктона в проливе в позднелетний период 2019 г.: численность сократилась в 32 раза по сравнению с показателями 2016 г., биомасса — в 6 раз.

Публикация подготовлена в рамках государственного задания ЮНЦ РАН № 122011900153-9.

Благодарность. Выражаю глубокую признательность Ю. Б. Околюк (Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, Laboratorio de Botánica Marina y Planctología, Veracruz, Mexico) за ценные замечания при подготовке рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Брянцева Ю. В., Лях А. М., Сергеева А. В. *Расчёт объёмов и площадей поверхности одноклеточных водорослей Чёрного моря*. Севастополь, 2005. 25 с. (Препринт / НАН Украины, Институт биологии южных морей). [Bryantseva Yu. V., Lyakh A. M., Sergeeva A. V. *Raschet ob'ёмov i ploshchadei poverkhnosti odnokletochnykh vodoroslei Chernogo morya*. Sevastopol, 2005, 25 p. (Preprint / NAN Ukrainy, Institut biologii yuzhnykh morei). (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/8906>
2. Брянцева Ю. В., Силаков М. И., Слипечкий Д. Я., Данилова О. Н. Состояние фитопланктонного сообщества в районе Керченского пролива в августе 2009 года // *Современные проблемы экологии Азово-Черноморского региона* : материалы V Международной конференции, 8–9 октября 2009 г., Керчь, ЮгНИРО. Керчь : Изд-во ЮгНИРО, 2010. С. 26–32. [Bryantseva Yu. V., Silakov M. I., Slipetsky D. Ya., Danilova O. N. State of phytoplankton community in the Kerch Strait area in August 2009. In: *Current Problems of the Azov-Black Sea Region Ecology* : materials of the V International Conference, 8–9 October, 2009, Kerch, YugNIRO. Kerch : YugNIRO Publishers', 2010, pp. 26–32. (in Russ.)]
3. Голлербах М. М., Косинская В. И., Полянский Е. К. *Определитель пресноводных водорослей СССР*. Вып. 2: Синезелёные водоросли. Москва : Советская наука, 1953. 651 с. [Gollerbach M. M., Kosinskaya V. I., Polyansky E. K. *Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei SSSR*. Iss. 2: *Sinezelenye vodorosli*. Moscow : Sovetskaya nauka, 1953, 651 p. (in Russ.)]
4. Дедусенко-Щеголева Н. Т., Матвиенко А. М., Шкорбатов Л. А. *Определитель пресноводных водорослей СССР*. Вып. 8: Зелёные водоросли. Москва : Советская наука, 1959. 222 с. [Dedusenko-Shchegoleva N. T., Matvienko A. M., Shkorbatov L. A. *Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei SSSR*. Iss. 8: *Zelenye vodorosli*. Moscow : Sovetskaya nauka, 1959, 222 p. (in Russ.)]
5. Жугайло С. С., Себах Л. К., Боровская Р. В. Гидрохимическая характеристика качества вод Керченского пролива в современных условиях // *Системы контроля окружающей*

- среды : сборник научных трудов. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. Вып. 15. С. 197–202. [Zhugailo S. S., Sebakh L. K., Borovskaya R. V. Hidrokhimicheskaya kharakteristika kachestva vod Kerchenskogo proliva v sovremennykh usloviyakh. In: *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy : sbornik nauchnykh trudov*. Sevastopol : EKOSI-Gidrofizika, 2011, iss. 15, pp. 197–202. (in Russ.)]
6. Загорская А. С., Литвин А. Ю., Матасова И. Ю., Ремизова Н. П., Студиград Н. П., Теубова В. Ф. Мониторинг состояния морских сообществ Керченского пролива в 2020 году // *Актуальные проблемы геоэкологии и природопользования : материалы II Всероссийской научно-практической конференции*, Краснодар, 08 октября 2021 г. Краснодар : Кубанский государственный университет, 2021. С. 89–93. [Zagorskaya A. S., Litvin A. Yu., Matasova I. Yu., Remizova N. P., Studigrad N. P., Teyubova V. F. Monitoring sostoyaniya morskikh soobshchestv Kerchenskogo proliva v 2020 godu. In: *Aktual'nye problemy geoekologii i prirodopol'zovaniya : materialy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, Krasnodar, 08 October, 2021. Krasnodar : Kubanskii gosudarstvennyi universitet, 2021, pp. 89–93. (in Russ.)]
 7. Заремба Н. Б. Изменение фитопланктонного сообщества в южной части Керченского пролива в осенний период 2003–2008 гг. // *Основные результаты комплексных исследований в Азово-Черноморском бассейне и Мировом океане*. Керчь : ЮгНИРО, 2011. С. 72–78. (Труды ЮгНИРО ; т. 49). [Zaremba N. V. Change of phytoplankton community in the Southern Kerch Strait in the period of 2003–2008. In: *Main Results of Complex Research in the Azov–Black Sea Basin and the World Ocean*. Kerch : YugNIRO, 2011, pp. 72–78. (Trudy YugNIRO ; vol. 49). (in Russ.)]
 8. Заремба Н. Б. Фитопланктонное сообщество южной части Керченского пролива в поздневесенний период 2009–2012 годов // *Основные результаты комплексных исследований в Азово-Черноморском бассейне и Мировом океане*. Керчь : ЮгНИРО, 2013. С. 40–43. (Труды ЮгНИРО ; т. 51). [Zaremba N. V. Phytoplankton community of the southern Kerch Strait during late spring period in 2009–2012. In: *Main Results of Complex Research in the Azov–Black Sea Basin and the World Ocean*. Kerch : YugNIRO, 2013, pp. 40–43. (Trudy YugNIRO ; vol. 51). (in Russ.)]
 9. Иванов В. А., Матишов Г. Г., Кушнир В. М., Бердников С. В., Чепыженко А. И., Поважный В. В., Степанян О. В. Керченский пролив в осенний период 2011 года: результаты совместных комплексных исследований, выполненных в экспедиции МГИ НАН Украины и ЮНЦ РАН // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 1. С. 44–57. [Ivanov V. A., Matishov G. G., Kushnir V. M., Berdnikov S. V., Chepyzhenko A. I., Povazhnyi V. V., Stepanyan O. V. Kerch Strait in autumn, 2011: Results of the joint complex research carried out in the expedition of MHI NAS of Ukraine and SSC RAS. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2014, no. 1, pp. 44–57. (in Russ.)]
 10. Киселев Н. А. *Панцирные жгутиконоосцы*. Москва ; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1950. 280 с. [Kiselev N. A. *Pantsirnye zhgutikonostsy*. Moscow ; Leningrad : Izd-vo AN SSSR, 1950, 280 p. (in Russ.)]
 11. Ковалева Г. В. Фитопланктон Азовского моря и прилегающих водоёмов // *Азовское море в конце XX – начале XXI веков: геоморфология, осадконакопление, пелагические сообщества*. Апатиты : КНЦ РАН, 2008. Т. 10. С. 134–223. [Kovaleva G. V. Fitoplankton Azovskogo morya i prilegayushchikh vodoemov. In: *Azovskoe more v kontse XX – nachale XXI vekov: geomorfologiya, osadkonakoplenie, pelagicheskie soobshchestva*. Apatity : KNTs RAN, 2008, vol. 10, pp. 134–223. (in Russ.)]
 12. Косинская Е. К. *Определитель морских синезелёных водорослей*. Москва ; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1948. 279 с. [Kosinskaya E. K. *Opredelitel' morskikh sine-zelenykh vodoroslei*. Moscow ; Leningrad : Izd-vo AN SSSR, 1948, 279 p. (in Russ.)]
 13. Макаревич П. Р. Пелагические фитоценозы Азовского моря // *Наука Юга России*. 2022. Т. 18, № 4. С. 97–107. [Makarevich P. R. Pelagic algal communities in the Sea of Azov. *Nauka Yuga Rossii*, 2022, vol. 18, no. 4, pp. 97–107. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S25000640220410>
 14. Макаревич П. Р., Дружков Н. В. *Методические рекомендации по анализу количественных и функциональных характеристик морских биоценозов северных морей*. Ч. 1. *Фитопланктон. Зоопланктон. Взвешенное органическое*

- вещество. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 1989. 50 с. [Makarevich P. R., Druzhkov N. V. *Metodicheskie rekomendatsii po analizu kolichestvennykh i funktsional'nykh kharakteristik morskikh biotsenozov severnykh morei*. Pt 1. *Fitoplankton. Zooplankton. Vzveshennoe organicheskoe veshchestvo*. Apatity : Izd-vo KNTs RAN, 1989, 50 p. (in Russ.)]
15. Матишов Г. Г., Иванов В. А. Совместные комплексные исследования Азовского моря и Керченского пролива // *Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Чёрном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования* : сборник статей по материалам российско-украинского семинара (Ростов-на-Дону, 6–8 июня 2011 г.) / гл. ред. Г. Г. Матишов, В. А. Иванов. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2012. С. 10–16. [Matishov G. G., Ivanov V. A. Joint integrated studies of the Sea of Azov and the Kerch Strait. In: *Azovskoe more, Kerchenskii proliv i predprolivnyye zony v Chernom more: problemy upravleniya pribrezhnymi territoriyami dlya obespecheniya ekologicheskoi bezopasnosti i ratsional'nogo prirodopol'zovaniya* : sbornik statei po materialam rossiisko-ukrainskogo seminar (Rostov-on-Don, 6–8 June, 2011) / G. G. Matishov, V. A. Ivanov (Eds). Rostov-on-Don : Izd-vo YuNTs RAN, 2012, pp. 10–16. (in Russ.)]
 16. Матишов Г. Г., Инжебейкин Ю. И., Савицкий Р. М. Воздействие на среду и биоту аварийного разлива нефтепродуктов в Керченском проливе в ноябре 2007 г. // *Водные ресурсы*. 2013. Т. 40, № 3. С. 259–273. [Matishov G. G., Inzhebeikin Y. I., Savitskii R. M. The environmental and biotic impact of the oil spill in Kerch Strait in November 2007. *Vodnye resursy*, 2013, vol. 40, no. 3, pp. 259–273. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0321059613020041>
 17. Матишов Г. Г., Фуштей Т. В. К проблеме вредоносных «цветений воды» в Азовском море // *Исследовано в России* : электронный журнал. 2003. Т. 6. С. 213–225. [Matishov G. G., Fushtei T. V. K probleme vredonosnykh “tsvetenii vody” v Azovskom more. *Issledovano v Rossii* : elektronnyi zhurnal, 2003, vol. 6, pp. 213–225. (in Russ.)]
 18. Нестерова Д. А. «Цветение» воды в северо-западной части Чёрного моря (обзор) // *Альгология*. 2001. Т. 11, № 4. С. 502–513. [Nesterova D. A. Water bloom in the north-west part of the Black Sea (review). *Al'gologiya*, 2001, vol. 11, no. 4, pp. 502–513. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5362>
 19. Прошкина-Лавренко А. И. *Диатомовые водоросли бентоса Чёрного моря*. Москва : Изд-во АН СССР, 1963. 243 с. [Proshkina-Lavrenko A. I. *Diatomovye vodorosli bentosa Chernogo morya*. Moscow : Izd-vo AN SSSR, 1963, 243 p. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/12747>
 20. Прошкина-Лавренко А. И. *Диатомовые водоросли планктона Чёрного моря*. Москва : Изд-во АН СССР, 1955. 216 с. [Proshkina-Lavrenko A. I. *Diatomovye vodorosli planktona Chernogo morya*. Moscow : Izd-vo AN SSSR, 1955, 216 p. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/6623>
 21. Ремизова Н. П., Теюбова В. Ф. Состав и структура планктонных сообществ в прибрежной зоне Таманского полуострова (Керченский пролив, сентябрь, 2018) // *Океанологические исследования*. 2021. Т. 49, № 1. С. 37–52. [Remizova N. P., Teubova V. F. Composition and structure of planktonic communities in the coastal zone of the Taman Peninsula (Kerch Strait, September, 2018). *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2021, vol. 49, no. 1, pp. 37–52. (in Russ.)]. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2021.49\(1\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).3)
 22. Силкин В. А., Паутова Л. А., Микаэлян А. С. Рост кокколитофориды *Emiliania huxleyi* (Lohm.) Hay et Mohl. в северо-восточной части Чёрного моря, лимитированный концентрацией фосфора // *Альгология*. 2009. Т. 19, № 2. С. 135–144. [Silkin V. A., Pautova L. A., Mikaelyan A. S. Phosphorus-limited bloom of *Emiliania huxleyi* (Lohm.) Hay et Mohl. in the northeastern Black Sea. *Al'gologiya*, 2009, vol. 19, no. 2, pp. 135–144. (in Russ.)]
 23. Студеникина Е. И., Алдакимова А. Я., Губина Г. С. *Фитопланктон Азовского моря в условиях антропогенных воздействий*. Ростов-на-Дону : АЗНИИРХ, 1999. 175 с. [Studenikina E. I., Aldakimova A. Ya., Gubina G. S. *Fitoplankton Azovskogo morya v usloviyakh antropogennykh vozdeistvii*. Rostov-on-Don : AzNIIRKh, 1999, 175 p. (in Russ.)]

24. Сытник Н. А., Дорошенко Т. В., Щерба А. В., Полякова Т. В. Оценка воздействия на экосистему Керченского пролива строительства Крымского моста // *Евразийский союз учёных. Биологические науки*. 2017. № 10-1 (43). С. 11–16. [Sytnik N. A., Doroshenko T. V., Shcherba A. V., Polyakova T. V. Otsenka vozdeistviya na ekosistemu Kerchenskogo proliva stroitel'stva Krymskogo mosta. *Evraziiskii soyz uchenykh. Biologicheskie nauki*, 2017, no. 10-1 (43), pp. 11–16. (in Russ.)]
25. Троценко Б. Г., Жугайло С. С., Себах Л. К., Евченко О. В., Заремба Н. Б., Загайный Н. А. Оценка влияния изменчивости гидрологических, гидрохимических и гидробиологических параметров на биопродуктивность Керченского пролива // *Основные результаты комплексных исследований в Азово-Черноморском бассейне и Мировом океане*. Керчь : ЮгНИРО, 2012. С. 86–97. (Труды ЮгНИРО ; т. 50). [Trotsenko B. G., Zhugaylo S. S., Sebach L. K., Evchenko O. V., Zarembo N. B., Zagayny N. A. Assessment of impact variations in hydrological, hydrochemical and hydrobiological parameters on the Kerch Strait bioproductivity. In: *Main Results of Complex Research in the Azov-Black Sea Basin and the World Ocean*. Kerch : YugNIRO, 2012, pp. 86–97. (Trudy YugNIRO ; vol. 50). (in Russ.)]
26. Черникова Г. Г. Фитопланктон Керченского пролива // *Проблемы литодинамики и экосистем Азовского моря и Керченского пролива* : тезисы докладов международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2004. С. 104–105. [Chernikova G. G. Fitoplankton Kerchenskogo proliva. In: *Problemy litodinamiki i ekosistem Azovskogo morya i Kerchenskogo proliva* : tezisy dokladov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Rostov-on-Don : Izd-vo YuNTs RAN, 2004, pp. 104–105. (in Russ.)]
27. Ясакова О. Н., Макаревич П. Р. Фитопланктон северо-восточной части Чёрного моря. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2017. 176 с. [Yasakova O. N., Makarevich P. R. *Fitoplankton severo-vostochnoi chasti Chernogo morya*. Rostov-on-Don : Izd-vo YuNTs RAN, 2017, 176 p. (in Russ.)]
28. Ясакова О. Н., Станичный С. В. Аномальное цветение *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae) в Чёрном море в 2012 г. // *Морской экологический журнал*. 2012. Т. 11, № 4. С. 54. [Yasakova O. N., Stanichny S. V. Abnormal blooming by *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae) in the Black Sea in 2012. *Morskoy ekologicheskij zhurnal*, 2012, vol. 11, no. 4, pp. 54. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1255>
29. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway / M. D. Guiry, G. M. Guiry (Eds) : [site], 2023. URL: <http://www.algaebase.org> [accessed: 03.02.2023].
30. 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.
31. Dodge J. D. *Marine Dinoflagellates of the British Isles*. London : H. M. S. O., 1982, 301 p.
32. *Identifying Marine Phytoplankton* / C. Tomas (Ed.). San Diego, CA : Academic Press, 1997, 821 p.
33. Mikaelyan A. S., Pautova L. A., Pogosyan S. I., Sukhanova I. N. Summer bloom of coccolithophorids in the northeastern Black Sea. *Oceanology*, 2006, vol. 45, suppl. 1, pp. S127–S138.
34. Mikaelyan A. S., Silkin V. A., Pautova L. A. Coccolithophorids in the Black Sea: Their interannual and long-term changes. *Oceanology*, 2011, vol. 51, iss. 1, pp. 39–48. <https://doi.org/10.1134/S0001437011010127>
35. Yasakova O. N., Okolodkov Yu. B., Chasovnikov V. K. Increasing contribution of coccolithophorids to the phytoplankton in the northeastern Black Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, vol. 124, iss. 1, pp. 526–534. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.07.037>

SPECIES COMPOSITION, ABUNDANCE, AND BIOMASS OF PHYTOPLANKTON IN THE KERCH STRAIT IN 2009–2019

O. Yasakova

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

E-mail: yasak71@mail.ru

The results of studies of planktonic algae developing in the Kerch Strait in various seasons of 2009–2019 are presented. Phytoplankton included 114 species and several taxa identified down to the genus level covering 11 classes of algae, *inter alia* 64 Dinophyceae species and 32 Bacillariophyceae species. Mean values of abundance and biomass were 140 thousand cells·L⁻¹ and 0.386 g·m⁻³, respectively. Cyanophyceae prevailed accounting for 44% of the total phytoplankton abundance. Bacillariophyceae and Dinophyceae formed a significant part of the total phytoplankton abundance (19 and 18%) and biomass (62 and 35%). Cryptophyceae, Coccolithophyceae, and Chlorophyceae amounted to 18% of the total phytoplankton abundance. In spring, small-cell diatoms *Skeletonema costatum* and *Cyclotella caspia* dominated. In summer, large- and small-cell species of Bacillariophyceae and Dinophyceae prevailed, along with a Coccolithophyceae representative *Emiliana huxleyi*. In autumn, species of Cyanophyceae (*Planktolyngbya limnetica*), Cryptophyceae (*Plagioselmis*), and Chlorophyceae (*Binuclearia* and *Nannochloris*) were the most abundant ones. Bacillariophyceae (*Pseudosolenia calcar-avis*) and Dinophyceae (*Prorocentrum*, *Protoperdinium*, and *Ceratium* species) formed the major part of the phytoplankton biomass.

Keywords: phytoplankton, species composition, abundance, biomass, Kerch Strait

ЗАМЕТКИ

УДК 594.124(282.247.38)

**БАСЕЙН РЕКИ КУБАНЬ —
НОВАЯ СТРАНИЦА В ЭКСПАНСИИ АЗИАТСКОГО МОЛЛЮСКА
CORBICULA FLUMINEA (O. F. MÜLLER, 1774) (BIVALVIA: CYRENIDAE)**

© 2024 г. Д. А. Вехов¹, Л. А. Живоглядова¹, Н. С. Елфимова¹, Д. Ф. Афанасьев²

¹Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), Ростов-на-Дону,
Российская Федерация

²Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии,
Москва, Российская Федерация

E-mail: zhivoglyadova@azniirkh.vniro.ru

Поступила в редакцию 22.05.2024; после доработки 03.07.2024;
принята к публикации 27.08.2024; опубликована онлайн 09.09.2024.

В бассейне реки Кубань обнаружен двустворчатый инвазивный моллюск *Corbicula fluminea* (O. F. Müller, 1774). Три живые особи найдены в реке Протока вблизи станицы Гривенская Краснодарского края осенью 2022 г. Предполагается, что высокий инвазионный потенциал вселенца и способность осваивать среды с солёностью до 5 ‰ позволят этому виду заселить не только пресноводные водоёмы, но и эстуарные зоны рек и азовские лиманы. Моллюск является кормовым объектом рыб, его натурализация может увеличить ресурсный потенциал водных объектов юга России.

Ключевые слова: вселенцы, биологическая инвазия, европейская часть России, пресноводные и эстуарные экосистемы

Азиатская корбикула *Corbicula fluminea* (O. F. Müller, 1774) — двустворчатый моллюск с типовым местообитанием в Гуанчжоу (Китай) [Araujo et al., 1993]. В начале XX в. моллюск проник в Северную и Южную Америку [Araujo et al., 1993; Counts, 1981], а с 1980-х гг. активно расселяется в пресноводных и эстуарных водоёмах Европы [Allen, 2019]. В европейской части России корбикула впервые найдена в 2015 г. в бассейне реки Северная Двина [Bespalya et al., 2016] и в Горьковском водохранилище реки Волга [Pryanichnikova et al., 2019]. В 2017 г. моллюск обнаружен в бассейне реки Дон [Zhivoglyadova, Revkov, 2018]. Перечисленные находки были связаны с водными объектами, подогреваемыми сбросной тёплой водой Архангельской, Костромской и Новочеркасской электростанций. Позднее в бассейне реки Дон этот вид обнаружен за пределами аномальной температурной зоны — в основном русле, ниже устья реки Маныч [Живоглядова и др., 2018].

Для водных объектов побережья Каспийского моря в 2013–2018 гг. известны находки близкородственного вида — *Corbicula fluminalis* (O. F. Müller, 1774) [Набоженко, Набоженко, 2016; Khlopkova et al., 2019]. В 2019 и 2021 гг. в дагестанском секторе Каспия обнаружены поселения *C. fluminea*, в том числе в симпатрии с *C. fluminalis* [Хлопкова и др., 2023].

В данной статье сообщается об обнаружении *C. fluminea* в бассейне крупной водной артерии юга России — в реке Кубань. Три живых моллюска собраны в ходе ихтиологических работ в ноябре 2022 г. на реке Протока (правый рукав реки Кубань) в районе станицы Гривенская Калининского района Краснодарского края. Координаты точки находки — N45.656877°, E38.129956°. Моллюски обнаружены на мелководье вдоль уреза воды. Грунт в районе отбора проб представлен заиленным песком и галькой. Длина раковин (максимальное расстояние между передним и задним концом) составила 14,8–16,3 мм; высота (наибольший дорсовентральный размер, взятый от макушки раковины) — 14,3–15,7 мм; толщина (максимальное расстояние при сомкнутых створках) — 10,7–11,8 мм. Вес моллюсков после удаления мантийной жидкости — 1,4–2,1 г.

Видовая идентификация выполнена на основе конхиологических признаков [Жадин, 1952; Сон, 2007; Hubenov et al., 2013; Kamburska et al., 2013; Korniushev, 2007]. Все моллюски имеют створки овально-треугольной формы с широкой макушкой, занимающей центральное положение (рис. 1). Радиальные рёбра раковин хорошо выражены. У всех экземпляров на 1 см высоты приходится по 10 рёбер. Внутренняя поверхность раковин — светлая с фиолетовыми затемнениями в районе мускульных отпечатков.

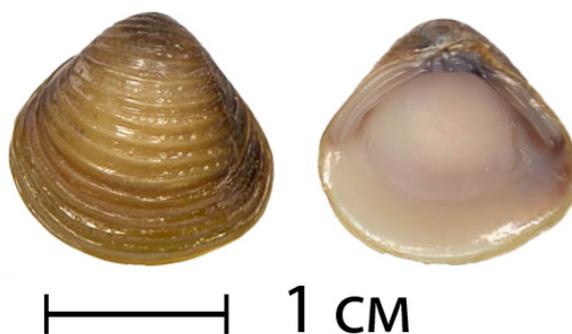


Рис. 1. Раковина *Corbicula fluminea* из реки Протока (правый рукав реки Кубань)

Fig. 1. Shell of *Corbicula fluminea* from the Protoka River (right branch of the Kuban River)

Успех глобальной экспансии представителей рода *Corbicula* связывают с их эффективной репродуктивной стратегией и экологической пластичностью [Allen, 2019]. Корбикулы могут размножаться как обычным половым способом, так и формированием клонов [Pigneur et al., 2011]. Также они известны ранней половой зрелостью (в возрасте от трёх месяцев) и высокой плодовитостью (до 570 педивелигеров за сутки) [McMahon, 2000]. Они способны заселять разные типы субстратов [Sousa et al., 2008], нетребовательны к типу водоёма и успешно выживают в различных экологических средах — от дренажных каналов до крупных рек, прудов, озёр и эстуариев [Karatayev et al., 2007; McMahon, 2000; Sousa et al., 2008]. Моллюски относительно устойчивы к гипоксии: при концентрации кислорода 1–3 мг·л⁻¹ их рост замедляется, при этом они остаются жизнеспособными [Karatayev et al., 2007]. Кроме того, *C. fluminea*, в сравнении с пресноводными моллюсками, такими как унии и дрейссена *Dreissena bugensis* (Andrusov, 1897), более толерантны к солёности. В естественных условиях *C. fluminea* обычно осваивает только верхнеэстуарные зоны с солёностью до 5 ‰, при этом особенности осморегуляции позволяют ей выдерживать солёность до 14–17 ‰ [Karatayev et al., 2007; McMahon, 2000].

Распространение корбикулы в реке Кубань пока неясно, но, учитывая высокую экологическую пластичность *C. fluminea* и её толерантность к солёности, можно предположить, что расселение вида и натурализация возможны в пресноводных водоёмах нижнего бассейна реки, включая водохранилища и оросительные каналы, а также в эстуарных зонах водных объектов юга России.

В число потенциальных экосистем-реципиентов входят и азовские лиманы с солёностью воды до 5 ‰. Поскольку мелкие особи моллюска (размером до 5 мм) являются кормом для бентосоядных рыб [Robinson, Wellborn, 1988], новый вид-вселенец может стать дополнительным пищевым ресурсом и увеличить приёмную ёмкость водных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Жадин В. И. Моллюски пресных и солоноватых вод СССР. Москва ; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1952. 376 с. [Zhadin V. I. *Mollyuski presnykh i solonovatykh vod SSSR*. Moscow ; Leningrad : Izd-vo AN SSSR, 1952, 376 p. (in Russ.)]
- Живоглядова Л. А., Ревков Н. К., Ковалев Е. А. Расширение ареала двустворчатого моллюска *Corbicula fluminea* (O. F. Müller, 1774) в бассейне Нижнего Дона // *Морской биологический журнал*. 2018. Т. 3, № 1. С. 73–75. [Zhivoglyadova L. A., Revkov N. K., Kovalev E. A. Extension of the bivalve *Corbicula fluminea* (O. F. Müller, 1774) areal in the Lower Don river system. *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2018, vol. 3, no. 1, pp. 73–75. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2018.03.1.08>
- Набоженко М. В., Набоженко С. В. *Corbicula fluminalis* (O. F. Müller, 1774) – новый для российского сектора Каспийского бассейна вид двустворчатых моллюсков // *Наука Юга России*. 2016. Т. 12, № 1. С. 61–64. [Nabozhenko M. V., Nabozhenko S. V. *Corbicula fluminalis* (O. F. Müller, 1774), a new clam species for the Russian sector of the Caspian basin. *Nauka Yuga Rossii*, 2016, vol. 12, no. 1, pp. 61–64. (in Russ.)]
- Сон М. О. Моллюски-вселенцы в пресных и солоноватых водах Северного Причерноморья. Одесса : Друк, 2007. 132 с. [Son M. O. *Mollyuski-vselentsy v presnykh i solonovatykh vodakh Severnogo Prichernomor'ya*. Odesa : Druk, 2007, 132 p. (in Russ.)]
- Хлопкова М. В., Бархалов Р. М., Гусейнов К. М., Гасанова А. Ш., Зурхаева У. Д. Инвазии новых морфотипов *Corbicula fluminalis* и *Corbicula fluminea* (Bivalvia: Corbiculidae) в бассейн дагестанского района Каспийского моря // *Российский журнал биологических инвазий*. 2023. Т. 16, № 1. С. 166–179. [Khlopkova M. V., Barkhalov R. M., Guseynov K. M., Gasanova A. Sh., Zurkhaeva U. D. Invasions of new morphotypes of *Corbicula fluminalis* and *Corbicula fluminea* (Bivalvia: Corbiculidae) to the basin of the Dagestan region of the Caspian Sea. *Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii*, 2023, vol. 16, no. 1, pp. 166–179. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-16-1-166-179>
- Allen U. S. *Corbicula fluminea* (Asian clam). In: *CABI Compendium* : [site], 2019. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.88200> [accessed: 28.03.2024].
- Araujo R., Moreno D., Ramos M. A. The Asiatic clam *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) (Bivalvia, Corbiculidae) in Europe. *American Malacological Bulletin*, 1993, vol. 10, no. 1, pp. 39–49.
- Bespalaya Y. V., Bolotov I. N., Aksenova O. V., Kondakov A. V., Sokolova S. E. The first record of *Corbicula* clams (Bivalvia, Corbiculidae) in Northern-European Russia. In: *Lake Ecosystems: Biological Processes, Anthropogenic Transformation, Water Quality* : materials of the V International Scientific Conference, 12–17 September, 2016, Minsk – Naroch / T. M. Mikheyeva (Ed.). Minsk : BSU, 2016, pp. 377–379. <https://elib.bsu.by/handle/123456789/163581>
- Counts C. L. *Corbicula fluminea* (Bivalvia: Sphaeriacea) in British Columbia. *The Nautilus*, 1981, vol. 95, no. 1, pp. 12–13.
- Hubenov Z., Trichkova T., Kenderov L., Kozuharov D. Distribution of *Corbicula fluminea* (Mollusca: Corbiculidae) over an eleven-year period of its invasion in Bulgaria. *Acta Zoologica Bulgarica*, 2013, vol. 65, iss. 3, pp. 315–326.
- Kamburska L., Lauceri R., Beltrami M., Boggero A., Cardeccia A., Guarneri I., Manca M., Riccardi N. Establishment of *Corbicula fluminea* (O. F. Müller, 1774) in Lake Maggiore: A spatial approach to trace the invasion dynamics. *Bioinvasions Records*, 2013, vol. 2, iss. 2, pp. 105–117. <https://doi.org/10.3391/bir.2013.2.2.03>
- Karatayev A. Y., Padilla D. K., Minchin D., Boltovskoy D., Burlakova L. E. Changes in global economies and trade: The potential spread of exotic freshwater bivalves. *Biological Invasions*, 2007, vol. 9, iss. 2, pp. 161–180.

13. Khlopkova M. V., Guseynov K. M., Gasanova A. Sh., Barkhalov R. M., Zurkhaeva U. D., Guseynov M. K. First record of live clams of *Corbicula fluminalis* (Bivalvia: Corbiculidae) in the Dagestan sector of the Caspian Sea basin. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2019, vol. 10, iss. 1, pp. 79–82. <https://doi.org/10.1134/s2075111719010089>
14. Kornushin A. V. Non-unionid freshwater bivalves (Sphaeriidae, Corbiculidae, Dreissenidae) of North American fauna. *Vestnik zoologii*, 2007, vol. 41, iss. 1, pp. 13–22.
15. McMahon R. F. Invasive characteristics of the freshwater bivalve *Corbicula fluminea*. In: *Nonindigenous Freshwater Organisms: Vectors, Biology and Impacts* / R. Claudi, J. Leach (Eds). Boca Raton : Lewis Publishers, 2000, pp. 315–343.
16. Pigneur L.-M., Marescaux J., Roland K., Etoundi E., Descy J.-P., Van Doninck K. Phylogeny and androgenesis in the invasive *Corbicula* clams (Bivalvia, Corbiculidae) in Western Europe. *BMC Evolutionary Biology*, 2011, vol. 11, art. no. 147 (15 p.). <https://doi.org/10.1186/1471-2148-11-147>
17. Pryanichnikova E. G., Voroshilova I. S., Sabitova R. Z. Introduction of *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) (Mollusca: Bivalvia: Corbiculidae) in the Volga River basin. *Inland Water Biology*, 2019, vol. 12, iss. 1 suppl., pp. 95–97. <https://doi.org/10.1134/S1995082919050158>
18. Robinson J. V., Wellborn G. A. Ecological resistance to the invasion of a freshwater clam, *Corbicula fluminea*: Fish predation effects. *Oecologia*, 1988, vol. 77, iss. 4, pp. 445–452. <https://doi.org/10.1007/BF00377258>
19. Sousa R., Antunes C., Guilhermino L. Ecology of the invasive Asian clam *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) in aquatic ecosystems: An overview. *Annales De Limnologie – International Journal of Limnology*, 2008, vol. 44, no. 2, pp. 85–94. <https://doi.org/10.1051/limn:2008017>
20. Zhivoglyadova L. A., Revkov N. K. First records of *Corbicula fluminea* (O. F. Müller, 1774) (Mollusca: Bivalvia) from the Lower Don. *Ecologica Montenegrina*, 2018, vol. 17, pp. 46–52. <https://doi.org/10.37828/em.2018.17.6>

**THE KUBAN RIVER BASIN,
A NEW PAGE IN THE EXPANSION OF THE ASIAN CLAM
CORBICULA FLUMINEA (O. F. MÜLLER, 1774) (BIVALVIA: CYRENIDAE)**

D. Vekhov¹, L. Zhivoglyadova¹, N. Elfimova¹, and D. Afanasyev²

¹Azov–Black Sea Branch of the FSBSI “VNIRO” (“AzNIIRKh”), Rostov-on-Don, Russian Federation

²Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, Russian Federation

E-mail: zhivoglyadovala@azniirkh.vniro.ru

The invasive bivalve *Corbicula fluminea* (O. F. Müller, 1774) was found in the Kuban River basin. Three live Asian clams were recorded in the Protoka River near the settlement of Grivenskaya (Krasnodar Krai) in the autumn of 2022. Assumably, high invasive potential of this species and its ability to withstand salinity up to 5‰ will allow the clam to inhabit not only freshwater bodies, but also estuarine zones of rivers and Azov limans. *C. fluminea* is a food item for fish, and its naturalization can increase the resource potential of water bodies in the south of Russia.

Keywords: invaders, biological invasion, European Russia, freshwater and estuarine ecosystems

УДК 595.371-152(262.54)

ПЕРВЫЕ НАХОДКИ НОВЫХ ВИДОВ АМФИПОД В АЗОВСКОМ МОРЕ

© 2024 г. В. А. Гринцов

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Российская Федерация
E-mail: vgrintsov@gmail.com

Поступила в редакцию 21.02.2024; после доработки 03.05.2024;
принята к публикации 27.08.2024; опубликована онлайн 09.09.2024.

В 2022–2023 гг. у мыса Казантип (полуостров Крым, бухты Русская, Голубники и Широкая) обнаружены 8 видов и 4 рода амфипод, новых для Азовского моря. Все экземпляры хранятся в подколлекции амфипод Коллекции гидробионтов Мирового океана ФИЦ ИнБЮМ. Зарегистрированы следующие виды: *Ampelisca sevastopoliensis* Grintsov, 2011 (семейство Ampeliscidae); *Apothyale crassipes* (Heller, 1866) (Hyalidae); *Microtopopus* cf. *maculatus* (Microtopopidae); *Monocorophium insidiosum* (Crawford, 1937) (Corophiidae); *Nototropis massiliensis* (Bellan-Santini, 1975) (Atylidae); *Orchestia mediterranea* A. Costa, 1853 (Talitridae); *Orchestia montagui* Audouin, 1856 (Talitridae) и *Pleonexes helleri* (Karaman, 1975) (Amphithoidae). Отмечены новые для Азовского моря роды: *Apothyale* Bousfield & Hendrycks, 2002; *Monocorophium* Bousfield & Hoover, 1997; *Nototropis* A. Costa, 1853 и *Pleonexes* Spence Bate, 1857. Семь видов представлены взрослыми самцами и самками, а также молодью. Два вида из рода *Orchestia* идентифицированы по взрослым самцам. Особи новых для Азовского моря видов обнаружены в прибрежной зоне в следующих биотопах: супралитораль, макрофиты на пляже (*O. mediterranea* и *O. montagui*); неприкрепленные макрофиты у берега (*A. crassipes*); песок на дне на глубине от 0,2 до 1,5 м (*A. sevastopoliensis* и *N. massiliensis*); заросли морской травы (*M. insidiosum* и *Microtopopus* cf. *maculatus*) и прикрепленные макрофиты на дне на глубине от 0,2 до 1,0 м (*P. helleri*). Появление этих видов в Азовском море может быть связано с повышением в нём солёности вод.

Ключевые слова: Amphipoda, первые находки, Азовское море

В Азовское море периодически вселяются новые виды ракообразных [Тимофеев, Бондаренко, 2022; Тимофеев и др., 2019], и отряд амфипод (бокоплавы) не исключение. В последние годы нами зарегистрированы 9 новых видов и 5 новых родов для Азовского моря. Материал отбирали из различных биотопов: галечно-песчаных и каменистых пляжей (заплеск), песка на дне, водорослевых ассоциаций, перифитона, камней на дне (рис. 1). Качественные пробы отбирали вручную или же с использованием скребка (ячейки сети 0,5 мм) либо рамки с сетью (ячейки сети 0,5 мм). Пробы фиксировали 96%-ным этанолом. В лаборатории выбирали амфипод из проб с использованием микроскопа МБС-9 при увеличении $\times 16$ или $\times 32$.

В подколлекции амфипод Коллекции гидробионтов Мирового океана ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» хранятся следующие виды:

- *Ampelisca sevastopoliensis* Grintsov, 2011 (№ IBSS.bent.567Amph.as. V10);
- *Apothyale crassipes* (Heller, 1866) (№ IBSS.bent.568Amph.ac. V200);
- *Microtopopus* cf. *maculatus* (№ IBSS.bent.569Amph.mm. V20);
- *Monocorophium insidiosum* (Crawford, 1937) (№ IBSS.bent.569Amph.mm. V20);

- *Nototropis massiliensis* (Bellan-Santini, 1975) (№ IBSS.bent.571Amph.nm. V1);
- *Orchestia mediterranea* A. Costa, 1853 (№ IBSS.bent.572Amph.omd. V1);
- *Orchestia montagui* Audouin, 1856 (№ IBSS.bent.573Amph.omt. V3);
- *Pleonexes helleri* (Karaman, 1975) (№ IBSS.bent.575Amph.ph. V5).



Рис. 1. Карта-схема отбора проб

Fig. 1. Map of the sampling

Зарегистрированы следующие виды: *Ampelisca sevastopoliensis* Grintsov, 2011 (семейство Ampeliscidae) (рис. 2А); *Apothyale crassipes* (Heller, 1866) (Hyalidae) (рис. 2В); *Microprotopus* cf. *maculatus* (Microprotopidae) (рис. 2С); *Monocorophium insidiosum* (Crawford, 1937) (Corophiidae) (рис. 2D); *Nototropis massiliensis* (Bellan-Santini, 1975) (Atylidae) (рис. 2Е); *Orchestia mediterranea* A. Costa, 1853 (Talitridae) (рис. 2F); *Orchestia montagui* Audouin, 1856 (Talitridae) (рис. 2G) и *Pleonexes helleri* (Karaman, 1975) (Ampithoidae) (рис. 2H).

Отмечены следующие новые роды: *Apothyale* Bousfield & Hendrycks, 2002; *Monocorophium* Bousfield & Hoover, 1997; *Nototropis* A. Costa, 1853 и *Pleonexes* Spence Bate, 1857. Амфиподы семи видов (исключение — два вида *Orchestia*) представлены как взрослыми особями, так и молодью. Два вида из рода *Orchestia* идентифицированы по взрослым самцам (самки и молодь видов *Orchestia* морфологически схожи). Все таксоны были отмечены ранее для Чёрного моря [Гринцов, 2022, 2023; Grintsov, Sezgin, 2011]. Появление данных видов в Азовском море может быть связано с повышением в нём в последнее время уровня солёности вод [Косенко и др., 2017].

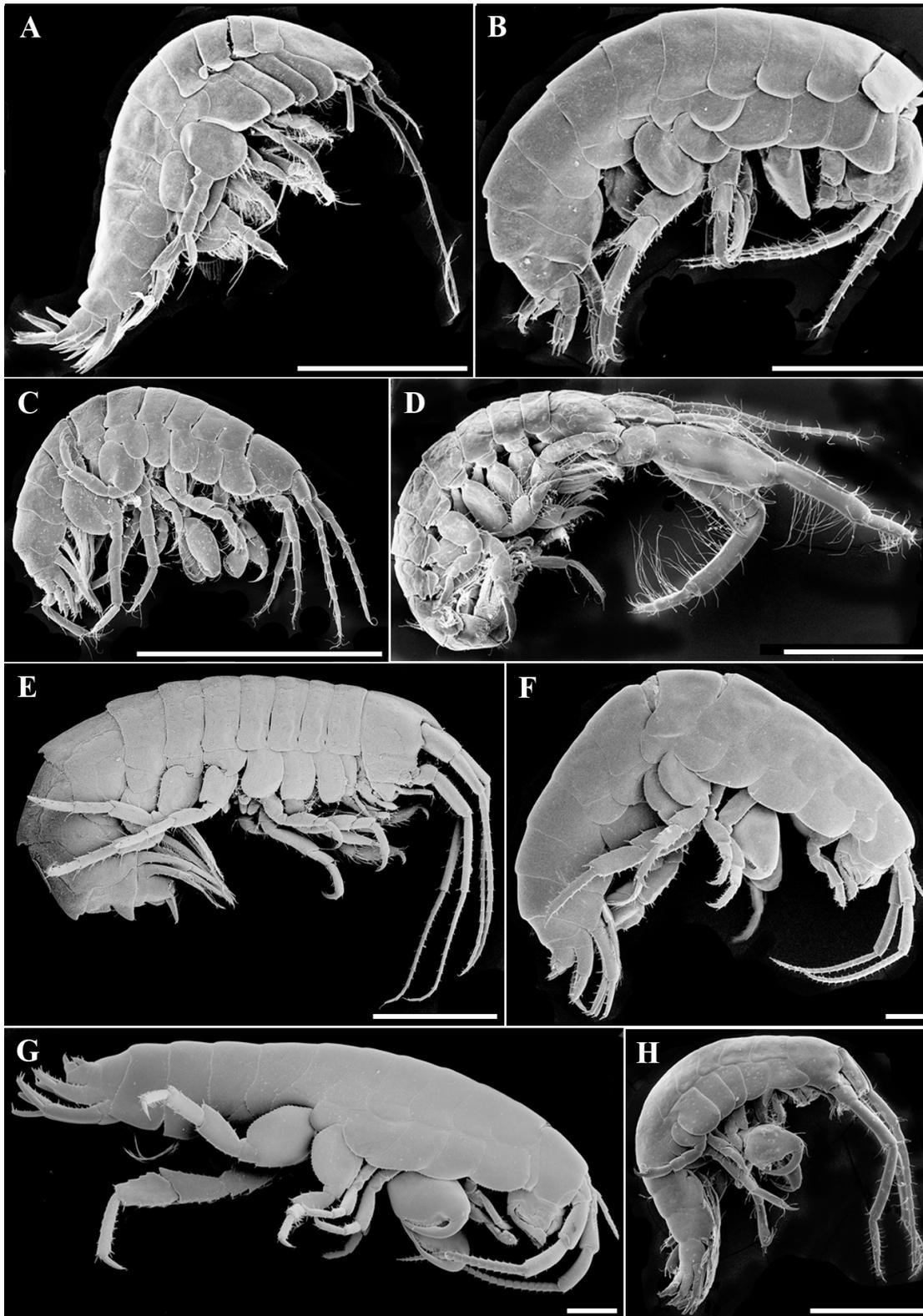


Рис. 2. Внешний вид амфипод, не зарегистрированных ранее в Азовском море: А — *Ampelisca sevastopoliensis*, самка; В — *Apohyale crassipes*, самец; С — *Microprotopus* cf. *maculatus*, самец; D — *Monocorophium insidiosum*, самец; E — *Nototropis massiliensis*, самец; F — *Orchestia mediterranea*, самец; G — *Orchestia montagui*, самец; H — *Pleonexes helleri*, самец. Шкалы — 1 мм

Fig. 2. Habitus of adult Amphipoda specimens not registered in the Sea of Azov earlier: A, *Ampelisca sevastopoliensis*, female; B, *Apohyale crassipes*, male; C, *Microprotopus* cf. *maculatus*, male; D, *Monocorophium insidiosum*, male; E, *Nototropis massiliensis*, male; F, *Orchestia mediterranea*, male; G, *Orchestia montagui*, male; H, *Pleonexes helleri*, male. Scale bars are 1 mm

Все виды амфипод обнаружены в прибрежье Азовского моря в районе мыса Казантип на глубинах от 0 до 1,5 м. Виды рода *Orchestia* найдены в супралиторали в выбросах водорослей и под камнями (бухта Широкая, Казантипский природный заповедник). Немногочисленные особи *A. sevastopoliensis* зарегистрированы на песчаном дне на глубине от 0,2 до 1,5 м в бухте Русская, граничащей с Казантипским заповедником. Многочисленные особи *A. crassipes* отмечены в бухте Широкая в скоплениях оторванных макрофитов. Многочисленные особи *Microprotopus* cf. *maculatus* обнаружены на морских травах вблизи берега на участке бухты Русская, которая граничит с бухтой Голубники, относящейся к мысу Казантип. Там же в массе зарегистрирована *M. insidiosum*. Немногочисленные амфиподы *N. massiliensis* зафиксированы на песчаном дне, а также в скоплениях оторванных макрофитов и в ассоциациях двустворчатых моллюсков в бухте Русская на глубине от 0,5 до 1,5 м. *P. helleri* найдена во всех исследуемых бухтах на макрофитах вблизи берега.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов» (№ гос. регистрации 124022400152-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гринцов В. А. Амфиподы Чёрного моря: иллюстрированный атлас-определитель / ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН». Севастополь : ФИЦ ИнБЮМ, 2022. 476 с. [Grintsov V. A. *Amphipods of the Black Sea: An Illustrated Guide Atlas* / A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS. Sevastopol : IBSS, 2022, 476 p. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/12021>
2. Гринцов В. А. Экологические группы, экоморфы и жизненные формы амфипод (Crustacea, Amphipoda) Чёрного и Азовского морей // *Экосистемы*. 2023. № 33. С. 38–63. [Grintsov V. A. Ecological groups, ecomorphs and life forms of amphipods (Crustacea, Amphipoda) of the Black Sea and the Sea of Azov. *Ekosistemy*, 2023, iss. 33, pp. 38–63. (in Russ.)]
3. Косенко Ю. В., Барабашин Т. О., Баскакова Т. Е. Динамика гидрохимических характеристик Азовского моря в современный период осолонения // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. 2017. № 3-1 (195-1). С. 76–82. [Kosenko Ju. V., Barabashin T. O., Baskakova T. E. Dynamics of hydrochemical characteristics of the Sea of Azov in modern period of salinization. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2017, no. 3-1 (195-1), pp. 76–82. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2017-3-1-76-82>
4. Тимофеев В. А., Бондаренко Л. В. Обнаружение грязевого краба *Dyspanopeus sayi* (S. I. Smith, 1869) (Brachyura: Xanthoidea: Panopeidae) в Азовском море // *Российский журнал биологических инвазий*. 2022. Т. 15, № 4. С. 69–79. [Timofeev V. A., Bondarenko L. V. Discovery of the mud crab *Dyspanopeus sayi* (S. I. Smith, 1869) (Brachyura: Xanthoidea: Panopeidae) in the Sea of Azov. *Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii*, 2022, vol. 15, no. 4, pp. 69–79. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.35885/1996-1499-15-4-69-79>
5. Тимофеев В. А., Симакова У. В., Спиридонов В. А. Первая находка восточной креветки *Palaemon macrodactylus* Rathbun, 1902 (Crustacea: Decapoda, Palaemonidae) в территориальных водах России в Черноморско-Азовском бассейне // *Российский журнал биологических инвазий*. 2019. Т. 12, № 1. С. 110–119. [Timofeev V. A., Simakova U. V., Spiridonov V. A. The first finding of the oriental shrimp *Palaemon macrodactylus* Rathbun, 1902 (Crustacea: Decapoda, Palaemonidae) in the territorial waters of Russia in the Azov–Black Sea Basin. *Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 110–119. (in Russ.)]
6. Grintsov V., Sezgin M. *Manual for Identification of Amphipoda from the Black Sea*. Sevastopol : DigitPrint, 2011, 151 p. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1472>

THE FIRST FINDINGS OF NEW SPECIES OF AMPHIPODS IN THE SEA OF AZOV

V. Grintsov

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

In 2022–2023, 8 species and 4 genera of Amphipoda new to the Sea of Azov were found near the Cape Kazantip (the Crimea; Golubniki, Russkaya, and Shirokaya bays). All specimens are stored in IBSS Collection of Hydrobionts of the World Ocean. The following species were recorded: *Ampelisca sevastopoliensis* Grintsov, 2011 (the family Ampeliscidae); *Apohyale crassipes* (Heller, 1866) (Hyalidae); *Microprotopus* cf. *maculatus* (Microprotopidae); *Monocorophium insidiosum* (Crawford, 1937) (Corophiidae); *Nototropis massiliensis* (Bellan-Santini, 1975) (Atylidae); *Orchestia mediterranea* A. Costa, 1853 (Talitridae); *Orchestia montagui* Audouin, 1856 (Talitridae); and *Pleonexes helleri* (Karaman, 1975) (Ampithoidae). New genera were registered: *Apohyale* Bousfield & Hendrycks, 2002; *Monocorophium* Bousfield & Hoover, 1997; *Nototropis* A. Costa, 1853; and *Pleonexes* Spence Bate, 1857. Seven species were represented by adult males and females, as well as juveniles. Two *Orchestia* species were identified by adult males. Individuals of species new to the Sea of Azov were found in the coastal zone in the following biotopes: supralittoral, macrophytes on the beach (*O. mediterranea* and *O. montagui*); detached macrophytes off the coast (*A. crassipes*); sand on the bottom at a depth of 0.2–1.5 m (*A. sevastopoliensis* and *N. massiliensis*); seagrass beds (*M. insidiosum* and *Microprotopus* cf. *maculatus*); and attached macrophytes on the bottom at a depth of 0.2–1.0 m (*P. helleri*). The occurrence of these species in the Sea of Azov may be associated with an increase in the salinity of its waters.

Keywords: Amphipoda, the first findings, Sea of Azov

УДК 595.142.241(262.54)

**О НАХОЖДЕНИИ
POLYDORA WEBSTERI HARTMAN IN LOOSANOFF & ENGLE, 1943
(ANNELIDA: SPIONIDAE)
В АЗОВСКОМ МОРЕ**

© 2024 г. **Е. В. Лисицкая, М. А. Попов, Н. С. Челядина**
ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Российская Федерация
E-mail: e.lisitskaya@gmail.com

Поступила в редакцию 22.01.2024; после доработки 26.03.2024;
принята к публикации 27.08.2024; опубликована онлайн 09.09.2024.

Исследование проводили в 2023–2024 гг. в районе полуострова Казантип, Азовское море. Впервые в раковинах мидии *Mytilus galloprovincialis* обнаружены заполненные детритом блистеры, которые занимали от $\frac{1}{5}$ до $\frac{1}{3}$ площади створок. В блистерах находились полихеты-перфораторы. Полихеты идентифицированы как *Polydora websteri* Hartman in Loosanoff & Engle, 1943 (Annelida: Spionidae). Полученные данные необходимо учитывать при планировании и организации мидийных ферм в этом регионе.

Ключевые слова: Polychaeta, инвазивные виды, *Mytilus galloprovincialis*, марикультура

Азовское море — перспективная акватория для развития аквакультуры. Ещё в середине XX в. было рекомендовано выращивание двустворчатого моллюска — мидии *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 — на мидийных фермах в Северном Приазовье [Спичак, 1979]. Потенциально промысловым видом стал и двустворчатый моллюск *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906), который вселился в Азовское море и образовал там плотные поселения [Syomin et al., 2021]. При выборе районов для размещения марихозяйств необходимы данные о биологии и экологии моллюсков в природных условиях. Изучая морфофизиологические характеристики перечисленных выше моллюсков, в створках *M. galloprovincialis* мы обнаружили заполненные чёрным детритом полости — блистеры, в которых находились многощетинковые черви. Цель настоящей работы — идентифицировать полихет, найденных в створках мидии *M. galloprovincialis* из Азовского моря.

Исследования проводили с июня 2023 г. по январь 2024 г. в районе полуострова Казантип, Азовское море (рис. 1). Двустворчатых моллюсков собирали в следующих бухтах: Русская (45°26'58"N, 35°49'29"E, глубина 0,1 м, песчано-илистый грунт), Голубники (45°27'14"N, 35°49'6"E, глубина 1,5 м, прибрежные скалы) и Широкая (45°28'19"N, 35°51'8"E, глубина 0,5 м, каменисто-песчаный грунт).

Для определения солёности использовали солемер OHAUS Starter ST20S. Значение в бухтах составляло 12,9 ‰. Ежемесячно в бухтах отбирали по 30 экз. моллюсков каждого вида. Их измеряли с помощью штангенциркуля с точностью до 0,1 мм и вскрывали при помощи скальпеля. Содержимое блистеров просматривали под биноклем МБС-10. Обнаруженных в блистерах полихет извлекали и переносили в чашки Петри с морской водой для дальнейшей идентификации. Фотографии выполнены камерой Sony Cyber-shot.



Рис. 1. Схема района исследований
Fig. 1. Map of the study area

Блистеры на внутренней стороне створок зарегистрированы у мидий, собранных в сентябре и декабре 2023 г. в бухте Русская. Из 30 обследованных особей были поражены 2, что составило 7 % выборки. В бухте Голубники в ноябре блистеры обнаружены у 8 экз., что составило 27 % выборки. Размеры поражённых мидий были следующими: длина раковины — $(57,7 \pm 2,9)$ мм; высота — $(30,1 \pm 1,6)$ мм; ширина — $(22,0 \pm 1,4)$ мм. Блистеры занимали от $\frac{1}{5}$ до $\frac{1}{3}$ поверхности створки (рис. 2А). В бухте Широкая поражённых мидий не встречали. В раковинах *A. kagoshimensis* блистеры не отмечены.

В створках мидий из бухты Русская внутри блистеров обнаружено по одной живой полихете. Блистеры у мидий из бухты Голубники были заполнены чёрным детритом с запахом сероводорода, извлечённые фрагменты червей были мацерированы, только из одного блистера удалось изъять 2 живые полихеты. Всего извлечено 6 экз. червей. Живые полихеты были жёлтыми, с просвечивающимися красными кровеносными сосудами (рис. 2В). Длина тела составляла 20–25 мм, количество сегментов — 80–90.

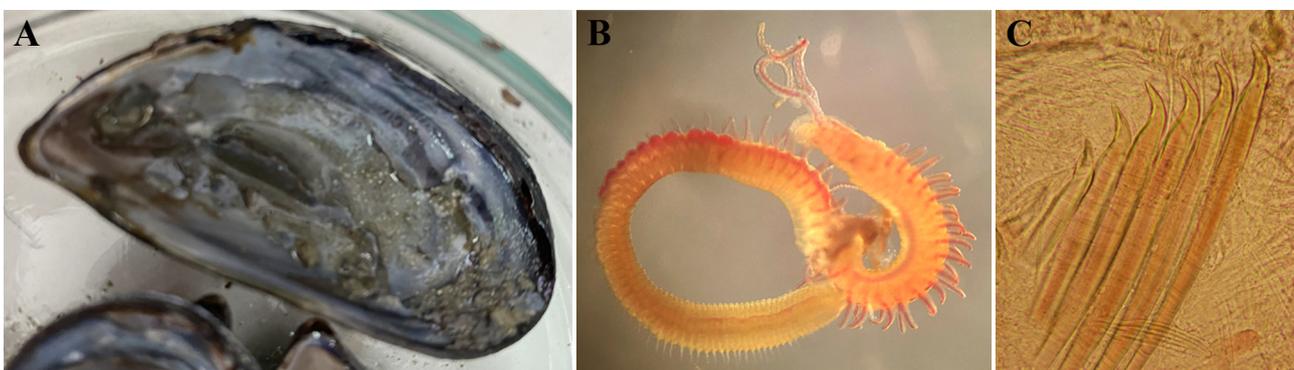


Рис. 2. *Polydora websteri*: А — створка мидии с блистером; В — извлечённая из блистера полидора; С — специализированные щетинки V сегмента

Fig. 2. *Polydora websteri*: A, a mussel shell with a blister; B, *Polydora* from a blister; C, chaetae of chaetiger V

Червь максимального размера имел 97 сегментов, достигал 28 мм в длину и 0,6 мм в ширину. Простомииум с небольшим вырезом спереди. Карункул до середины III сегмента, затылочной папиллы нет. Глаз 2 пары, чёрного цвета. Пальпы длинные (примерно до 10–12 сегментов), прозрачные, с 2 чёрными продольными пигментными полосками вдоль желобка. На I сегменте нотоподиальные щетинки отсутствуют, в невроподиях 3–4 простые щетинки. С II по IV сегмент в спинных и брюшных ветвях параподий только волосовидные щетинки. На V сегменте крупные специализированные спинные щетинки (6–7), без бокового зубчика; у некоторых экземпляров хорошо заметен гребень, сопутствующие щетинки ланцетовидные (рис. 2С). Брюшные щетинки волосовидные. В невроподиях с VII сегмента появляются капюшонированные двузубые крючковидные щетинки (5–9), в нотоподиях — только волосовидные щетинки. Жабры начинаются с VII сегмента, на последних 24–32 сегментах отсутствуют. Пигидий небольшой, в виде округлой анальной присоски с выемкой на дорзальной стороне. По морфологическим признакам извлечённые из блистеров полихеты соответствовали описаниям *Polydora websteri* Hartman in Loosanoff & Engle, 1943 [Radashevsky, 1999; Read, 2010; Surugiu et al., 2012], а также были аналогичны полидорам, обнаруженным ранее в Чёрном море и в Керченском проливе [Лисицкая и др., 2010; Syomin et al., 2021]. Полученный материал депонирован в Коллекции гидробионтов Мирового океана ФИЦ ИнБЮМ (IBSS.bent.: 1Ann.aa.v1; 2Ann.aa.v2; 3Ann.aa.v3).

P. websteri — широко распространённый в Мировом океане вид. Эта полидора перфорирует известковые субстраты, а также раковины брюхоногих и двустворчатых моллюсков и является одним из основных вредителей выращиваемых на морских фермах моллюсков [Read, 2010]. В Чёрном море *P. websteri* впервые обнаружена в 2005 г. в камнях у побережья Румынии [Surugiu, 2005]. В последующие годы полихета широко расселилась в северной части Чёрного моря; черви были найдены в створках культивируемых устриц *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793), в раковинах моллюска-вселенца *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846), а также в известняках у берегов Крыма [Бондарев, Болтачева, 2021; Лисицкая и др., 2010; Boltachova et al., 2021; Surugiu et al., 2012]. В Чёрном море *P. websteri* на раковинах мидий не встречали. В Азовском море этот вид ранее зарегистрирован не был [Киселева, 2004]. В 2020 г. полидоры-перфораторы *P. websteri* обнаружены в Керченском проливе на двустворчатом моллюске — вселенце *A. kagoshimensis* [Syomin et al., 2021].

Расширение границ ареалов как нативных видов, так и видов-вселенцев вызвано, вероятно, повышением солёности в Азовском море до 14,83 ‰ [Бердников и др., 2022]. Полагают, что последовавшее за осолонением массовое развитие анадары в Азовском море способствовало распространению полидоры-перфоратора [Syomin et al., 2021]. Известно, что для оседания личинкам полидор необходим известковый субстрат. В Азовском море каменистые грунты встречаются редко, а нативные виды моллюсков имеют тонкостенные раковины. Возможно, из-за недостатка субстрата личинки *P. websteri* могут оседать не только на более плотные раковины анадары, но и на раковины мидий.

Таким образом, полученные нами результаты показывают, что многощетинковый червь *Polydora websteri* распространился в Азовском море. Данный факт необходимо учитывать при планировании и организации мидийных ферм в этом регионе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов» (№ гос. регистрации 124022400152-1).

Благодарность. Авторы выражают благодарность к. б. н. В. А. Тимофееву (ФИЦ ИнБЮМ) за помощь в сборе материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бердников С. В., Дашкевич Л. В., Кулыгин В. В. Новое состояние гидрологического режима Азовского моря в XXI веке // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2022. Т. 503, № 1. С. 65–70. [Berdnikov S. V., Dashkevich L. V., Kulygin V. V. A new state in the hydrological regime of the Sea of Azov in the 21st century. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*, 2022, vol. 503, no. 1, pp. 65–70. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S2686739722030057>
2. Бондарев И. П., Болтачева Н. А. Консорты брюхоногого моллюска *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) в северной части Чёрного моря. Часть V: Annelida (Polychaeta) // *Морской биологический журнал*. 2021. Т. 6, № 2. С. 18–32. [Bondarev I. P., Boltachova N. A. Consorts of gastropod *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) in the northern Black Sea. Part V: Annelida (Polychaeta). *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2021, vol. 6, no. 2, pp. 18–32. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2021.06.2.02>
3. Киселева М. И. Многощетинковые черви (Polychaeta) Чёрного и Азовского морей. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2004. 409 с. [Kiseleva M. I. *Mnogoshchetinkovye chervi (Polychaeta) Chernogo i Azovskogo morei*. Apatity : Izd-vo KNTs RAN, 2004, 409 p. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/5647>
4. Лисицкая Е. В., Болтачева Н. А., Лебедовская М. В. Новый для фауны Украины вид *Polydora websteri* Hartman, 1943 (Polychaeta: Spionidae) из прибрежных вод Крыма (Чёрное море) // *Морской экологический журнал*. 2010. Т. 9, № 2. С. 74–80. [Lisitskaya E. V., Boltachova N. A., Lebedovskaya M. V. New Ukrainian fauna species *Polydora websteri* (Hartman, 1943) (Polychaeta: Spionidae) from the coastal waters of Crimea (Black Sea). *Morskoy ekologicheskij zhurnal*, 2010, vol. 9, no. 2, pp. 74–80. (in Russ.)]. <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/1073>
5. Спичак С. К. Мидия как объект аквакультуры в северной части Азовского моря // *Труды ВНИРО*. 1979. Т. 138. С. 116–119. [Spichak S. K. Mussel as an item for mariculture in the North Azov Sea. *Trudy VNIRO*, 1979, vol. 138, pp. 116–119. (in Russ.)]
6. Boltachova N. A., Lisitskaya E. V., Podzorova D. V. Distribution of alien polychaetes in biotopes of the northern part of the Black Sea. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 11–26. <https://doi.org/10.1134/S2075111721010033>
7. Radashevsky V. I. Description of the proposed lectotype for *Polydora websteri* Hartman in Loosanoff & Engle, 1943 (Polychaeta: Spionidae). *Ophelia*, 1999, vol. 51, iss. 2, pp. 107–113. <http://doi.org/10.1080/00785326.1999.10409402>
8. Read G. B. Comparison and history of *Polydora websteri* and *P. haswelli* (Polychaeta: Spionidae) as mud-blister worms in New Zealand shellfish. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 2010, vol. 44, iss. 2, pp. 83–100. <http://doi.org/10.1080/00288330.2010.482969>
9. Syomin V. L., Kolyuchkina G. A., Ptushkin M. D., Timofeev V. A., Simakova U. V. *Polydora websteri*—A commensal of *Anadara kagoshimensis* in the Azov–Black Sea Region. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2021, vol. 12, iss. 3, pp. 309–316. <https://doi.org/10.1134/S2075111721030139>
10. Surugiu V. Inventory of inshore polychaetes from the Romanian coast (Black Sea). *Mediterranean Marine Science*, 2005, vol. 6, no. 1, pp. 51–74. <https://doi.org/10.12681/mms.193>
11. Surugiu V. Systematics and ecology of species of the *Polydora*-complex (Polychaeta: Spionidae) of the Black Sea. *Zootaxa*, 2012, vol. 3518, pp. 45–65.

**ABOUT FINDING
POLYDORA WEBSTERI HARTMAN IN LOOSANOFF & ENGLE, 1943
(ANNELIDA: SPIONIDAE)
IN THE SEA OF AZOV**

E. Lisitskaya, M. Popov, and N. Chelyadina

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: e.lisitskaya@gmail.com

The research was carried out in 2023–2024 near the Kazantip Peninsula (the Sea of Azov). In this area, blisters were found in the shells of the mussel *Mytilus galloprovincialis* for the first time. The blisters occupied $\frac{1}{5}$ to $\frac{1}{3}$ of the shells area. The blisters contained boring polychaetes. Polychaetes were identified as *Polydora websteri* Hartman in Loosanoff & Engle, 1943 (Annelida: Spionidae). The results obtained must be taken into account when planning and organizing mussel farms in this area.

Keywords: Polychaeta, invasive species, *Mytilus galloprovincialis*, mariculture

РЕЦЕНЗИИ

ОБЗОР СТАТЬИ *CYSTOSEIRA* PHYTOCENOSIS AS A BIOLOGICAL BARRIER FOR HEAVY METALS AND ORGANOCHLORINE COMPOUNDS IN THE SPNA CAPE MARTYAN MARINE AREA (THE BLACK SEA)

Статья В. Н. Егорова и соавторов «Фитоценоз *Cystoseira* как биологический барьер для тяжёлых металлов и хлорорганических соединений в морском районе ООПТ «Мыс Мартьян» (Чёрное море)», опубликованная в престижном журнале *Regional Studies in Marine Science*, посвящена роду *Cystoseira* и одному из его многочисленных экологических сообществ [Egorov et al., 2021]. *Cystoseira*, бурые водоросли порядка *Fucales*, включают фукоиды, содержат антерозоиды без стигматов, небольшие количества антеридиальных ветвей, трихоталлические волоски на концептакулах, крупные яйцевидные оосферы и яйца, которые прикреплены к поверхности розеток через муцилагиновые стебли до момента оплодотворения [Cystoseira, 2024].

Виды рода *Cystoseira*, в соответствии с современными представлениями, встречаются в Средиземном и Чёрном морях и в Северо-Восточной Атлантике. Виды из Индийского и Тихого океана в настоящее время относятся к различным родам. Представители *Cystoseira* являются важными средообразующими видами в прибрежных водах Средиземного моря и Северо-Восточной Атлантики. Для них требуется вода хорошего качества, и их можно использовать в качестве биоиндикаторов уровня загрязнения.

Помимо *Cystoseira barbata** и *Cystoseira bosphorica**, которые указаны для Чёрного моря, в [Cystoseira, 2024] приведены ещё 19 видов. Многие из них плохо изучены, и необходима их валидация. *C. barbata* и *C. bosphorica* образуют значительные популяции вдоль румынского побережья Чёрного моря в южном секторе между Констанцей и Вама-Вече, с твёрдым субстратом и каменистым дном, доминирующие в супра-, средне- и инфралиторальной зонах [Black Sea Biological Diversity, 1997; Exotic Species, 2001]. Их биомасса значительно (до 80 %) сократилась после сильных морозов зимой 1970–1971 гг. [Bologa et al., 1996]. Сейчас они, по-видимому, находятся в процессе восстановления.

Цель исследования [Egorov et al., 2021] — оценка роли фитоценоза *Cystoseira* как биологического барьера в очистке морской воды в особо охраняемой природной территории (далее — ООПТ) «Мыс Мартьян» от загрязнения тяжёлыми металлами (V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Hg, Mo, Ag, Cd, Sb и Pb) и хлорорганическими соединениями (ДДТ, ДДЕ, ДДД, ΣДДТ, ПХБ 28, ПХБ 52, ПХБ 101, ПХБ 138, ПХБ 153 и ПХБ 180).

Во «Введении» приведено описание мыса Мартьян. В «Материале и методах» представлены данные гидробиотических наблюдений, методы анализа загрязняющих веществ и концепция потоков. Приведены результаты гидробиотических исследований, а также сведения о потоках загрязняющих веществ — тяжёлых металлов и хлорорганических соединений (далее — ТМ и ХОС соответственно).

*Примечание научного редактора:

1. *Cystoseira barbata* — unaccepted; синоним — *Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze, 1891.
2. *Cystoseira bosphorica* — unaccepted; синоним — *Ericaria bosphorica* (Sauvageau) D. Serio & G. Furnari, 2021.

В результате исследования получены следующие основные выводы:

1. Определены параметры биотопа *Cystoseira* в морской зоне ООПТ «Мыс Мартьян»: площадь — 309 000 м²; запасы водорослей — 1425,6 т; продукция — 3136,3 т в год.
2. Для большинства изученных микроэлементов (Co, Cu, Zn, Pb, Sb, Mo, Cd, Ag, Ni, V и Hg) концентрации в акватории ООПТ «Мыс Мартьян» не достигли международных референтных значений, установленных как для острых, так и для хронических воздействий. Это в целом свидетельствовало о благоприятной экологической обстановке в акватории относительно её загрязнения ТМ.
3. Отложения 9÷99 % ТМ и 55÷96 % ХОС в биотопе *Cystoseira* обусловлены её высокой удельной биомассой (4,6 кг·м⁻²) и способностью концентрировать загрязняющие вещества, характеризующиеся коэффициентами накопления в диапазоне от $n \times 10^2$ до $n \times 10^5$ для ТМ и от $n \times 10^2$ до $n \times 10^3$ для ХОС.
4. Локализация фитоценозов *Cystoseira* в рекреационных зонах является важнейшим биологическим фактором самоочищения морской воды от ТМ и ХОС. В результате продукционных процессов в фитоценозе *Cystoseira* в морской зоне ООПТ «Мыс Мартьян» извлечение ТМ составляет 0,1÷967,6 кг·год⁻¹, а ХОС — 0,044÷8,360 г·год⁻¹. Кругооборот ТМ и ХОС в биотопе варьирует в основном от суточного до сезонного.
5. Предложено уравнение для оценки максимальной способности фитоценоза *Cystoseira* к очистке воды от ТМ и ХОС. Сохранение фитоценозов *Cystoseira* в прибрежных водах и меры по увеличению их запасов и продуктивности являются одними из оптимальных механизмов качественного управления рекреационными зонами с учётом фактора загрязнения морской среды.

Работу завершают 54 библиографические ссылки, 19 из них относятся к Чёрному морю. Можно было бы добавить и некоторые другие источники, например Celan M. Notes sur la flore algologique du littoral roumain de la mer Noire. I. Sur les *Cystoseira*. *Bulletin de la Section Scientifique de l'Académie Roumaine*, 1935, vol. 17, pp. 81–94.

Таким образом, публикация доктора биологических наук В. Н. Егорова и его коллег — ценный научный вклад в изучение макрофитобентоса Чёрного моря, основанный на оригинальном подходе, новой концепции и методике. Это ещё раз подтверждает экологическую значимость сообщества *Cystoseira* в морской бентосной экосистеме.

А. Ш. Болога,

Академия румынских учёных, отделение биологических наук,
Бухарест/Констанца, Румыния

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Black Sea Biological Diversity : Romania* / A. Petranu (Comp.). New York : United Nations Publ., 1997, 314 p. (Black Sea Environmental Series ; vol. 4).
2. Bologa A. S., Bodeanu N., Petranu A., Țigănuș V., Zaitsev Yu. P. Major modifications of the Black Sea benthic and planktonic biota in the last three decades. In: *Les mers tributaires de Méditerranée* / F. Briand (Éd.). Monaco : Musée océanographique, 1995, pp. 85–110. (Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco, n° special 15 ; CIESM, Science Series no. 1).
3. *Cystoseira*. In: *Wikipedia. The Free Encyclopedia* : [site]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cystoseira> [accessed: 20.05.2024].
4. Egorov V. N., Gorbunov R. V., Plugatar Yu. V., Malakhova L. V., Sadogurskiy S. E., Artemov Yu. G., Proskurnin V. Yu.,

Mirzoyeva N. Yu., Marchenko Yu. G., Belich T. V., Sadogurskaya S. A. *Cystoseira* phytocenosis as a biological barrier for heavy metals and organochlorine compounds in the SPNA Cape Martyan marine area (the Black Sea). *Regional Studies in Marine*

Science, 2021, vol. 41, art. no. 101572 (10 p.).
<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101572>

5. *Exotic Species in the Aegean, Marmara, Black, Azov and Caspian Seas* / Yu. P. Zaitsev, B. Öztürk (Eds). Istanbul : Turkish Marine Research Foundation, 2001, 267 p.

**CYTOSEIRA PHYTOCENOSIS AS A BIOLOGICAL BARRIER
FOR HEAVY METALS AND ORGANOCHLORINE COMPOUNDS
IN THE SPNA CAPE MARTYAN MARINE AREA (THE BLACK SEA):
REVIEW OF THE ARTICLE**

The article by the Academician of the Russian Academy of Sciences V. Egorov *et al.* is reviewed. The paper provides the results of the study of the role *Cystoseira* species play as a biological barrier for the flow of pollutants, heavy metals and organochlorine compounds, in waters of the specially protected natural area “Cape Martyan.”

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 № 7 от 27.08.2024).

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. Рябушко В. И.

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).



Уч.-изд. листов 9,3
Усл. печ. листов 13,95

Подп. к печати 27.08.2024
Дата выхода в свет 09.09.2024

Тираж 100 экз.
Формат 60 × 84/8

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*

*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*

- 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.

- 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.