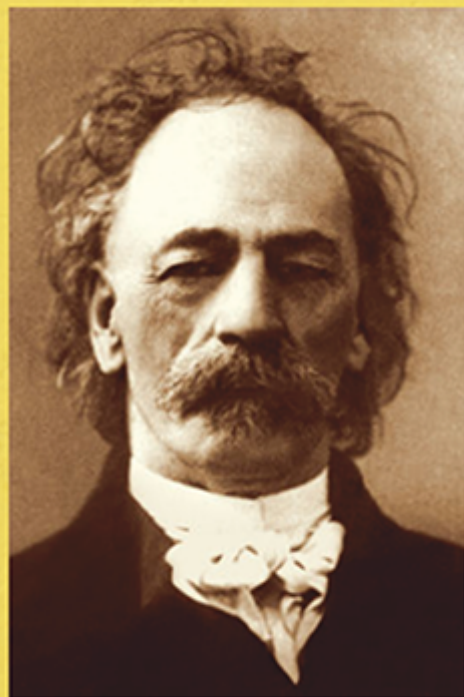


ISSN 2712-9586



**ТРУДЫ
КАРАДАГСКОЙ
НАУЧНОЙ СТАНЦИИ
им. Т.И. ВЯЗЕМСКОГО –
ПРИРОДНОГО
ЗАПОВЕДНИКА РАН**

Выпуск 3(23)

2022



ТРУДЫ КАРАДАГСКОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ им. Т.И. ВЯЗЕМСКОГО – ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА РАН

включён в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Российской Федерации.

*Журнал реферируется Всероссийским институтом научно-технической информации (ВИНИТИ),
а также Российским индексом научного цитирования (РИНЦ) на базе Научной электронной библиотеки elibrary.ru.*

Все материалы проходят двойное независимое анонимное рецензирование.

Главный редактор: Р. В. Горбунов, канд. геогр. наук, ФИЦ ИнБЮМ
Заместитель главного редактора: В. И. Мальцев, канд. биол. наук, ФИЦ ИнБЮМ
Технический редактор: О. А. Миронюк, ФИЦ ИнБЮМ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

П. Н. Баранов, д-р геол.-минерал. наук, д-р геол. наук, ФГБОУ ВО «КГМТУ»
М. М. Бескаравайный, канд. биол. наук, ФИЦ ИнБЮМ
В. А. Боков, д-р геогр. наук, ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского»
Ю. И. Будашкин, канд. биол. наук, ФИЦ ИнБЮМ
Б. А. Вахрушев, д-р геогр. наук, ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского»
Ю. В. Глибин, Карадагская научно-исследовательская геофизическая обсерватория ФГБУ «Крымское УГМС»
Н. А. Давидович, д-р биол. наук, ФИЦ ИнБЮМ
А. В. Ена, д-р биол. наук, ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского»
Е. И. Ергина, д-р геогр. наук, ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского»
С. П. Иванов, д-р биол. наук, ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского»
В. В. Майко, д-р ист. наук, Институт археологии Крыма РАН
В. А. Миноранский, д-р с.-х. наук, ЮФУ
Е. Л. Неврова, д-р биол. наук, ФИЦ ИнБЮМ
Э. Б. Петрова, д-р ист. наук, ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского»
Ю. В. Плугатарь, чл.-корр. РАН, д-р с.-х. наук, НБС-ННЦ
Е. А. Позаченюк, д-р геогр. наук, ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского»
М. А. Поляков, канд. биол. наук, ФИЦ ИнБЮМ
В. В. Рожнов, академик РАН, д-р биол. наук, ИПЭЭ РАН
А. А. Родионов, канд. ист. наук, МБУК Феодосийский музей древностей
И. И. Руднева, д-р биол. наук, ФИЦ ИнБЮМ
Ю. А. Силкин, канд. биол. наук, ФИЦ ИнБЮМ
Т. Н. Смекалова, д-р ист. наук, ФГАОУ ВО «КФУ им В.И. Вернадского»
А. А. Солдатов, д-р биол. наук, ФИЦ ИнБЮМ
А. В. Фатерыга, канд. биол. наук, ФИЦ ИнБЮМ
В. В. Фатерыга, канд. биол. наук, ФИЦ ИнБЮМ
И. В. Флоринский, д-р техн. наук, ФИЦ ИнБЮМ
А. Л. Чепалыга, д-р геогр. наук, Институт географии РАН

Адрес учредителя, издателя и редакции

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»
299011, г. Севастополь, пр-кт Нахимова, д. 2.
Телефон +7 (8692) 54-41-10
E-mail: karadag.trudy@yandex.ru
Сайт журнала: <https://eco-ibss.ru>

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ имени А.О. КОВАЛЕВСКОГО РАН»
КАРАДАГСКАЯ НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ им. Т.И.ВЯЗЕМСКОГО – ПРИРОДНЫЙ ЗАПОВЕДНИК РАН

ТРУДЫ КАРАДАГСКОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ им. Т.И. ВЯЗЕМСКОГО – ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА РАН

Выпуск 3(23)

2022

Основан в мае 2016 г.

Научный журнал

Выходит 4 раза в год

СОДЕРЖАНИЕ

Изучение биоразнообразия и экологический мониторинг

Грицов В. А. Новые данные о морфологии амфиподы *Microtopopus cf. maculatus* (Microtopodidae, Amphipoda) из Чёрного моря (Севастополь, Крым) 3–12

Крашенинникова С. Б., Бабич С. А. Пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* с учётом гидрологических, гидрохимических и гидрооптических условий Чёрного моря весной 2021 г. 13–22

Экспериментальная гидробиология

Андреева А. Ю., Кладченко Е. С., Кухарева Т. А., Рычкова В. Н. Функциональные параметры гемолимфы двусторчатого моллюска анадары Броутона (*Anadara broughtonii*) в условиях воздействия гипоксии 23–32

Березина Н. А., Шаров А. Н., Максимов А. А., Холодkevич С. В. Тестирование донных отложений Финского залива по выживаемости амфипод и кардиоактивности моллюсков-унионид 33–44

Географические, геологические и палеонтологические исследования

Панкеева Т. В., Миронова Н. В., Пархоменко А. В. Ландшафтные исследования памятника природы «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Фиолент» 45–60

Журавлева О. В., Каранин А. В., Сухова М. Г. Антропогенная трансформация ландшафтов (на примере Республики Алтай) 61–68

Federal State Budget Scientific Institution
Federal Research Center
«A.O. KOVALEVSKY INSTITUTE OF BIOLOGY OF THE SOUTHERN SEAS OF RAS»
T.I. VYAZEMSKY KARADAG SCIENTIFIC STATION – NATURE RESERVE OF THE RAS

PROCEEDINGS OF T.I. VYAZEMSKY KARADAG SCIENTIFIC STATION – NATURE RESERVE OF THE RAS

Issue 3(23)

2022

Established in May 2016

Periodical

Issued 4 times a year

CONTENT

Study of biodiversity and environmental monitoring

Grintsov V. A. New data by morphology of Amphipoda of *Microprotopus cf. maculatus* (Microprotopidae, Amphipoda) from the Black Sea (Sevastopol, Crimea) 3–12

Krashennikova S. B., Babich S. A. Spatial distribution of chlorophyll-a concentration in hydrological, hydrochemical and hydroptical conditions of the Black sea in spring 2021 13–22

Experimental hydrobiology

Andreyeva A. Yu., Kladchenko E. S., Kukhareva T. A., Rychkova V. N. Functional parameters of the bivalve mollusk ark shell (*Anadara broughtonii*) hemolymph under exposure to hypoxia 23–32

Berezina N. A., Sharov A. N., Maximov A. A., Kholodkevich S. V. Testing of bottom sediments from the gulf of Finland using amphipod survival and cardiacity of unionid molluscs 33–44

Geographic, geological and paleontological studies

Pankeeva T. V., Mironova N. V., Parkhomenko A. V. Landscape investigations of the natural monument «Coastal aquatic complex at the cape Fiolent» 45–60

Zhuravleva O. V., Karanin A. V., Sukhova M. G. Anthropogenic transformation of landscape (by the example of the Republic of Altai) 61–68

ИЗУЧЕНИЕ БИОРАЗНООБРАЗИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

УДК 595.371.15-14(262.5)

DOI: [10.21072/eo.2022.23.01](https://doi.org/10.21072/eo.2022.23.01)

НОВЫЕ ДАННЫЕ О МОРФОЛОГИИ АМФИПОДЫ *MICROPROTOPUS* CF. *MACULATUS* (MICROPROTOPIDAE, AMPHIPODA) ИЗ ЧЁРНОГО МОРЯ (СЕВАСТОПОЛЬ, КРЫМ) *

Гринцов В. А.

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

Аннотация: В акватории Чёрного моря достоверно известен вид из рода *Microprotopus* Norman, 1867 — *M. longimanus* Chevreux, 1887. Статус вида *M. minutus* Sowinsky, 1894 остаётся неясным и сведён в настоящее время предположительно к синониму вида *M. longimanus*. Вид *M. maculatus* Norman, 1867 в работе [Гринцов, Загородняя, 2008] приведён без иллюстраций и анализа морфологии и нуждается в уточнении. В настоящей работе приводится подробный анализ морфологии и иллюстраций особей из рода *Microprotopus* (иллюстрации получены с помощью сканирующего электронного микроскопа), даётся сравнительный анализ обнаруженных особей и представителей вида *M. maculatus*. По результатам исследований статус найденных особей обозначен как *M. cf. maculatus*.

Ключевые слова: амфиподы, Чёрное море, *Microprotopus cf. maculatus*, морфология, сравнительный анализ с видами рода *Microprotopus*.

Введение

В настоящее время в Мировом океане известно 5 видов из рода *Microprotopus* семейства Microprotopidae отряда Amphipoda [Myers, Lowry, 2003]. Это виды: *M. bicuspidatus* Rabindranath, 1971 (Индийский океан, регион Индии [Rabindranath, 1971]); *M. longimanus* Chevreux, 1887 (Английский канал [Dauvin, 1999], северная часть Атлантического океана [Bellan-Santini, Costello, 2001], Средиземное море [Myers, 1989], Чёрное море [Грезе, 1985]); *M. maculatus* Norman, 1867 (Средиземное море [Myers, 1989], Бискайский залив [Bachelet, Dauvin, Sorbe, 2003], Нидерланды [Faasse, Van Moorsel, 2000], Великобритания [Introduction and protozoans ... , 1990]); *M. raneyi* Wigley, 1966 (северная часть Атлантического океана, США [Wigley, 1966]) и *M. shoemakeri* Lowry, 1972 (Атлантический океан, Флорида, США [Lowry, 1972]).

Из них в Чёрном море достоверно известен вид *M. longimanus* [Грезе, 1985]. Таксономическое положение второго вида — *M. minutus* в настоящее время неясно, предположительно данный вид является синонимом *M. longimanus* [<http://www.marinespecies.org>]. Наличие в Чёрном море третьего вида — *M. maculatus* нуждается в уточнении. Представители вида, близкого к *M. maculatus*, были зарегистрированы в большом количестве в заповеднике «Лебяжий острова» и в районе Севастополя (более 600 экз., взрослые самцы и самки с яйцами, молодь), что свидетельствует об успешном освоении среды обитания в акватории Крыма данным видом. На основе этого материала подробно исследовано морфологическое строение взрослых самцов и самок, что позволило сравнить данных особей с наиболее близким видом — *M. maculatus* и другими видами этого рода.

* Исследование выполнено в рамках темы госзадания «Исследование механизмов управления производственными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (№ гос. регистрации 121030300149-0).

Материал и методы

Пробы макрофитов отбирали с глубины 0,5 м в прибрежье заповедника «Лебяжьего острова» в августе 2005 г. Макрофиты выдерживали в пресной воде 10 минут и встряхиванием отделяли амфипод. Получившийся смыв процеживали через мельничное сито с размером ячеек 0,3 мм, а затем помещали в ёмкость с 80%-ным раствором этанола. Особей из рода *Microtopopus* отбирали из смыва и помещали в ёмкость с 75%-ным раствором этанола. В районе внешнего рейда Севастопольской бухты отбирали пробы песка с глубины 3 и 6 м в августе 2018 г. Особей из рода *Microtopopus* выбирали из песка и помещали в пузырёк с 96%-ным раствором этанола.

В лаборатории особи были исследованы с использованием светового биологического микроскопа МБС-9 и микроскопа «Микмед-5». Измерения проводили с использованием окуляра-микрометра для светового биологического микроскопа МБС-9. Длину особей измеряли от переднего края головы до основания тельсона [Грезе, 1977]. Фотографии габитусов и деталей тела взрослых самцов и самок сделаны с использованием микроскопа Hitachi SU3500 (рис. 1–5). Всего проанализировано более пятисот особей. Идентификацию особей проводили с использованием следующей литературы: [Грезе, 1985; Wigley, 1966; Rabindranath, 1971; Lowry, 1972; Myers, 1989; Grintsov, Sezgin, 2011].

Результаты

Таксономия, морфология и экология:

Вид *Microtopopus* cf. *maculatus* относится к:

типу Arthropoda,

подтипу Crustacea,

классу Malacostraca,

отряду Amphipoda,

подотряду Senticaudata,

инфраотряду Corophiida,

парвотряду Caprellidira,

надсемейству Microtopoidea,

семейству Micropodidae,

роду *Microtopopus*.

Описание морфологии

Самка. Длина тела 2,40 мм, 8 яиц.

Переон (рис. 1А, 1В). Ширина сегментов переона увеличивается от I к VI. Сегмент VII уже VI, сегменты гладкие, без кутикулярных образований.

Голова. Рострум отсутствует. Глаза (рис. 5) овальные (тёмные в этаноле), длина глаза 0,08 мм, что в 3 раза короче длины головы. Имеются округлые межантеннальные лопасти. **Антенна I** (рис. 1А, 1В). Длина 0,93 мм. Стебелёк: первый членик толще остальных, соотношение длин 1 : 2 : 3 члеников — 1,2 : 1,0 : 1,0, все членики с щетинками дистально. Жгутик из восьми члеников (при данной длине), длиннее стебелька, членики с щетинками и эстетасками. Дополнительный жгутик включает 2 членика (2-й крошечный), членики с щетинками.

Антенна II (рис. 1А, 1В). Длина 0,90 мм. Стебелёк: соотношение длин 3 : 4 : 5 члеников — 0,4 : 1,0 : 1,0, членики с щетинками дистально. Жгутик из четырёх члеников, короче стебелька, членики с щетинками.

Ротовые органы. *Эпистом и верхняя губа.* Эпистом примерно равен верхней губе. Верхняя губа с выемкой посередине вентрального края, щётка мелких щетинок на вентральном крае.

Правая мандибула (рис. 2В). Режущий край с пятью зубцами. Дополнительная пластинка наполовину уже режущего края, скошенная. Зубной ряд с тремя щетинками. Моляр с перетирающей поверхностью. Щупик: соотношение длин 1 : 2 : 3 членика — 0,8 : 1,0 : 0,8, 2-й членик с щетинкой дистально, 3-й членик с щетинками дистально.

Левая мандибула (рис. 2А, 2С). Режущий край с четырьмя зубцами. Дополнительная пластинка шире, чем на правой мандибуле, с четырьмя зубцами. Зубной ряд включает 4 щетинки. Моляр с перетирающей поверхностью. Щупик: строение и кутикулярные образования аналогичны правой мандибуле.

Нижняя губа. Внутренние и наружные лопасти выражены, стороны наружных лопастей опушены.

Максилла I (рис. 2D). Внутренняя лопасть округлая, с выступом, длина около 0,5 наружной, с щетинками. Наружная лопасть слегка изогнута, шипы дистально. Щупик двучленистый, 2-й членик длиннее 1-го в 3 раза, 2-й членик щупика с щетинками дистально.

Максилла II. Наружная лопасть больше внутренней, дистально с щетинками. Внутренняя лопасть с щетинками дистально и вентромедиально.

Максиллипод (рис. 2Е). Внутренние лопасти не доходят до середины наружных, шипики дистально и энтеромедиально. Наружные лопасти доходят до дистального края 2-го членика щупика, шипики дистально. Щупик включает 4 членика, 4-й членик короче остальных. Соотношение длин 1 : 2 : 3 : 4 члеников 0,5 : 1,0 : 0,5 : 0,4, членики 2–3 с немногими щетинками экстеродистально, больше щетинок по внутреннему краю.

Придатки переона. *Гнатопод I* (рис. 2F, 3А). Коксальная пластинка вытянута дорзовентрально, расширяется к вентральному краю, вентральный край равномерно выпуклый, вооружён щетинками. Базиподит: длина 1,2 длины ишиум-карпуса, слегка расширяется дистально, по заднему краю щетинки. Ишиум 0,8 длины меруса, щетинки постеродистально. Длина меруса 0,5 длины карпуса, щетинки постеродистально. Карпус 1,1 длины проподуса, слегка расширяется дистально, щетинки вдоль заднего края простые и гребнистые, дистально-гребнистые. Проподус 1,1 длины когтя, трапецевидный, наружный край с единичными мелкими щетинками, внутренний с щетинками. Край ладони со стороны когтя скошенный, неровный, фестончатый, с щетинками. Коготь длиннее края ладони со стороны когтя.

Гнатопод II (рис. 3В). Сходен по размеру с гнатоподом I, но несколько массивнее его. Коксальная пластинка чуть шире, чем у гнатопода I, вытянута дорзовентрально, вентральный край равномерно выпуклый и несёт щетинки. Базиподит равен длине всех остальных члеников, вместе взятых, расширен дистально, энтеродистально и постеродистально щетинки. Ишиум 0,8 длины меруса, почти квадратный, щетинки постеродистально. Мерус 0,9 длины карпуса, щетинки по заднему краю. Длина карпуса 0,7 длины проподуса, он треугольный, с маленькой округлой лопастью в постеродистальной части и щетинками в постеродистальной и медиальной областях. Проподус равен 1,4 длины когтя, вытянуто-овальный, щетинки расположены по наружному и внутреннему краям и дистально. Край ладони со стороны когтя скошенный, вогнутый, фестончатый, щетинки. Коготь длиннее края ладони со стороны когтя.

Переопод III. Коксальная пластинка вытянута дорзовентрально, вентральный край выпуклый, волнистый, с щетинками. Базиподит равен ишиум-проподусу, расширяется дистально, передние и задние края с щетинками. Длина ишиума равна 0,8 длины меруса, щетинки постеродистально. Длина меруса 1,1 длины карпуса, передний край с широкой лопастью, щетинки по переднему, заднему краям и дистально. Длина карпуса равна длине проподуса, вдвое уже меруса, щетинки по переднему, заднему краям и дистально. Проподус слегка уже карпуса, немного сужается дистально, равен длине когтя, щетинки по внутреннему краю, коготь тонкий.

Переопод IV (рис. 3D). Морфология, пропорции и кутикулярные образования аналогичны переоподу III.

Переопод V (рис. 3E). Коксальная пластинка двулопастная, передняя лопасть значительно больше задней, длина передней лопасти равна ширине коксы, вентральные края лопастей волнистые и несут щетинки. Базиподит равен ишиум-карпусу, с большой лопастью постеродистально, базиподит почти округлый, вдоль заднего и переднего краёв щетинки. Длина ишиума 0,5 длины меруса, ишиум почти квадратный, щетинки антеродистально. Мерус по длине равен карпусу и чуть шире его, расширяется дистально, щетинки по переднему и заднему краям. Длина карпуса 0,8 длины проподуса, щетинки дистально. Проподус вдвое длиннее когтя, щетинки дистально. Коготь тонкий.

Переопод VI (рис. 3F). Длиннее переопода V. Коксальная пластинка двулопастная, передняя лопасть больше, вентральные края лопастей вооружены щетинками. Базиподит по длине равен ишиум-карпусу, овальный с учётом выпуклой лопасти вдоль заднего края, вдоль заднего и переднего краёв щетинки. Ишиум равен 0,3 длины меруса, прямоугольный, щетинки антеродистально. Мерус по длине равен карпусу, щетинки вдоль переднего края и дистально. Длина карпуса 0,8 длины проподуса, щетинки вдоль переднего края и дистально. Проподус вдвое длиннее когтя, слегка загнут, шипики вдоль внутреннего и наружного краёв, щетинки дистально. Коготь тонкий.

Переопод VII. Коксальная пластинка наименьшая, овальная. Морфология, пропорции и кутикулярные образования аналогичны переоподу VI.

Плеон (рис. 1A, 1B). I и II сегменты плеона равны, III сегмент чуть шире. *Эпимеральная пластинка I*. Наименьшая из всех, вентрально закруглённая, щетинка в постероventральной области. *Эпимеральная пластинка II*. Чуть меньше, чем эпимеральная пластинка III, вентральный край выпуклый. Задний край выпрямленный, с тремя маленькими выемками, щетинки в выемках заднего края. *Эпимеральная пластинка III*. Наибольшая из всех. Вентральный край неравномерно выпуклый, слегка выпрямленный в средней части. В постероventральной области маленькая выемка с щетинкой.

Уросома (рис. 1A, 1B). Первый сегмент наибольший, два последующих одинаковые, крошечные щетинки постеродорзально. *Уропод I* (рис. 4A). Наибольший. В 1,5 раза длиннее уропода II. Стебелёк в 1,2 раза длиннее внутренней ветви, шипики экстеродорзально и интеродорзально. Внутренняя и наружная ветви равны, внутренняя ветвь с шипиками интеродорзально и терминально, наружная ветвь с шипиками экстеродорзально и терминально. *Уропод II* (рис. 4C). В 1,5 раза длиннее уропода III. Стебелёк в 1,2 раза длиннее внутренней ветви, интеродорзально с шипиком. Внутренняя ветвь длиннее наружной, внутренняя ветвь интеродорзально и терминально с шипиками, наружная ветвь с шипиком дорзопроксимально и шипиками терминально. *Уропод III* (рис. 4B, 4C). Наименьший из всех. Стебелёк по длине равен единственной ветви, стебелёк с двумя шипиками на дистальном углу с внутренней стороны. Ветвь с шипиками терминально. *Тельсон* (рис. 4B, 4C). Цельный, по форме близок к овальному, маленькие щетинки и шипики на дистальном крае.

Самец (половые отличительные признаки). *Антенна I* чуть больше, чем *антенна II*. *Гнатопод I*: проподус в 1,2 раза длиннее карпуса, расширенный, ширина равна его длине, край ладони со стороны когтя с выемкой. *Гнатопод II* (рис. 3B): проподус длиннее, чем все остальные членики, вместе взятые, а также длиннее головы; вытянуто-овальный; край ладони со стороны когтя вогнутый, с валиком и зубцом вблизи проксимальной части когтя; коготь загнутый, длиннее проподуса. Аллометрические признаки: с возрастом увеличивается размер проподуса гнатопода II относительно других частей тела.

Сравнительный диагноз. По морфологии *Microprotopus* cf. *maculatus* наиболее близок виду *M. maculatus*, от которого самцы *M. cf. maculatus* отличаются отсутствием зубца в проксимальной части края ладони гнатопода II. У самцов *M. maculatus* зубец присутствует напротив дистального конца когтя (рис. 5). Этот же параметр отличает *M. cf. maculatus* от видов *M. raneyi* и *M. shoemakeri*.

В отличие от вида *M. maculatus*, отмеченного в Средиземном море, два других вида обитают в прибрежной зоне западной части Атлантического океана (США, Карибское море, Мексиканский залив).

Самцы вида *M. bicuspidatus* отличаются от *M. cf. maculatus* наличием мощного шипа в проксимальной части края ладони со стороны когтя гнатоподы II, который отсутствует на данном участке конечности у самцов *M. cf. maculatus*. Вид *M. longimanus* больше других отличается от *M. cf. maculatus*. У особей *M. longimanus* жгутик антенны II с тремя члениками, тогда как у *M. cf. maculatus* жгутик данной пары антенн включает 7 члеников. Проподальный членик гнатопод I самок *M. longimanus* с равномерно выпуклым ладонным краем со стороны когтя, в то время как у самок вида *M. cf. maculatus* край ладони со стороны когтя очень наклонный. У вида *M. longimanus* щетинки на карпальном членике гнатоподы II длиннее проподуса, а сам проподус простой, удлинённый и тонкий. У вида *M. cf. maculatus* щетинки на карпальном членике гнатоподы II короче проподуса, а сам проподус с ложной клешней, короткий и широкий.

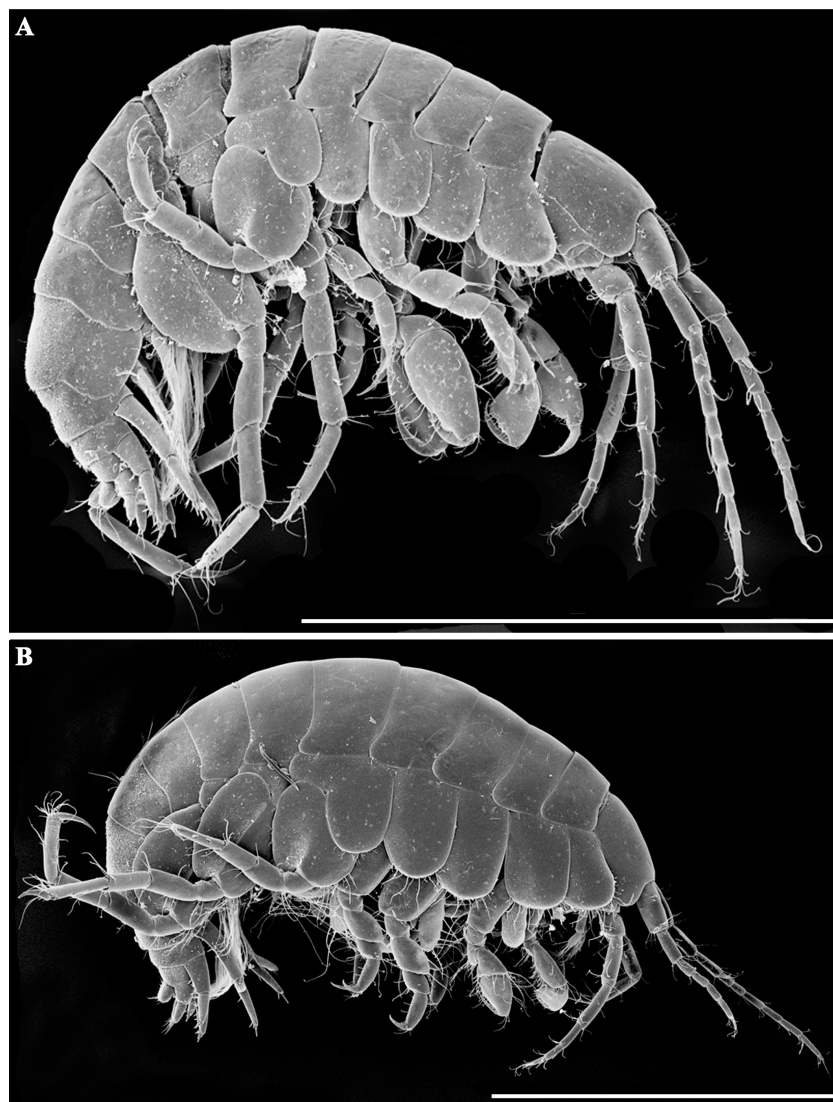


Рис. 1. *Microprotopus* cf. *maculatus*: А — внешний вид самца; В — внешний вид самки; длина шкалы 1 мм

Fig. 1. *Microprotopus* cf. *maculatus*: A — habitus of male; B — habitus of female; scale lines 1 mm

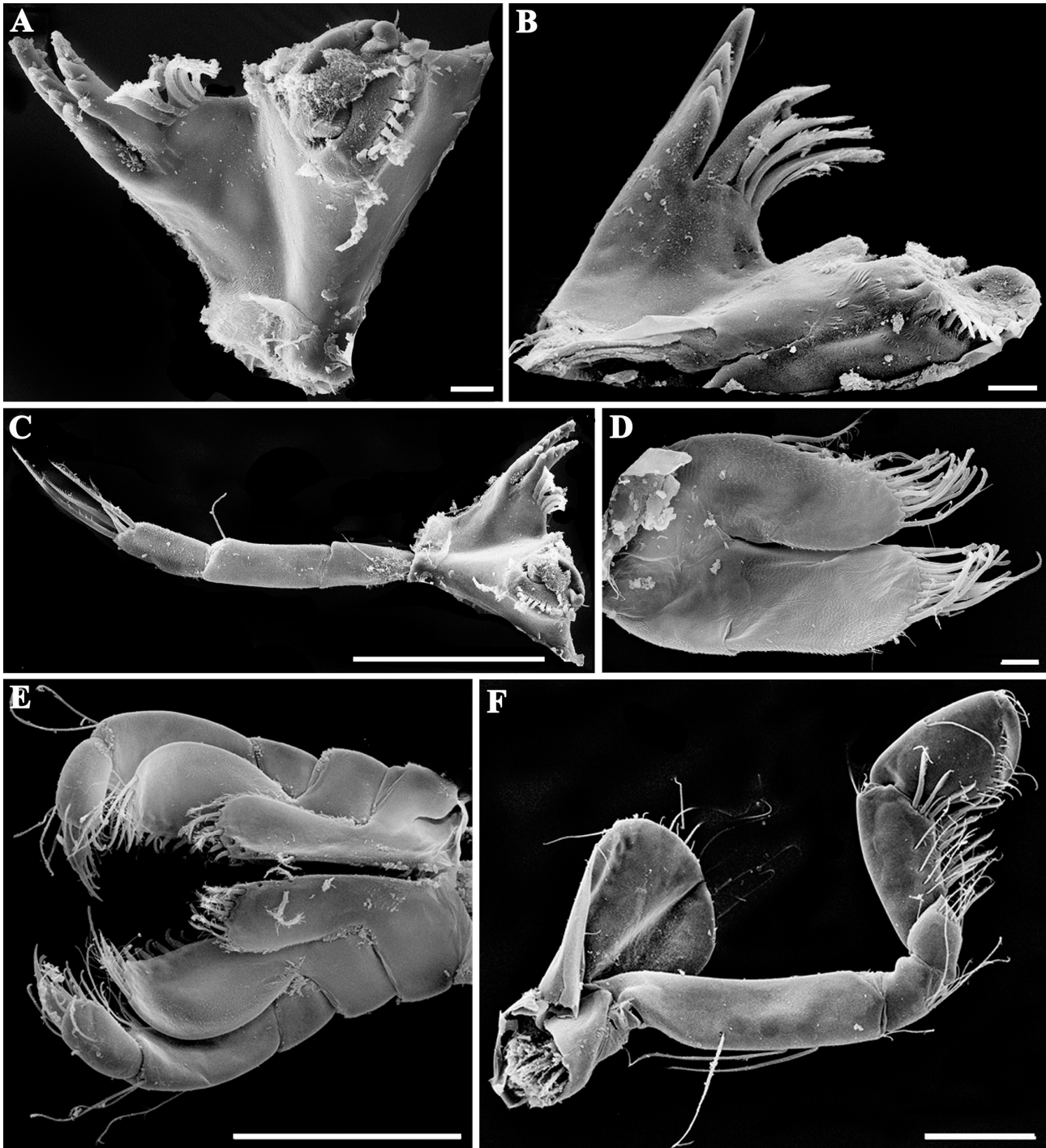


Рис. 2. *Microprotopus* cf. *maculatus*, самка: А — левая мандибула; В — правая мандибула; С — левая мандибула с щупиком; D — максилла II; E — максиллипед; F — гнатопод I; длина шкалы: F — 0,1 мм, А–E — 0,01 мм

Fig. 2. *Microprotopus* cf. *maculatus*, female: A — left mandible; B — right mandible; C — left mandible with palp; D — maxilla II; E — maxilliped; F — gnathopod I; scale lines: F — 0,1 mm, A–E — 0,01 mm

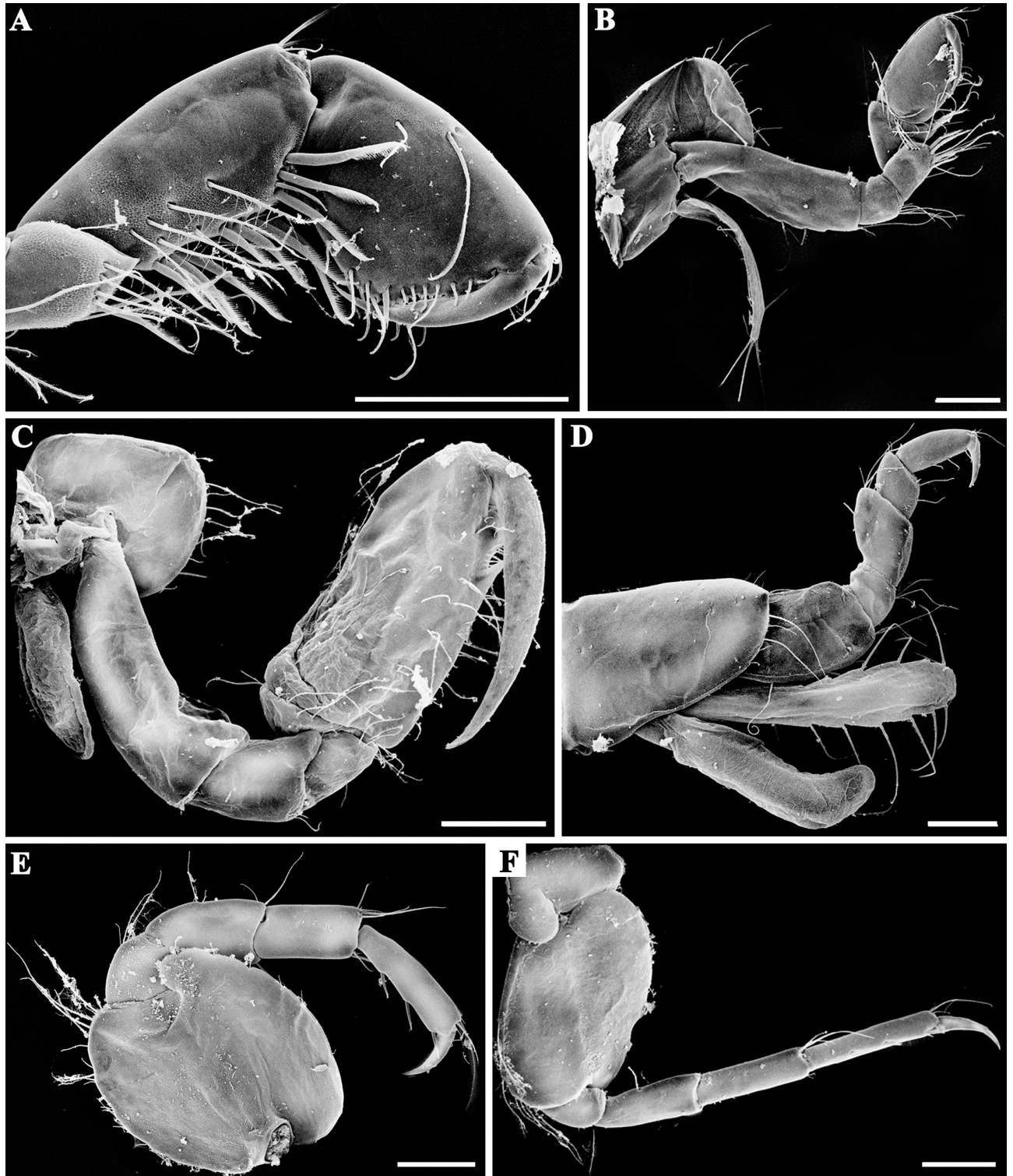


Рис. 3. *Microprotopus* cf. *maculatus*: А — гнатопод I, карпус-дактилус; В — гнатопод II; С — гнатопод II; D — переопод IV; E — переопод V; F — переопод VI; самец — С; самка — А, В, D-F; длина шкалы 0,1 мм

Fig. 3. *Microprotopus* cf. *maculatus*: A — gnathopod I, carpus-dactylus; B — gnathopod II; C — gnathopod II; D — pereopod IV; E — pereopod V; F — pereopod VI; male — C; female — A, B, D-F; scale lines 0,1 mm

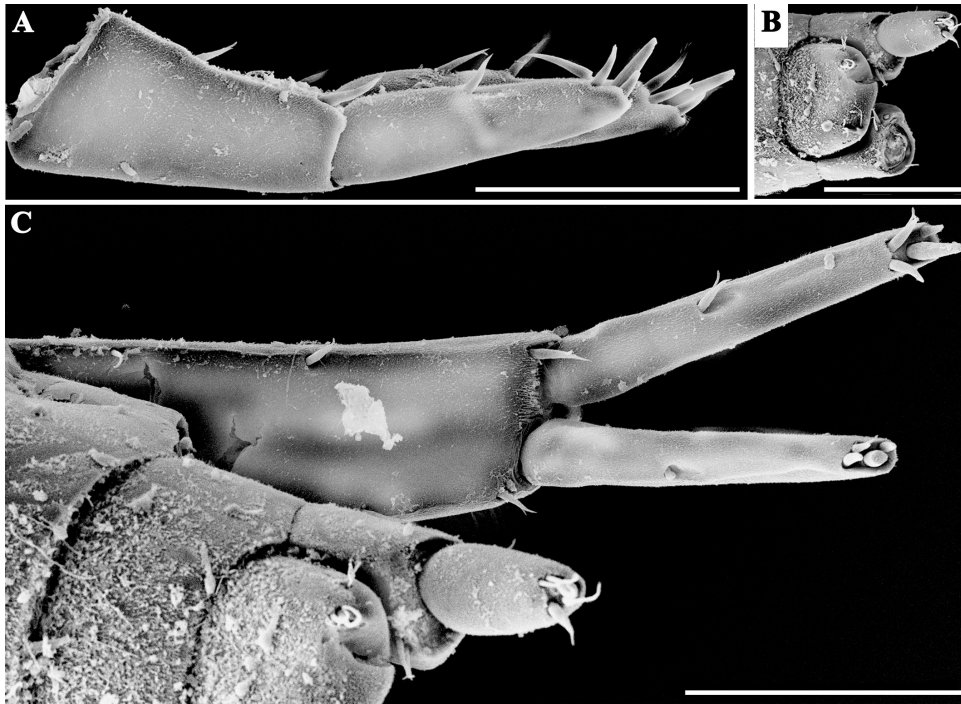


Рис. 4. *Microprotopus* cf. *maculatus*, самка: А — уropод I; В — уropод III, тельсон; С — уropод II, уropод III, тельсон; длина шкалы 0,1 мм

Fig. 4. *Microprotopus* cf. *maculatus*, female: А — uropod I; В — uropod III, telson; С — uropod II, uropod III, telson; scale lines 0,1 mm

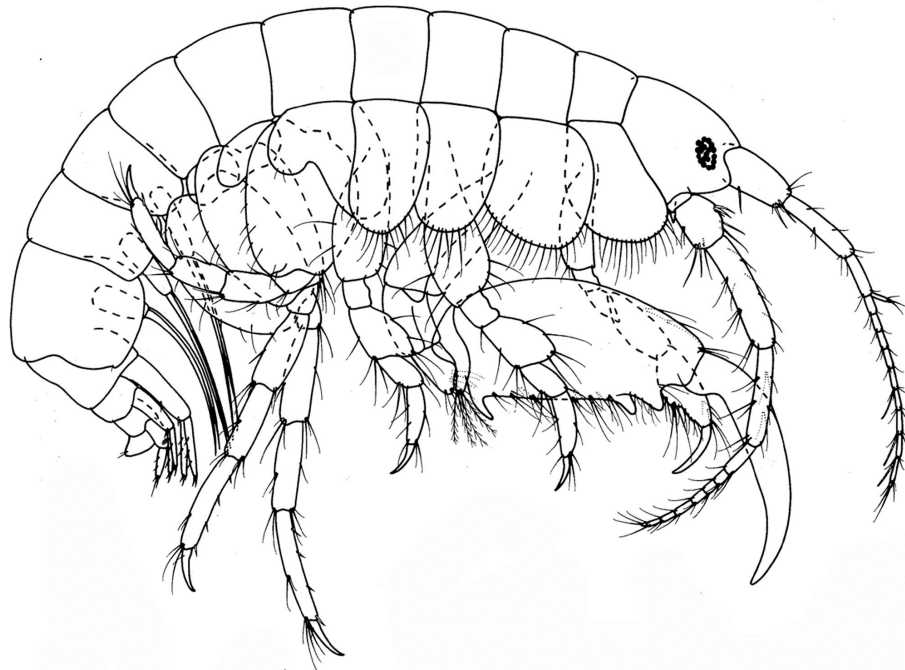


Рис. 5. *Microprotopus maculatus*, самец, внешний вид по А. А. Myers, 1989

Fig. 5. *Microprotopus maculatus*, male, habitus, by А. А. Myers, 1989

Заключение

Таким образом, учитывая морфологию и географическое положение черноморских особей из рода *Microtopopus*, найденных в районе Лебяжьих островов и Севастополя, данный вид можно отнести к *M. cf. maculatus* и придать этому виду статус существующего в изученном регионе. Следовательно, к настоящему времени в Чёрном море известно два вида — *M. longimanus* и *M. cf. maculatus*. Для дальнейшего уточнения распространения видов необходимы дополнительные исследования.

Список литературы

1. Грезе И. И. Амфиподы Чёрного моря и их биология. – Киев : Наук. думка, 1977. – 154 с.
2. Грезе И. И. Бокоплавцы. – Киев : Наук. думка, 1985. – 172 с. – (Фауна Украины / ред. В. И. Монченко ; т. 26, вып. 5).
3. Гринцов В. А., Загородняя Ю. А. Амфипода *Microtopopus maculatus* в Чёрном море — чужеземец или старый знакомый? // Морской экологический журнал. – 2008. – Т. 7, № 1. – С. 60.
4. Bachelet G., Dauvin J. C., Sorbe J. C. An updated checklist of marine and brackish water Amphipoda (Crustacea: Peracarida) of the southern Bay of Biscay (NE Atlantic) // Cahiers de Biologie Marine. – 2003. – Vol. 44, no. 2. – P. 121–151.
5. Bellan-Santini D., Costello M. J. Amphipoda // European register of marine species: a checklist of the marine species in Europe and a bibliography of guides to their identification / eds: Costello M. J. [et al.]. – Paris : Publ. sci. du M. N. H. N., 2001. – P. 295–308. – (Collection Patrimoines Naturels ; vol. 50).
6. Dauvin J. C. Mise à jour de la liste des espèces d'Amphipodes (Crustacea: Peracarida) présents en Manche // Cahiers de Biologie Marine. – 1999. – Vol. 40, no. 2. – P. 165–183.
7. Faasse M., Van Moorsel G. Nieuwe en minder bekende vlokreeftjes van sublitorale harde bodems in het deltagebied (Crustacea: Amphipoda: Gammaridea) // Nederlandse Faunistische Mededelingen. – 2000. – Vol. 11. – P. 19–44.
8. Grintsov V., Sezgin M. Manual for identification of Amphipoda from the Black Sea. – Sevastopol : DigitPrint, 2011. – 151 p.
9. Introduction and protozoans to arthropods / eds: P. J. Hayward, J. S. Ryland. – [S. l.] : Oxford Science, 1990. – 627 p. – (The marine fauna of the British Isles and North-West Europe ; vol. 1).
10. Lowry J. K. Taxonomy and distribution of *Microtopopus* along the east coast of the United States (Amphipoda, Isaeidae) // Crustaceana. Supplement. – 1972. – No. 3. – P. 277–286.
11. Myers A. A. Genus *Microtopopus* Norman, 1867 // The Amphipoda of the Mediterranean / Inst. océanographique. – Monaco : Musée océanographique, 1989. – P. 422–425. – (Memoires de l'Institut océanographique ; no. 13).
12. Myers A. A., Lowry J. K. A phylogeny and a new classification of the Corophiidea Leach, 1814 (Amphipoda) // Journal of Crustacean Biology. – 2003. – Vol. 23, iss. 2. – P. 443–485.
13. Rabindranath P. On a collection of Isaeidae (Crustacea, Amphipoda) from the southern Indian region // Bijdragen tot de Dierkunde. – 1971. – Vol. 41. – P. 67–93.
14. Wigley R. L. Two new marine amphipods from Massachusetts, U. S. A. // Crustaceana. – 1966. – Vol. 10, iss. 3. – P. 259–270. – <https://doi.org/10.1163/156854066X00171>
15. <http://www.marinespecies.org>

**NEW DATA BY MORPHOLOGY
OF AMPHIPODA OF *MICROPROTOPUS* CF. *MACULATUS*
(MICROPROTOPIDAE, AMPHIPODA) FROM THE BLACK SEA (SEVASTOPOL,
CRIMEA)**

Grintsov V. A.

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

Abstract: Currently in the Black Sea registered one species from genus *Microprotopus* Norman, 1867 — *M. longimanus* Chevreux, 1887. Taxonomical status of second species *M. minutus* Sowinsky, 1894 undefined and tentatively synonymous of *M. longimanus*. The presence of the species *M. maculatus* Norman, 1867 needs to be confirmed because there is no description and illustrations for this species. In this work give detailed analysis of morphology specimens from genus *Microprotopus* from the Black Sea (Crimea, Sevastopol, Lebijachii Islands) and SEM photos of these species. A comparative analysis of specimens from the Crimean coast and other species of the genus is given. According to the research results, the taxonomic status of the species from the Crimean coast is *M. cf. maculatus*.

Keywords: Amphipoda, the Black Sea, *Microprotopus* cf. *maculatus*, morphology, comparative analysis with species of the genus *Microprotopus*.

Сведения об авторе

Гринцов Владимир Андреевич	кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», vgrintsov@gmail.com
----------------------------------	---

*Поступила в редакцию 06.04.2022 г.
Принята к публикации 10.06.2022 г.*

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *A* С УЧЁТОМ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ, ГИДРОХИМИЧЕСКИХ И ГИДРООПТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЧЁРНОГО МОРЯ ВЕСНОЙ 2021 г. *

Крашенинникова С. Б., Бабич С. А.

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

Аннотация: По данным 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий», в апреле — мае 2021 г. выявлены особенности пространственного распределения концентрации хлорофилла *a* ($C_{\text{хл}}$) с учётом гидрологических, гидрохимического и гидрооптического факторов среды в верхнем 50-метровом слое северо-восточной части Чёрного моря. Наибольшие средние значения $C_{\text{хл}}$ ($2,3 \pm 0,7$ мкг/л) наблюдались в слое 0–20 м и наименьшие ($0,6 \pm 0,3$ мкг/л) — на глубине 50 м в районе Южного берега Крыма (ЮБК) и Кавказа. В районах с максимальными $C_{\text{хл}}$ выявлены высокие значения температуры воды ($13,3 \pm 0,6$ °С), концентрации кислорода ($7,5 \pm 0,1$ мкг/кг) при низких значениях солёности ($18,4 \pm 0,1$ епс) в прибрежных районах, что подтвердилось корреляционным анализом. Установлены значимые положительные связи концентрации хлорофилла *a* с температурой ($r = 0,8$), кислородом ($r = 0,5$), мутностью ($r = 0,9$) и отрицательные — с солёностью ($r = -0,6$) в слое 20 м в районе Кавказа. Аналогичные связи установлены на глубине 50 м в районе ЮБК. Наибольшие значения $C_{\text{хл}}$ в районах с высокой концентрацией кислорода свидетельствуют о скоплении в них фитопланктона, который выделяет кислород в процессе фотосинтеза. Высокие значения мутности свидетельствуют о наличии взвеси в этих районах. В апреле 2021 г., после тёплой зимы, наблюдались низкие значения $C_{\text{хл}}$, что подтвердилось данными спутниковых наблюдений. Максимум $C_{\text{хл}}$, наблюдающийся в глубоководной части моря, территориально совпал с минимумом температуры, максимумом солёности, что связано с подъёмом вод из более глубоководных слоёв к поверхности за счёт экмановской накачки. Основное черноморское течение имело зональную направленность с двумя максимумами скорости течений (3,5 см/с вблизи ЮБК и 2,5 см/с вблизи Кавказа). Поверхностная циркуляция вод объясняет наибольшую площадь распределения хлорофилла *a* с концентрацией более 2,5 мкг/л в западной части района исследования.

Ключевые слова: температура, солёность, Основное черноморское течение, мутность, кислород.

Введение

Исследование фитопланктона в весенний период имеет важное значение для изучения особенностей его годовой динамики и функционирования экосистемы Чёрного моря в целом [Финенко и др., 2021; Финенко и др., 2006; Silkin et al., 2019; Mikaelyan, Zatsepin, Chasovnikov, 2013]. Изменчивость биомассы фитопланктона оценивается по концентрации основного пигмента — хлорофилла *a*. Анализ пространственно-временного распределения концентрации хлорофилла *a* важен из-за быстрой реакции фитопланктонных сообществ на малейшие изменения климата или хозяйственной деятельности человека в Черноморском регионе. Такой анализ обычно проводится на основе данных контактных наблюдений [Юнев, 2011; Востоков и др., 2019; Финенко и др., 2021], спутникового зондирования [Чурилова и др., 2016; Chu, Ivanov, Margolina, 2005; Finenko, Suslin, Kovaleva, 2014].

*Работа выполнена по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом», № гос. регистрации 121041400077-1.

Из-за сильной соленосной стратификации в Чёрном море глубина максимального перемешивания в среднем составляет ~ 50 м, то есть совпадает с нижней границей эвфотического слоя, в котором освещённости достаточно для деления клеток фитопланктона [Кривенко, Пархоменко, 2010]. То есть сильная стратификация является препятствием для перемешивания вод между слоями, в результате обилие питательных веществ (азотных, фосфорных соединений и др.) концентрируется в эвфотической зоне, способствуя вегетации фитопланктона [Oguz et al., 1999; Yunev, Moncheva, Carstensen, 2005].

Весной до глубины 50 м распространяется концентрация хлорофилла *a* с глубиной залегания максимума $S_{\text{хл}}$ ~ 20 м [Chu, Ivanov, Margolina, 2005]. Положение максимума $S_{\text{хл}}$ не всегда совпадает с градиентами температуры и плотности [Финенко и др., 2021]. Индикатором положения максимума $S_{\text{хл}}$ может служить такой параметр, как мутность, характеризующийся уменьшением прозрачности воды в связи с наличием неорганических и органических тонкодисперсных взвесей, а также развитием планктонных организмов.

За период апрель — май 2021 г. на научно-исследовательском судне (НИС) «Профессор Водяницкий» (116-й рейс) сотрудниками Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН» (ФИЦ ИнБЮМ) были проведены натурные исследования в северо-восточной части Чёрного моря. В ходе экспедиции были получены новые данные о распределении $S_{\text{хл}}$, мутности, кислорода в комплексе с гидрологическими характеристиками (температурой, солёностью, течениями).

Цель работы — выявить особенности пространственного распределения концентрации хлорофилла *a* с учётом гидрологических, гидрохимического и гидрооптического факторов среды в верхнем 50-метровом слое северо-восточной части Чёрного моря в апреле — мае 2021 г.

Материалы и методы

В работе использовались данные о температуре и солёности воды, мутности, концентрации кислорода и хлорофилла *a* в верхнем 50-метровом слое северо-восточной части Чёрного моря в ходе 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» (22 апреля — 15 мая 2021 г.). Глубину взятия проб батометрами на поверхности моря принимали за 0 м. Эвфотический слой в мезотрофных водах Чёрного моря доходит до 20 м, в отдельные годы на глубине 10 м часто встречаются максимумы $S_{\text{хл}}$. Пик фотосинтеза в Чёрном море находится в слое 10–20 м, так как усвояемость света на этих глубинах максимальная. В олиготрофных водах глубина фотического слоя ~ 50 м, поэтому анализ распределения всех параметров проводился на горизонтах 0, 10, 20, 50 м.

Эти данные были получены на борту судна прибором *Idronaut Ocean Seven 320+* [Ocean Seven ...] на стандартной мониторинговой сетке станций (рис. 1). В ходе экспедиции было выполнено 126 станций.

Скорости течений на поверхности рассчитывались по геострофическому соотношению относительно глубины 300 м.

Восстановление полей температуры, солёности, скоростей течений, концентрации хлорофилла *a* и мутности производилось методом интерполяции (кригинга) [Демьянов, Савельева, 2010].

Рассчитывались коэффициенты корреляции для поиска связей между биологическими и гидрохимическими параметрами на разных глубинах в районах Чёрного моря с наибольшей концентрацией хлорофилла *a*. Значимость коэффициентов корреляции оценивалась по *t*-критерию Стьюдента [Russo, 2004].

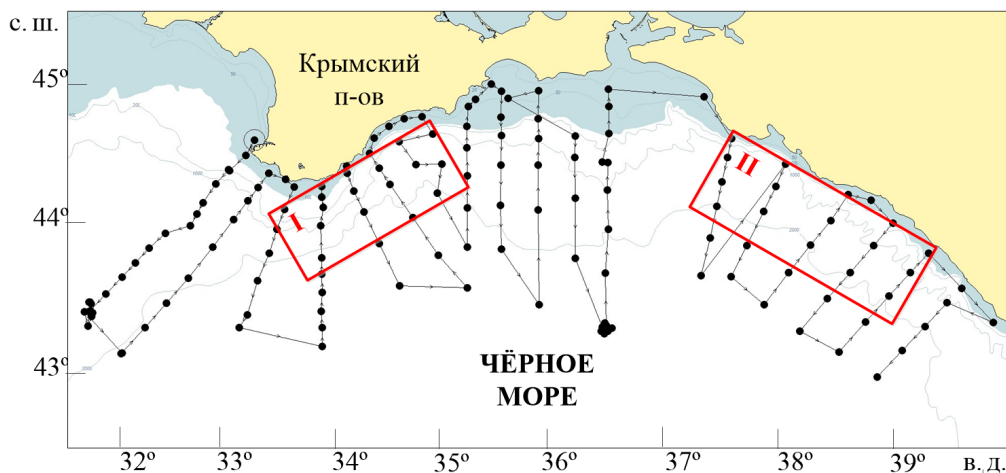


Рис. 1. Сетка станций по данным 116-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» за период 22 апреля — 15 мая 2021 г.,
I — район Южного берега Крыма (ЮБК), II — район побережья Кавказа

Результаты

Весной концентрация хлорофилла *a* имела неоднородное пространственное распределение (рис. 2). Наибольшие значения S_{chl} обнаружены вблизи Кавказского побережья (4,5 мкг/л) и в районе Южного берега Крыма (3 мкг/л) на горизонтах 0, 10, 20 м, а также в глубоководной части Чёрного моря (2,5 мкг/л). Площадь зоны, занимаемой хлорофиллом *a* (> 2,5 мкг/л), была максимальной в западной части района исследования.

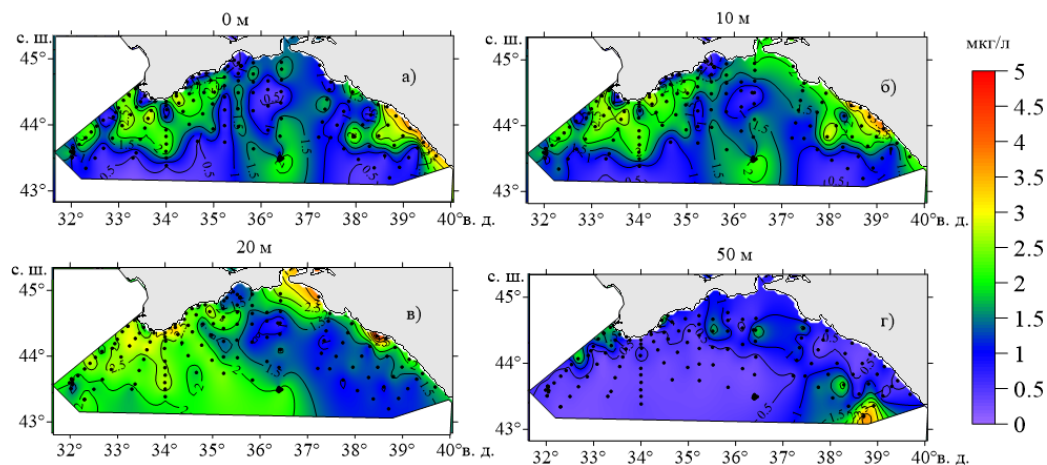


Рис. 2. Пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* на горизонтах 0, 10, 20, 50 м в северо-восточной части Чёрного моря за период 22 апреля — 15 мая 2021 г.;
чёрные точки — сетка станций

Температура воды в восточной части Чёрного моря уменьшалась с глубиной от 15,2 °С (0 м) до 8,4 °С (50 м) (рис. 3). На горизонтах 0, 10 м наибольшие значения температуры воды наблюдались в прибрежье Кавказа (рис. 3а).

В районе Южного берега Крыма (ЮБК) в слое 0–10 м значения температуры воды были минимальными (11,6 °С). На горизонте 20 м площадь с преобладанием низких значений температуры расширилась от прибрежья до глубоководной части акватории, преимущественно в западной части моря и прибрежье Кавказа. На глубине 50 м температура воды по всей акватории не превышала 8,4 °С, лишь в прибрежье ЮБК она достигала 10 °С.

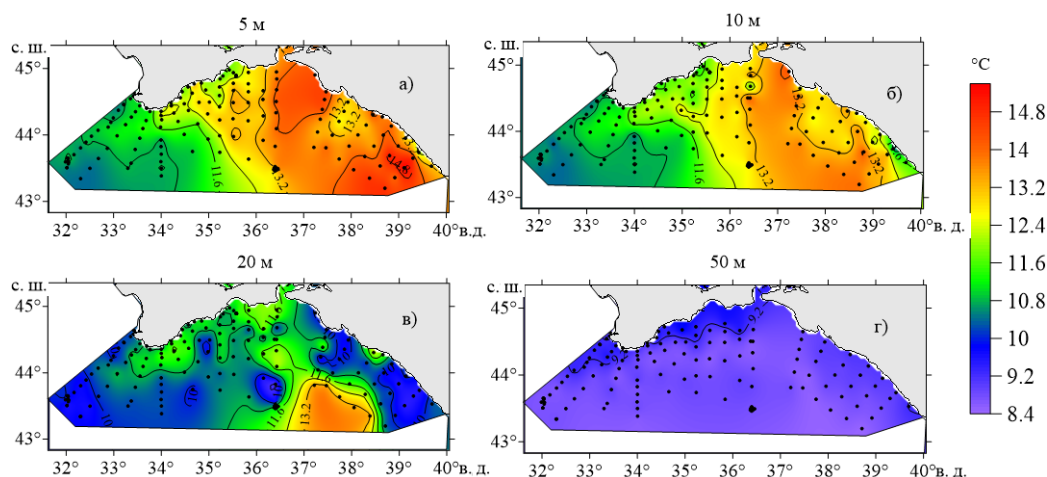


Рис. 3. Пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* на горизонтах 0, 10, 20, 50 м в северо-восточной части Чёрного моря за период 22 апреля — 15 мая 2021 г.; чёрные точки — сетка станций

Пространственное распределение солёности характеризовалось наименьшими её значениями (17,5 и 17,8 епс) в прибрежье Крыма и Кавказа, наибольшими (18,8 и 20,5 епс) — в глубоководной части Чёрного моря, на горизонтах 0 и 50 м соответственно (рис. 4а, 4б).

Концентрация кислорода распределена равномерно по всей исследуемой акватории в верхнем (0–20 м) слое, её значение равно 8 мкг/кг (рис. 4в). На горизонте 50 м наблюдается уменьшение содержания кислорода в центральной глубоководной части моря исследуемого района до нуля (рис. 4г), что свидетельствует о нахождении здесь границы бескислородной зоны.

Наибольшие значения мутности (1,5–2,0 емф) наблюдались вдоль Кавказского побережья в поверхностном слое, на горизонте 0 м (рис. 4д). На горизонтах 20 и 50 м значения показателя мутности приближались к нулю (рис. 4е), что свидетельствует о практически полном отсутствии взвешенного вещества.

Распределение скорости течений (рис. 5) имеет циклонический характер с выраженным основным звеном черноморской циркуляции — Основным черноморским течением (ОЧТ) — с максимальной скоростью 35 см/с вблизи ЮБК и 25 см/с в восточной части моря, что свидетельствует о разделении ОЧТ на восточную и западную части весной 2021 г. Ближе к центральной глубоководной части Чёрного моря скорости обеих частей течения малы (до 5 см/с).

В таблице представлены средние значения $C_{\text{хл}}$, температуры, солёности, содержания кислорода и их среднеквадратические отклонения для двух районов — Южного берега Крыма и Кавказа, где были выявлены максимальные значения концентрации хлорофилла *a* (рис. 2а).

Таблица 1

Средние значения параметров среды и их среднеквадратические отклонения в исследуемых районах (Южный берег Крыма и Кавказ)

Глубина, м	ЮБК				Кавказ			
	$C_{\text{хл}}$, мкг/л	T, °C	S, епс	O ₂ , мкг/кг	$C_{\text{хл}}$, мкг/л	T, °C	S, епс	O ₂ , мкг/кг
0	1,9 ± 0,9	11,7 ± 0,6	18,4 ± 0,1	7,8 ± 0,1	2,2 ± 1,1	13,3 ± 0,6	18,1 ± 0,2	7,5 ± 0,1
10	2,1 ± 0,8	11,5 ± 0,5	18,4 ± 0,1	7,8 ± 0,1	2,4 ± 0,9	12,7 ± 0,7	18,2 ± 0,2	7,6 ± 0,1
20	2,7 ± 0,5	11,3 ± 0,4	18,5 ± 0,1	7,8 ± 0,1	1,9 ± 1,0	10,3 ± 0,9	18,5 ± 0,2	7,6 ± 0,1
50	0,6 ± 0,5	9,1 ± 0,2	18,8 ± 0,2	7,2 ± 0,5	0,5 ± 0,2	8,9 ± 0,1	18,7 ± 0,1	7,4 ± 0,1

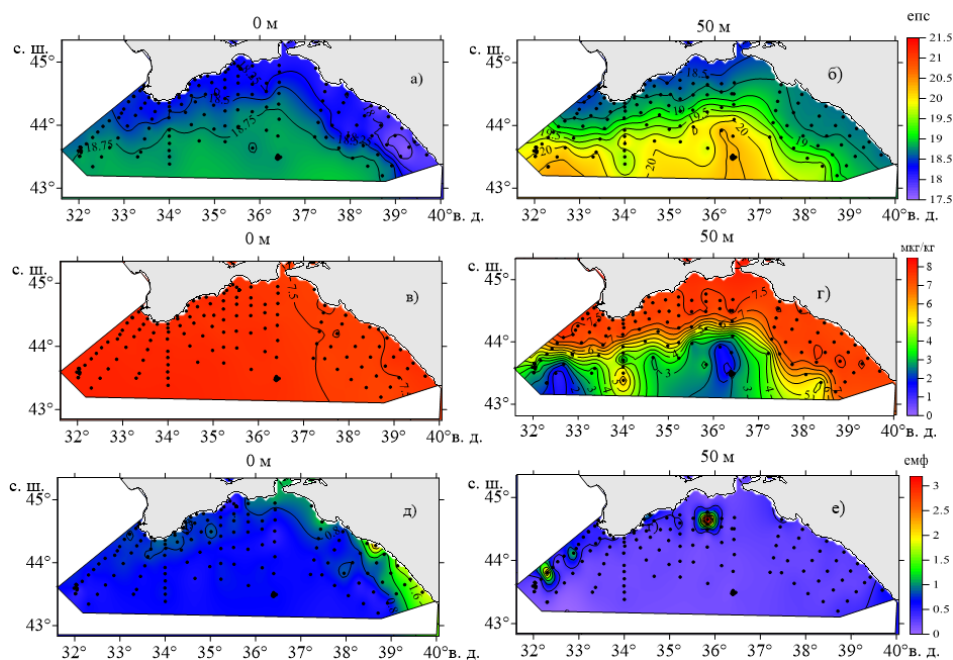


Рис. 4. Пространственное распределение солёности (а, б), концентрации кислорода (в, г) и мутности (д, е) на горизонтах 0 и 50 м в северо-восточной части Чёрного моря за период 22 апреля — 15 мая 2021 г.; чёрные точки — сетка станций

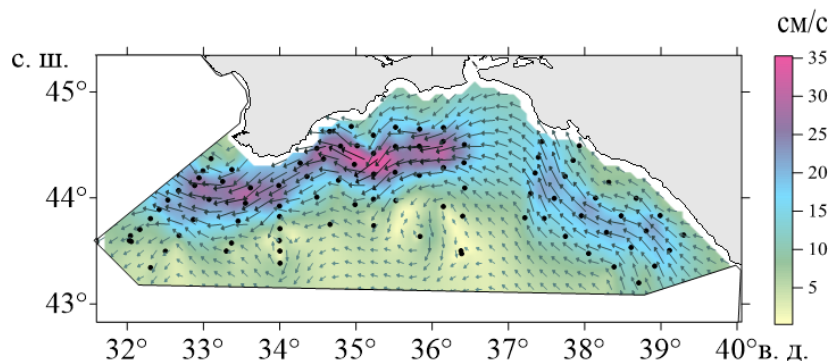


Рис. 5. Пространственное распределение геострофической скорости течений относительно отсчётной поверхности 300 м в северо-восточной части Чёрного моря за период 22 апреля — 15 мая 2021 г.; чёрные точки — сетка станций

В районе ЮБК установлены значимые на 5%-ном доверительном уровне положительные связи концентрации хлорофилла *a* с температурой ($r = 0,7$), кислородом ($r = 0,5$), мутностью ($r = 0,6$) и отрицательные — с солёностью ($r = -0,5$) на глубине 50 м. В районе Кавказа аналогичные связи $S_{хл}$ установлены с температурой ($r = 0,8$) и солёностью ($r < -0,6$) на глубине 20 м, с кислородом ($r = 0,5$) и мутностью ($r = 0,9$) — на поверхности. Положительная связь $S_{хл}$ с температурой характеризуется цветением теплолюбивых видов фитопланктона в весенний период. Отрицательная связь концентрации хлорофилла *a* с солёностью обусловлена большими значениями $S_{хл}$ ($> 4,5$ мкг/л) при распреснении прибрежных вод Крыма и Кавказа (рис. 4а, 4б), связанном с возможным обильным поступлением биогенных элементов со стоком рек. Значимые положительные связи $S_{хл}$ с концентрацией O_2 указывают на высокое содержание фитопланктона в двух рассматриваемых районах, так как в процессе фотосинтеза фитопланктон выделяет кислород. Положительные связи $S_{хл}$ с мутностью могут быть обусловлены преобладанием в воде примесей органического происхождения и развитием фитопланктона.

Обсуждение

Концентрация хлорофилла a соотносится с первичной продукцией в разных районах Мирового океана [Шемшуря и др., 1990]. Поэтому $C_{\text{хл}}$ анализировалась как показатель потенциала фотосинтеза для данного района Чёрного моря. Полученное в настоящей работе пространственное распределение концентрации хлорофилла a с максимумом вблизи Кавказского побережья хорошо согласуется с имеющимися представлениями о распределении биомассы фитопланктона, связанном с $C_{\text{хл}}$ в эвфотическом слое весной [Крашенинникова и др., 2019]. Развитие фитопланктона зависит от освещённости и наличия биогенных элементов. На наличие или отсутствие биогенных элементов могут указывать гидрометеорологические особенности района исследования.

Одним из основных факторов, обуславливающих максимум $C_{\text{хл}}$ в глубоководной части Чёрного моря в весенний период, является подъём биогенных элементов к поверхности за счёт экмановской накачки, обусловленной неоднородностью поля ветра [Krasheninnikova et al., 2022]. При этом хочется отметить, что в весенний период $C_{\text{хл}}$ ниже, чем летом, что связано с более низкими значениями экмановской скорости в весенний сезон, чем в летний.

В работе [Silkin et al., 2019] также указывается на то, что существует тесная связь между доминирующими видами фитопланктона и концентрацией питательных веществ, зависящей от направления ветра. Хочется отметить, что в марте — апреле в период 2016–2019 гг. в шельфовой зоне Чёрного моря доминировали разные виды водорослей: динофитовые, диатомовые, гаптофитовые, примнезиевые [Ли и др., 2021; Финенко и др., 2021]. Именно эти водоросли обуславливают рост первичной продукции в рассматриваемом регионе весной.

Солёность воды увеличивается от побережья к центральным районам Чёрного моря, что сопоставимо с общим распределением солёности, полученным по результатам экспериментальных и теоретических исследований в ранних работах, например [Комплексные океанографические ... , 1980]. С речным стоком и переносом пресных вод Основным черноморским течением связано относительно низкое содержание солей в поверхностном слое прибрежной зоны [Кордзадзе, Деметрашвили, Сурмава, 2004], что подтверждается результатами настоящей работы. Изолированные объёмы пресной воды в поверхностном слое наблюдаются вблизи устьев рек в периоды паводков, где также наблюдались максимальные значения концентрации хлорофилла a .

Район повышенной солёности находился в центре циклонического круговорота, образованного ОЧТ, где происходил вынос солёных вод основного галоклина в поверхностный слой. Аналогичные процессы происходили при событиях локальных апвеллингов в прибрежной зоне. В частности, как показано в настоящей работе, вблизи Кавказского побережья, в районе резкого понижения температуры на ~ 4 °С (рис. 2в), солёность повышается в среднем на 0,5 епс. Аналогичные выводы для района ЮБК сделаны в работе [Горячкин, Иванов, 2005], в которой установлено, что увеличение солёности составило 0,2–1,5 епс. Сезонный галоклин хорошо выражен в апреле — мае, что согласуется с данными, представленными в работе [Иванов, Белокопытов, 2011].

Сравнение полученных в настоящей работе данных контактных наблюдений за концентрацией хлорофилла a и спутниковых данных *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer-Aqua* (MODIS-Aqua) (рис. 2а, 6а) показало, что в районе Кавказского побережья действительно наблюдалось наибольшее значение концентрации хлорофилла a (5 мкг/л), у южной части побережья Крыма значение составило 1,5 мкг/л. Получено, что концентрация хлорофилла a весной 2021 г. оказалась невысокой (~ 2 мкг/л), это подтверждается данными спутниковых наблюдений (рис. 6а). После тёплой зимы $C_{\text{хл}}$ в весенний период должна быть в 3–5 раз ниже по сравнению с более холодными зимами [Finenko, Suslin, Kovaleva, 2014]. В январе 2021 г. температура поверхности Чёрного моря равнялась 10–14 °С (зима тёплая) (рис. 6б), при этом наблюдались низкие значения $C_{\text{хл}}$

в апреле 2021 г. Температура менее 8–10 °С (зима холодная) (рис. 6г) сопровождалась троекратно увеличивающимися значениями $C_{\text{ХЛ}}$ (рис. 6в) в северо-восточной части Чёрного моря в апреле 2012 г. Согласно проведённому сравнению, весной 2012 г. был зафиксирован апвеллинг, характеризующийся меньшими значениями температуры и приводящий к поднятию на поверхность вод из более глубоководных слоёв, богатых биогенными элементами и, соответственно, высокими значениями $C_{\text{ХЛ}}$, в северо-восточной части Чёрного моря (рис. 6в).

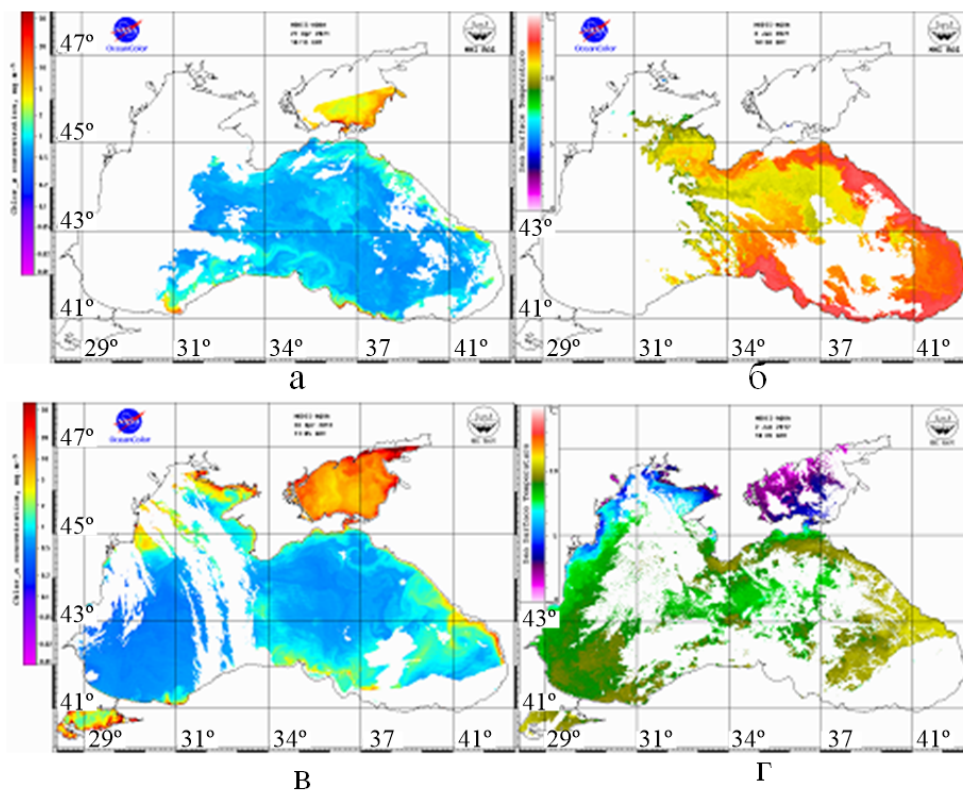


Рис. 6. Распределение концентрации хлорофилла *a* (согласно спутниковым данным *MODIS-Aqua* [NRT satellite..., 2002]): (а) — 27 апреля 2021 г., (в) — 26 апреля 2012 г.; распределение температуры поверхности: (б) — 3 января 2021 г., (г) — 3 января 2012 г.

Заключение

В ходе 116-го рейса на НИС «Профессор Водяницкий» в апреле — мае 2021 г. были выявлены особенности пространственного распределения концентрации хлорофилла *a* с учётом распределения температуры и солёности воды, скорости течений, концентрации кислорода, мутности в эвфотическом слое (50 м) северо-восточной части Чёрного моря.

Концентрация хлорофилла *a* достигала наибольших значений вблизи Кавказского побережья и в районе Южного берега Крыма (4,5 мкг/л) на горизонтах 0, 10, 20 м. Максимумы $C_{\text{ХЛ}}$ территориально совпадали с наибольшими значениями концентрации кислорода, мутности и наименьшими значениями солёности. Максимумы кислорода, по-видимому, связаны с наибольшим содержанием фитопланктона в этих двух районах. Наибольшие значения мутности обусловлены наличием взвеси различного происхождения. Обнаружены максимальные значения температуры (15 °С) в поверхностном слое моря, постепенно уменьшающиеся с глубиной, при распреснении вод вблизи Кавказского побережья. Область повышенной солёности (более 18,8–20,5 епс) наблюдалась в центре циклонического круговорота глубоководной части, где происходил вынос солёных вод основного галоклина в поверхностный слой в Чёрном море.

Корреляционный анализ позволил установить значимые на 5%-ном доверительном уровне положительные связи концентрации хлорофилла *a* с температурой ($r > 0,7$), кислородом ($r = 0,5$), мутностью ($r > 0,6$), а также отрицательные — с солёностью ($r < -0,5$) на глубине 50 м в районе ЮБК и в слое 0–20 м в районе Кавказа. Выявленные связи в прибрежье Кавказа и ЮБК обусловлены доминированием динофитовых, диатомовых микроводорослей и эвтрофикацией вод за счёт стока рек в рассматриваемый период наблюдений. Максимум $C_{\text{хл}}$, наблюдающийся в глубоководной части моря, территориально совпадает с минимумами значений температуры и максимумами солёности, что связано с подъёмом вод из более глубоководных слоёв за счёт экмановской накачки.

Наименьшие значения концентрации хлорофилла *a* весной вблизи северо-восточного побережья Чёрного моря наблюдаются после тёплой зимы, наибольшие — после холодной. Это подтверждается также данными спутниковых наблюдений.

В поверхностной циркуляции вод в апреле — мае 2021 г. преобладал поток Основного черноморского течения, преимущественно зонального направления (с востока на запад), что, возможно, объясняет преобладание концентрации хлорофилла *a* со значениями более 2,5 мкг/л в западной части района исследования по сравнению с восточной.

Список литературы

1. Востоков С. В., Лобковский Л. И., Востокова А. С., Соловьев Д. М. Сезонная и многолетняя изменчивость фитопланктона в Чёрном море по данным дистанционного зондирования и контактными измерениями хлорофилла *a* // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 485, № 1. – С. 99–103. – <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485199-103>
2. Горячкин Ю. Н., Иванов В. А. Изменчивость солёности поверхностных вод в прибрежной зоне Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2005. – Вып. 12. – С. 21–27.
3. Демьянов В. В., Савельева Е. А. Геостатистика: теория и практика. – Москва : Наука, 2010. – 327 с.
4. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Чёрного моря / Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины. – Севастополь : МГИ, 2011. – 209 с.
5. Комплексные океанографические исследования Чёрного моря / В. В. Ефимов [и др.] ; отв. ред. Б. А. Нелепо. – Киев : Наук. думка, 1980. – 240 с.
6. Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И., Сурмава А. А. О реакции гидрологического режима Чёрного моря на изменчивость атмосферных процессов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2004. – Вып. 10. – С. 265–277.
7. Крашенинникова С. Б., Минкина Н. И., Самышев Э. З., Шокурова И. Г. Влияние комплекса факторов среды на биомассу фитопланктона и зоопланктона в Чёрном море в весенний период // Экология и строительство. – 2019. – № 4. – С. 14–21. – <https://doi.org/10.35688/2413-8452-2019-04-002>
8. Кривенко О. В., Пархоменко А. В. Пространственная и временная изменчивость биомассы фитопланктона в Чёрном море за период 1948–2001 гг. // Морской экологический журнал. – 2010. – Т. 9, № 4. – С. 5–24.
9. Ли Р. И., Сысоева И. В., Сысоев А. А., Латушкин А. А. Структура фитопланктона Чёрного моря в весенний период // Изучение водных и наземных экосистем: история и современность : междунар. науч. конф., посвящ. 150-летию Севастоп. биол. станции – Ин-та биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского и 45-летию НИС «Профессор Водяницкий», 13–18 сент. 2021 г., Севастополь, Рос. Федерация : тез. докл. – Севастополь : ФИЦ ИнБЮМ, 2021. – С. 281–282. – URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/10548> (дата обращения: 01.03.2022).

10. Финенко З. З., Масурова И. М., Ковалева И. В., Георгиева Е. Ю. Развитие фитопланктона в зимне-весенний период в прибрежных водах Крыма // Морской биологический журнал. – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 102–114. – <https://doi.org/10.21072/mbj.2021.06.1.08>
11. Финенко Г. А., Романова З. А., Аболмасова Г. И., Аннинский Б. Е. Трофические взаимоотношения в планктонном сообществе Чёрного моря на современном этапе // Экология моря : сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. – Севастополь : ИнБЮМ, 2006. – Т. 71. – С. 50–54.
12. Чурилова Т. Я., Суслин В. В., Кривенко О. В., Ефимова Т. В., Моисеева Н. А. Спектральный подход к оценке скорости фотосинтеза фитопланктона в Чёрном море по спутниковой информации: методологические аспекты развития региональной модели // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2016. – Т. 9, № 4. – С. 367–384. – <https://doi.org/10.17516/1997-1389-2016-9-4-367-384>
13. Шемшурова В. Е., Финенко З. З., Буракова З. П., Крупаткина Д. К. Оценка первичной продукции морского фитопланктона по хлорофиллу «а», относительной прозрачности и спектрам восходящего излучения // Океанология. – 1990. – Т. 30, № 3. – С. 479–485.
14. Юнев О. А. Эвтрофикация и годовая первичная продукция фитопланктона глубоководной части Чёрного моря // Океанология. – 2011. – Т. 51, № 4. – С. 658–668.
15. Chu P. C., Ivanov L. M., Margolina T. M. Seasonal variability of the Black Sea chlorophyll-a concentration // Journal of Marine Systems. – 2005. – Vol. 56, iss. 3/4. – P. 243–261. – <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.01.001>
16. Finenko Z. Z., Suslin V. V., Kovaleva I. V. Seasonal and long-term dynamics of the chlorophyll concentration in the Black Sea according to satellite observations // Oceanology. – 2014. – Vol. 54, iss. 5. – P. 596–605. – <https://doi.org/10.1134/S0001437014050063>
17. Krasheninnikova S. B., Minkina N. I., Shokurova I. G., Samyshev E. Z. Comprehensive analysis of the distribution of ecosystem components in the Black Sea taking into account hydrochemical and hydrometeorological factors // Water Resources. – 2022. – Vol. 49, iss. 1. – P. 134–141. – <https://doi.org/10.1134/S0097807822010092>
18. Mikaelyan A. S., Zatsepin A. G., Chasovnikov V. K. Long-term changes in nutrient supply of phytoplankton growth in the Black Sea // Journal of Marine Systems. – 2013. – Vol. 117/118. – P. 53–64. – <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.02.012>
19. Ocean Seven 320 Plus WOCE-CTD // Indronaut : website. – Italy, [19??]. – URL: <https://www.idronaut.it/multiparameter-ctds/oceanographic-ctds/os320plus-oceanographic-ctd/> (date of access: 01.03.2022).
20. NRT satellite data // Marine portal : website / Marine Hydrophysical Institute of RAS. – Sevastopol, 2002. – URL: <http://dvs.net.ru/mp/data/modis/2105/210509lg.gif> (date of access: 01.03.2022).
21. Oguz T., Ducklow H. W., Malanotte-Rizzoli P., Murray J. W., Shushkina E. A., Vedernikov V. I., Ulnuata U. A physical-biochemical model of phytoplankton productivity and nitrogen cycling in the Black Sea // Deep Sea Research. Part I, Oceanographic. – 1999. – Vol. 46, iss. 4. – P. 597–636. – [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(98\)00074-0](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00074-0)
22. Russo R. Statistics for the behavioral sciences: an introduction. – [S. l.] : Taylor and Francis, 2004. – 256 p.
23. Silkin V. A., Pautova L. A., Giordano M., Chasovnikov V. K., Vostokov S. V., Podymov O. I., Pakhomova S. V., Moskalemko L. V. Drivers of phytoplankton blooms in the northeastern Black Sea // Marine Pollution Bulletin. – 2019. – Vol. 138. – P. 274–284. – <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.042>
24. Yunev O. A., Moncheva S., Carstensen J. Long-term variability of vertical chlorophyll a and nitrate profiles in the open Black Sea: eutrophication and climate change // Marine Ecology Progress Series. – 2005. – Vol. 294. – P. 95–107. – <https://doi.org/10.3354/meps294095>

**SPATIAL DISTRIBUTION OF CHLOROPHYLL-A CONCENTRATION
IN HYDROLOGICAL, HYDROCHEMICAL AND HYDROPTICAL CONDITIONS
OF THE BLACK SEA IN SPRING 2021**

Krashennnikova S. B., Babich S. A.

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

Abstract: According to the data of cruise 116 of the R/V «Professor Vodyanitsky» in April — May 2021, the features of the spatial distribution of the concentration of chlorophyll-a (C_{hl}) were analyzed, taking into account hydrological, hydrochemical and hydrooptical environmental factors in the upper 50-meter layer of the northeastern part of the Black Sea. The influence of hydrological and hydrooptical environmental factors on the spatial distribution of chlorophyll-a (C_{hl}) concentration in the upper 50-meter layer of the northeastern part of the Black Sea by the data of 116 cruise of the R/V «Professor Vodyanitsky» in April — May 2021, were analyzed. The highest mean values of C_{hl} $2,3 \pm 0,7 \mu\text{g/l}$ were observed in the 0–20 m layer and the lowest $0,6 \pm 0,3 \mu\text{g/l}$ at 50 m in the region of the Southern Coast of Crimea (South Coast) and the Caucasus. In areas with maximum C_{hl} , high values of water temperatures ($13,3 \pm 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$), oxygen concentrations ($7,5 \pm 0,1 \mu\text{g/kg}$) at low salinity values ($18,4 \pm 0,1 \text{ psu}$) were revealed, which was confirmed by correlation analysis. Significant positive relationships were established between the concentration of chlorophyll-a and temperature ($r = 0,8$), oxygen ($r = 0,5$), turbidity ($r = 0,9$) and negative — with salinity ($r = -0,6$) in the 20 m layer in the Caucasus region. Similar connections are established at 50 m in the South Coast region. The highest C_{hl} values in areas with high oxygen concentrations indicate the accumulation of phytoplankton in them, which releases oxygen during photosynthesis. High turbidity values characterize the presence of suspended matter in these areas. After a warm winter, low C_{hl} values were observed in April 2021, by satellite observations was confirmed. The C_{hl} maximum observed in the deep part of the sea coincided with the temperature minimum, salinity maximum, which is associated with the rise of water from deeper layers to the surface due to Ekman pumping. The Rim current had a zonal orientation with two current velocity maxima (3.5 cm/s) near the SCC and (2.5 cm/s) and Caucasus coast. The surface waters circulation explains the largest area of distribution of chlorophyll-a with concentration $> 2,5 \mu\text{g/l}$ in the western part of the investigation region.

Keywords: temperature, salinity, Rim Current, turbidity, oxygen.

Сведения об авторах

Крашенинникова Светлана Борисовна кандидат географических наук, старший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», svetlanabk@mail.ru

Бабич Сергей Алексеевич ведущий инженер ЦКП НИС «Профессор Водяницкий» ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», setronix@bk.ru

*Поступила в редакцию 16.03.2022 г.
Принята к публикации 12.09.2022 г.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ГИДРОБИОЛОГИЯ

УДК 594.133–111.3:612.22

DOI: [10.21072/eco.2022.23.03](https://doi.org/10.21072/eco.2022.23.03)

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕМОЛИМФЫ ДВУСТВОРЧАТОГО
МОЛЛЮСКА АНАДАРЫ БРОУТОНА (*ANADARA BROUGHTONII*)
В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГИПОКСИИ ***

Андреева А. Ю., Кладченко Е. С., Кухарева Т. А., Рычкова В. Н.
ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь, Российская Федерация,
e-mail: andreevaal@gmail.com

Аннотация: В настоящее время актуальным направлением исследований в области физиологии водных организмов является оценка потенциального негативного воздействия последствий глобальных изменений климата на различные виды гидробионтов. Среди ключевых факторов, оказывающих прямое воздействие на водные организмы, обитающие в прибрежной зоне Мирового океана, на клеточном и молекулярном уровнях, доминирующая роль принадлежит гипоксии. В настоящей работе исследовано влияние кратковременной (24 ч) и длительной (72 ч) гипоксической нагрузки на клеточный состав гемолимфы, морфологию гемоцитов и внутриклеточное содержание активных форм кислорода (АФК) у промыслового двустворчатого моллюска анадары Броутона (*Anadara broughtonii*). В условиях эксперимента *in vivo* показано, что гипоксическая нагрузка не приводит к изменению клеточного состава гемолимфы анадар, а также не оказывает воздействия на морфологию гемоцитов. Вместе с тем кратковременная гипоксия (24 ч) приводит к снижению уровня продукции АФК гемоцитами. Продолжительный недостаток кислорода был сопряжён с восстановлением уровня АФК в амёбоцитах анадары, в то время как в эритроцитах уровень продукции АФК оставался ниже показателей контроля. Результаты настоящей работы свидетельствуют о наличии у анадары Броутона механизмов компенсации нехватки кислорода, которые позволяют поддерживать эффективность клеточных иммунных реакций гемоцитов за счёт восстановления способности к генерации АФК в период длительной гипоксии.

Ключевые слова: гипоксия, двустворчатые моллюски, гемолимфа, гемоциты, активные формы кислорода.

Введение

В настоящий момент распространение гипоксии в Мировом океане считается одним из основных факторов, определяющих снижение биологического разнообразия прибрежных экосистем. Наиболее существенным является формирование периодических или перманентных гипоксических акваторий в шельфовой континентальной зоне, поскольку она интенсивно используется для рыбного промысла и ведения аквакультурного хозяйства [Díaz, 2010; Turner at al., 2016]. Шельфовые макроорганизмы, среди которых многие имеют важное промысловое значение, как правило, характеризуются низкой степенью устойчивости к дефициту кислорода. Около 50 % прибрежных морских видов животных гибнут при содержании растворённого кислорода менее ~ 70 мкмоль \cdot кг⁻¹ [Vaquer-Sunyer, Duarte, 2008].

*Работа проводилась в рамках госзадания № 121102500161-4 «Закономерности организации иммунной системы промысловых гидробионтов и исследование влияния факторов внешней среды на функционирование их защитных систем».

Двустворчатые моллюски являются основными объектами массового выращивания в аквакультуре, многие виды считаются промысловыми и активно добываются в шельфовой зоне морей России и мира [Wijsman et al., 2019]. При этом, учитывая особенности их местообитания (литораль, небольшие глубины прибрежной зоны), а также прикрепленный образ жизни, данная группа организмов считается потенциально уязвимой для гипоксии [Tan, Zhang, Zheng, 2020]. Вместе с тем для многих промысловых видов двустворчатых моллюсков границы адаптивного потенциала к изменениям содержания растворённого кислорода остаются неисследованными. Устойчивость организма к гипоксии, как правило, ассоциирована со снижением биосинтеза белка, угнетением активности ферментов цикла Кребса и истощением запасов и продукции АТФ [Gorr et al., 2010]. Как следствие — дефицит кислорода может приводить к ослаблению питания моллюсков, снижению скорости роста личинок и взрослых особей. Пониженные концентрации растворённого кислорода негативно отражаются на выживаемости и скорости метаморфоза у личиночных стадий моллюсков [Welker et al., 2013]. Гипоксические условия зачастую ассоциированы с повышенным риском повреждения клеток [Hermes-Lima et al., 2015] и нарушениями их функций [Hermes-Lima et al., 2015]. Вышеуказанные эффекты отмечены у различных видов мидий (*Perna viridis*, *Mytilus coruscus*) и хамелий (*Chamelea gallina*) [Wang et al., 2012; Wang et al., 2014; Sui et al., 2016; Pampanin et al., 2002]. Показано, что глобальные изменения климата способствуют распространению и возникновению очагов заболеваний среди гидробионтов [Marcogliese, 2008]. Причиной снижения иммунитета двустворчатых моллюсков считается ухудшение их функционального состояния: изменение клеточного состава гемолимфы, уменьшение способности гемоцитов генерировать активные формы кислорода (АФК), ингибирование их фагоцитарной активности, рост смертности гемоцитов [Gagnaire et al., 2006; Wang et al., 2012].

В последние годы внимание исследователей сконцентрировано на оценке негативных последствий воздействия гипоксии на функциональное состояние коммерчески значимых видов двустворчатых моллюсков [Turner et al., 2016; Mackenzie et al., 2014]. Анадара Броутона (*Anadara broughtonii*) интенсивно выращивается в Китае, Японии и Корее [Wang et al., 2021]. В России анадара Броутона добывается на Дальнем Востоке и экспортируется в страны Азии [Афейчук, 2020]. Анадары населяют относительно стабильные по условиям сублиторальные зоны, где зарываются в песчаные и мягкие грунты. Аналогично другим бентосным организмам анадары часто испытывают периодический или стабильный дефицит кислорода вследствие интенсивной антропогенной нагрузки на прибрежные воды [Silina, 2006]. Особенностью этого вида моллюсков является наличие в гемолимфе гемоглобинсодержащих гемоцитов — эритроцитов [Kim et al., 2020]. Очевидно, что гемоглобин играет ключевую роль в процессе дыхания гемоцитов, что делает анадару Броутона интересным объектом исследования в области изучения особенностей клеточной адаптации к гипоксии.

Целью настоящей работы было исследование влияния гипоксии различной продолжительности на клеточный состав гемолимфы и морфофункциональные показатели гемоцитов анадары Броутона (*A. broughtonii*).

Материалы и методы

В работе использовали взрослых особей анадары (*A. broughtonii*, Schrenck, 1867) обоих полов (длина створки $90,5 \pm 8,0$ мм; масса с учётом раковин $226,6 \pm 10,9$ г; $n = 35$). Моллюсков отлавливали в прибрежной акватории Амурского залива (г. Владивосток, $43^{\circ}11'58.4''N$ $131^{\circ}55'09.4''E$) в июне 2021 г. В период акклимации к лабораторным условиям (1 неделя) моллюсков помещали в 50-литровые аквариумы с искусственной морской водой (солёность $33,0 \pm 0,5$ ‰), температуре 20 ± 1 °С, рН 8,0 и концентрации растворённого кислорода $7,8-8,3$ мг $O_2 \cdot л^{-1}$. Во время акклимационного периода моллюсков ежедневно кормили смесью микроводорослей.

Для моделирования экспериментальной гипоксии моллюсков разделили случайным образом на 3 группы по 10 особей. Контрольную группу содержали в аквариумах при условиях, соответствующих периоду акклимации. Экспериментальную гипоксию создавали в 80-литровых герметичных пластиковых аквариумах (плотность посадки 3–5 особей на 10 л воды). Концентрацию растворённого кислорода в аквариумах с моллюсками снижали путём барботажа газообразным азотом в течение 10–15 мин до достижения уровня 1,5–1,9 мг·л⁻¹. Время инкубации в условиях гипоксии составляло 24 ч и 72 ч. Концентрацию кислорода в воде контролировали в течение всего экспериментального периода при помощи кислородомера Ohaus Starter 300 D (США) и поддерживали на постоянном уровне за счёт периодической аэрации. Каждые 24 ч в экспериментальных аквариумах производили замену не менее половины воды для удаления продуктов обмена. По окончании экспериментального периода воздействия гипоксии проводили забор гемолимфы.

Гемолимфу (2–4 мл) отбирали из экстрапалиальной полости стерильным пластиковым шприцем объёмом 1 мл с иглой 22-го калибра. В работе использовали индивидуальные образцы клеток. После забора образцы гемолимфы немедленно помещали в стерильные пластиковые пробирки. Все манипуляции с клетками проводили при температуре 4 °С для предотвращения склеивания и агрегации гемоцитов. Образцы гемолимфы были отфильтрованы от крупных фрагментов и агрегатов (диаметр ячейки фильтра 20 мкм) и отцентрифугированы на рефрижераторной центрифуге Eppendorf 5430R (500 g, 5 мин). Клетки трижды отмывали от плазмы в эквивалентном объёме стерильной морской воды. По окончании отмывки часть концентрированных клеток гемолимфы моллюсков (1–2 мкл) использовали для приготовления мазков. Оставшуюся часть гемоцитов ресуспензировали в стерильной морской воде (концентрация клеток 2–4·10⁶ кл.·мл⁻¹) для анализа методом проточной цитометрии.

Мазки клеток гемолимфы фиксировали и окрашивали по комбинированному методу Паппенгейма (Мая — Грюнвальда и Романовского — Гимзы) [Золотницкая, 1987]. Идентификацию клеток гемолимфы, а также их морфометрический анализ проводили на флуоресцентном микроскопе Biomed PR-2 Lum (Россия) в проходящем свете. Клетки фотографировали на камеру Levenhuk C NG Series и анализировали с использованием компьютерной программы ImageJ 1.44r. Для каждого гемоцита проводили измерение наибольшего диаметра (без учёта псевдоподий), а также диаметра ядра. На каждом мазке проанализировано не менее 1000 клеток. Ядерно-цитоплазматическое отношение (ЯЦО) рассчитывали по следующей формуле (1):

$$\text{ЯЦО} = \text{диаметр ядра} / \text{диаметр гемоцита}. \quad (1)$$

Измерения цитометрических показателей гемоцитов моллюсков, а также определение клеточного состава гемолимфы проводили на проточном цитометре Cytomics FC500 (Beckman Coulter, США), оборудованном однофазным аргоновым лазером (длина волны 488 нм). Для определения типов гемоцитов в гемолимфе моллюсков суспензию клеток окрашивали флуоресцентным зондом SYBR Green I (Merck, Germany). Финальная концентрация красителя в пробе составляла 10 мкМ, время окрашивания — 30 мин в темноте при 4 °С. Клеточный состав гемолимфы определяли на основании распределения клеток по величине условного размера (прямое светорассеяние, FS) и уровня гранулярности (боковое светорассеяние, SS).

Уровень спонтанной (нестимулированной) продукции АФК гемоцитами моллюсков анализировали на основании интенсивности окрашивания клеток 2, 7-дихлорофлуоресцеин диацетатом (DCF-DA) (Merck, Germany). Рабочий раствор DCF-DA готовили путём разведения в диметилсульфоксиде (концентрация красителя 1 мМ·л⁻¹) и хранили при температуре –20 °С. Суспензию гемоцитов (1 мл) инкубировали с раствором DCF-DA (финальная концентрация красителя

в пробе $10 \text{ мкМ} \cdot \text{л}^{-1}$) в течение 30 минут в темноте при 4°C . Величину флуоресценции оценивали на однопараметрической гистограмме в канале FL1 цитометра (зелёный спектр флуоресценции).

Уровень смертности гемоцитов определяли при помощи окрашивания клеток йодистым пропидием (PI). Для окрашивания гемоцитов 10 мкл рабочего раствора PI ($200 \text{ мкМ} \cdot \text{л}^{-1}$) (Sigma Aldrich, Germany) добавляли к 1 мл суспензии клеток и инкубировали в течение 30 мин в темноте при 4°C . Доля мёртвых клеток в суспензии определялась на однопараметрической гистограмме флуоресценции красителя в канале FL2 проточного цитометра (жёлтая область спектра).

Нормальность распределения признаков проверяли при помощи теста Колмогорова — Смирнова. Различия между группами анализировали с помощью программного обеспечения RStudio версии 4.1.0 (R Core Team, 2021). Распределение функциональных и морфометрических показателей гемоцитов не подчинялось нормальному закону распределения, поэтому данные анализировали при помощи непараметрического критерия Манна — Уитни. Различия считали достоверными при $p \leq 0,05$. Данные представлены в виде среднего \pm ошибка среднего ($M \pm SE$).

Результаты

В гемолимфе анадары присутствуют 2 типа клеток: крупные гранулярные эритроциты и мелкие агранулярные амёбоциты (рис. 1). Клетки с наименьшим диаметром ($6,2 \pm 0,1 \text{ мкм}$), амёбоциты, характеризовались высоким ЯЦО ($0,60 \pm 0,01$), были округлой или неправильной формы, крупное ядро ($3,7 \pm 0,1 \text{ мкм}$) располагалось ацентрично и занимало большую часть базофильной цитоплазмы (рис. 1а). У некоторых клеток цитоплазма имела эозинофильную окраску. У данного типа клеток гранулы в цитоплазме не визуализировались.

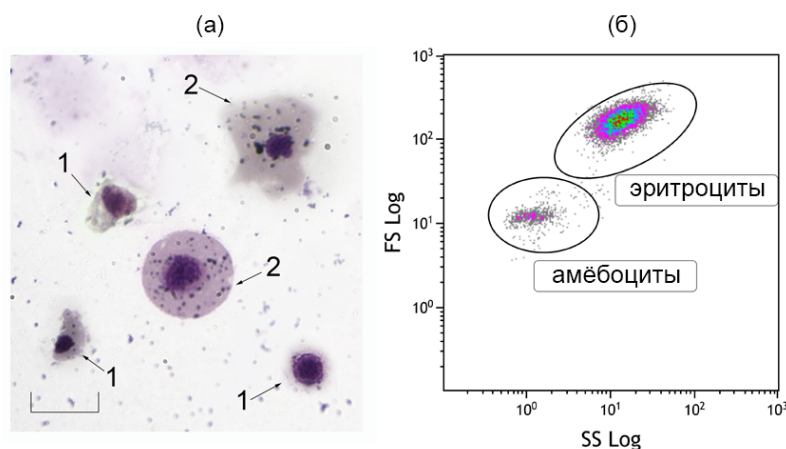


Рис. 1. Клеточный состав гемолимфы анадары Броутона (*A. Broughtonii*); (а) — морфология гемоцитов: 1 — амёбоциты различной аффинности, 2 — гемоглобинсодержащие эритроциты различной формы, линейка 10 мкм; (б) — распределение гемоцитов методом проточной цитометрии по относительному размеру и уровню гранулярности

Наиболее крупные клетки гемолимфы (средний диаметр $16,1 \pm 0,1 \text{ мкм}$), эритроциты, содержали гемоглобин, имели овальную, округлую либо амёбоидную форму, в базофильной цитоплазме присутствовали многочисленные (до 40 штук) гранулы. Эритроциты формировали большинство гемоцитов в суспензии, их доля составляла $95,6 \pm 0,9 \%$ от общего числа клеток. Доля амёбоцитов в гемолимфе не превышала $7,2 \%$ и составляла в среднем $4,3 \pm 0,8 \%$.

В результате воздействия гипоксии (24 ч и 72 ч) в гемолимфе *A. broughtonii* отмечалась тенденция к снижению доли амёбоцитов в суспензиях клеток, однако различия между экспериментальными группами были недостоверны (рис. 2).

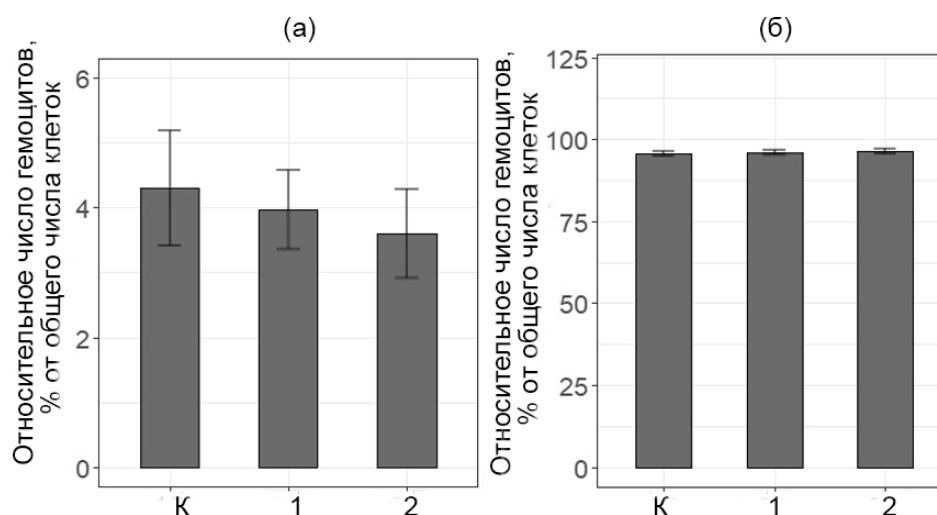


Рис. 2. Клеточный состав гемолимфы анадары Броутона (*A. broughtonii*) в условиях недостатка кислорода: (а) — доля амёбоцитов, (б) — доля эритроцитов; К — нормоксия, 1 — 24 ч гипоксии, 2 — 72 ч гипоксии

Анализ клеток гемолимфы анадар, подвергшихся воздействию недостатка кислорода, не засвидетельствовал выраженного эффекта на морфометрические характеристики гемоцитов. Размеры эритроцитов и амёбоцитов, а также значения ЯЦО соответствовали значениям клеток моллюсков контрольной группы (табл. 1).

Таблица 1

Морфометрические характеристики гемоцитов *A. broughtonii* в условиях ранжированной гипоксии

Группа	Эритроциты			Амёбоциты		
	Диаметр клетки, мкм	Диаметр ядра, мкм	ЯЦО	Диаметр клетки, мкм	Диаметр ядра, мкм	ЯЦО
контроль	16,1 ± 0,1	3,90 ± 0,02	0,200 ± 0,002	6,1 ± 0,1	3,7 ± 0,1	0,60 ± 0,01
24 ч	18,0 ± 0,1	4,50 ± 0,02	0,300 ± 0,001	6,3 ± 0,1	4,2 ± 0,1	0,70 ± 0,01
72 ч	16,7 ± 0,1	4,10 ± 0,02	0,200 ± 0,001	6,6 ± 0,2	3,7 ± 0,1	0,60 ± 0,01

В условиях нормоксии доля мёртвых гемоцитов составила $3,9 \pm 0,7$ %. Инкубация в условиях гипоксии не приводила к увеличению смертности гемоцитов в гемолимфе: доля мёртвых клеток в пробах составляла $1,8 \pm 1,1$ % и $3,8 \pm 0,6$ % спустя 24 ч и 72 ч дефицита кислорода соответственно.

У амёбоцитов и эритроцитов ($p \leq 0,05$) анадары (*A. broughtonii*), находящейся под воздействием кратковременной гипоксии (24 ч), отмечалось значительное снижение уровня флуоресценции DCF-DA. При этом эритроциты оказались более чувствительными к гипоксическому воздействию, поскольку у них изменения во внутриклеточной концентрации АФК были более выраженными в сравнении с амёбоцитами. Спустя 72 ч воздействия недостатка кислорода уровень спонтанной продукции АФК в амёбоцитах и эритроцитах вернулся к уровню нормоксии (рис. 3).

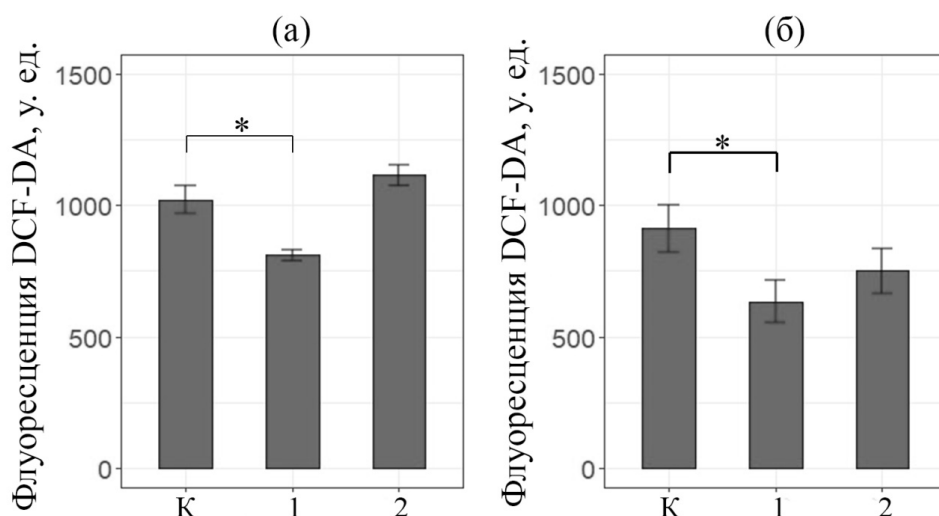


Рис. 3. Спонтанная продукция АФК гемоцитами *A. broughtonii* в условиях ранжированной гипоксии: (а) — уровень АФК в амёбоцитах, (б) — уровень АФК в эритроцитах, * — различия достоверны при $p < 0,05$. Анадары находились в условиях гипоксии ($1,5\text{--}1,9 \text{ мг } \text{O}_2 \cdot \text{л}^{-1}$) в течение 24 ч и 72 ч. На оси абсцисс представлены опытные группы: К — контроль (нормоксия), 1 — гипоксия 24 ч, 2 — гипоксия 72 ч

Обсуждение

Известно, что колебания условий водной среды, возникающие вследствие глобальных изменений климата, могут приводить к существенным сдвигам клеточного состава гемолимфы двустворчатых моллюсков [Matozzo, Marin, 2011]. В частности, многочисленные лабораторные исследования свидетельствуют о влиянии гипоксии на соотношение типов гемоцитов в гемолимфе двустворок. Так, в условиях экспериментальной гипоксии (24 ч при $2,6 \text{ мг } \text{O}_2 \cdot \text{л}^{-1}$) происходило увеличение доли агранулоцитов в гемолимфе *Magallana gigas* [Sussarellu et al., 2010]. В противоположность этим результатам экспериментальная гипоксия (24 ч при $0,3 \text{ мг } \text{O}_2 \cdot \text{л}^{-1}$) приводила к снижению доли агранулоцитов и увеличению доли гранулоцитов у мидий *M. galloprovincialis* [Andreyeva, Efremova, Kukhareva, 2019]. В отличие от перечисленных видов моллюсков, в гемолимфе представителей рода анадар, в частности *A. kagoshimensis*, помимо амёбоцитов, присутствует ещё один клеточный тип — эритроциты, содержащие гемоглобин [Kladchenko et al., 2020]. Однако, по результатам настоящего исследования, у анадары Броутона гипоксия не индуцировала изменений клеточного состава гемолимфы и не оказывала влияния на морфологические характеристики клеток, о чём свидетельствуют размерные характеристики гемоцитов, а также сходные значения ЯЦО у контрольной и экспериментальной групп. В литературе отсутствует информация о механизмах прямого воздействия недостатка кислорода на размеры и форму клеток беспозвоночных, хотя у устриц *M. gigas* отмечались нарушения формы гемоцитов при гипоксии (24 ч и 72 ч при $2,2 \text{ мг } \text{O}_2 \cdot \text{л}^{-1}$) [Andreyeva et al., 2021]. Вероятно, наблюдаемые изменения размеров клеток гемолимфы моллюсков, а также клеточного состава гемолимфы при гипоксическом воздействии являются следствием системных перестроек организма, а также вторичными процессами, возникающими в самих клетках в условиях нехватки кислорода. Принимая во внимание это предположение, очевидно, что реакция организма анадары на недостаток кислорода не была сопряжена с генерализованными изменениями функционального состояния моллюска, приводящими к сдвигам в системе гемолимфы.

Вместе с тем снижение способности гемоцитов к спонтанной продукции АФК, наблюдаемое спустя 24 ч экспериментальной гипоксии у всех клеток гемолимфы анадар, может свидетельствовать об уменьшении эффективности клеточного иммунного ответа в условиях кратковременного недостатка кислорода, поскольку индукция окислительного взрыва является основным механизмом нейтрализации патогенов у двустворок [Nappi, Ottaviani, 2000; Ghiselli et al., 2021]. Ранее было показано, что длительная гипоксия может приводить к уменьшению фоновой продукции АФК в гемоцитах мидий *P. viridis* [Wang et al., 2012]. При этом авторы отмечали угнетение остальных маркеров иммунного статуса гемоцитов, таких как способность к фагоцитозу, эстеразная активность и уровень лизосомальных ферментов. Однако, по данным настоящего эксперимента, более длительное (72 ч) нахождение в воде с низким содержанием кислорода, напротив, привело к восстановлению спонтанной продукции АФК и в эритроцитах, и в амёбоцитах анадар. При этом известно, что АФК в гемоцитах двустворчатых моллюсков образуются в результате деятельности дыхательной цепи митохондрий [Heise et al., 2003]. Между интенсивностью дыхания в клетках гемолимфы и способностью к генерации АФК отмечена прямая взаимосвязь [Donaghy et al., 2015]. Очевидно, что гипоксическая нагрузка сопряжена с угнетением клеточного дыхания, что, вероятно, обусловило снижение уровня спонтанной продукции АФК в гемоцитах анадары в первые сутки эксперимента. С другой стороны, известно, что представители рода *Anadara* в условиях дефицита кислорода способны задействовать альтернативные источники энергии, позволяющие компенсировать потребности метаболизма на фоне снижения окислительного фосфорилирования [Солдатов и др., 2009]. Результаты настоящего исследования косвенным образом согласуются с этими данным, поскольку снижение уровня спонтанной продукции АФК эффективно компенсировалось у всех типов клеток гемолимфы при продолжительной гипоксии.

Как видно из данных, гипоксическая нагрузка не оказывала влияния на размерные характеристики клеток гемолимфы анадары Броутона, а также не приводила к изменениям её клеточного состава. Отсутствие выраженных изменений в системе гемолимфы моллюсков свидетельствует об умеренном уровне испытываемого стресса в результате воздействия недостатка кислорода. Вместе с тем гипоксическая нагрузка, очевидно, была сопряжена с угнетением клеточного иммунного ответа в условиях кратковременного недостатка кислорода и стабилизацией уровня АФК в гемоцитах при длительной гипоксии. Последнее, вероятно, сопряжено с наличием у анадары Броутона механизмов компенсации недостатка кислорода, обеспечивающих поддержание функций клеток в период дефицита кислорода.

Список литературы

1. Афейчук Л. С. Состояние промысловых скоплений анадары Броутона (*Anadara Broughtonii*) в заливе Петра Великого (Японское море) по материалам 2019 года // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование : материалы XI нац. (всерос.) науч.-практ. конф. (24–25 марта 2020 г.) / Камчат. гос. техн. ун-т ; редкол.: В. И. Карпенко [и др.]. – Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2020. – С. 6–10.
2. Золотнищкая Р. П. Методы гематологических исследований // Лабораторные методы исследования в клинике : справочник / под ред. В. В. Меньшикова. – Москва : Медицина, 1987. – С. 106–148.
3. Солдатов А. А., Андреев Т. И., Сысоева И. В., Сысоев А. А. Тканевая специфика метаболизма у двустворчатого моллюска *Anadara inaequalvis* Вг. в условиях экспериментальной аноксии // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2009. – Т. 45, № 3. – С. 284–289.

4. Andreyeva A. Yu., Efremova E. S., Kukhareva T. A. Morphological and functional characterization of hemocytes in cultivated mussel (*Mytilus galloprovincialis*) and effect of hypoxia on hemocyte parameters // Fish & shellfish immunology. – 2019. – Vol. 89. – P. 361–367. – <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.04.017>
5. Andreyeva A. Yu., Gostyukhina O. L., Kladchenko E. S., Vodiasova E. A., Chelebieva E. S. Acute hypoxic exposure: effect on hemocyte functional parameters and antioxidant potential in gills of the pacific oyster, *Crassostrea gigas* // Marine Environmental Research. – 2021. – Vol. 169. – P. 105389. – <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105389>
6. Díaz R. J. Agriculture's impact on aquaculture: hypoxia and eutrophication in marine waters // Advancing the aquaculture agenda : workshop proc. / OECD. – Paris : OECD, 2010. – <https://doi.org/10.1787/9789264088726-en>
7. Donaghy L., Hong H. K., Jauzein C., Choi K. S. The known and unknown sources of reactive oxygen and nitrogen species in haemocytes of marine bivalve molluscs // Fish and shellfish immunology. – 2015. – Vol. 42, iss. 1. – P. 91–97. – <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2014.10.030>
8. Gagnaire B., Soletchnik P., Madec P., Geairon P., Le Moine O., Renault T. Diploid and triploid Pacific oysters, *Crassostrea gigas* (Thunberg), reared at two heights above sediment in Marennes-Oleron Basin, France: difference in mortality, sexual maturation and hemocyte parameters // Aquaculture. – 2006. – Vol. 254, iss. 1/4. – P. 606–616. – <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.10.008>
9. Ghiselli F., Iannello M., Piccinini G., Milani L. Bivalve molluscs as model systems for studying mitochondrial biology // Integrative and Comparative Biology. – 2021. – Vol. 61, iss. 5. – P. 1699–1714. – <https://doi.org/10.1093/icb/icab057>
10. Gorr T. A., Wichmann D., Hu J., Hermes-Lima M., Welker A. F., Terwilliger N., Wren J. F., Viney M., Morris S., Nilsson G. E., Deten A., Soliz J., Gassmann M. Hypoxia tolerance in animals: biology and application // Physiological and Biochemical Zoology. – 2010. – Vol. 83, iss. 5. – P. 733–752. – <https://doi.org/10.1086/648581>
11. Heise K., Puntarulo S., Pörtner H. O., Abele D. Production of reactive oxygen species by isolated mitochondria of the Antarctic bivalve *Laternula elliptica* (King and Broderip) under heat stress // Comparative Biochemistry and Physiology. Part C, Toxicology and Pharmacology. – 2003. – Vol. 134, iss. 1. – P. 79–90. – [https://doi.org/10.1016/S1532-0456\(02\)00212-0](https://doi.org/10.1016/S1532-0456(02)00212-0)
12. Hermes-Lima M., Moreira D. C., Rivera-Ingraham G. A., Giraud-Billoud M., Genaro-Mattos T. C., Campos É. G. Preparation for oxidative stress under hypoxia and metabolic depression: revisiting the proposal two decades later // Free Radical Biology and Medicine. – 2015. – Vol. 89. – P. 1122–1143. – <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2015.07.156>
13. Kladchenko E. S., Andreyeva A. Yu., Kukhareva T. A., Soldatov A. A. Morphologic, cytometric and functional characterisation of *Anadara kagoshimensis* hemocytes // Fish & Shellfish Immunology. – 2020. – Vol. 98. – P. 1030–1032. – <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.11.061>
14. Kim J. H., Lee H. M., Cho Y. G., Shin J. S., You J. W., Choi K. S., Hong H. K. Flow cytometric characterization of the hemocytes of blood cockles *Anadara broughtonii* (Schrenck, 1867), *Anadara kagoshimensis* (Lischke, 1869), and *Tegillarca granosa* (Linnaeus, 1758) as a biomarker for coastal environmental monitoring // Marine Pollution Bulletin. – 2020. – Vol. 160. – P. 111654. – <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111654>
15. Mackenzie C. L., Lynch S. A., Culloty S. C., Malham S. K. Future oceanic warming and acidification alter immune response and disease status in a commercial shellfish species, *Mytilus edulis* L. // PLoS One. – 2014. – Vol. 9, iss. 6. – P. e99712. – <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099712>
16. Marcogliese D. J. The impact of climate change on the parasites and infectious diseases of aquatic animals // OIE Revue scientifique et technique. – 2008. – Vol. 27, iss. 2. – P. 467–484. – <https://doi.org/10.20506/rst.27.2.1820>

17. *Matozzo V., Marin M. G.* Bivalve immune responses and climate changes: is there a relationship? // *Invertebrate survival journal*. – 2011. – Vol. 8, iss. 1. – P. 70–77.
18. *Nappi A. J., Ottaviani E.* Cytotoxicity and cytotoxic molecules in invertebrates // *BioEssays*. – 2000. – Vol. 22, iss. 5. – P. 469–480. – [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-1878\(200005\)22:5<469::AID-BIES9>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-1878(200005)22:5<469::AID-BIES9>3.0.CO;2-4)
19. *Pampanin D. M., Ballarin L., Carotenuto L., Marin M. G.* Air exposure and functionality of *Chamelea gallina* haemocytes: effects on haematocrit, adhesion, phagocytosis and enzyme contents // *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology*. – 2002. – Vol. 131, iss. 3. – P. 605–614. – [https://doi.org/10.1016/S1095-6433\(01\)00512-8](https://doi.org/10.1016/S1095-6433(01)00512-8)
20. *Silina A. V.* Spatial heterogeneity and long-term changes in bivalve *Anadara broughtoni* population: influence of river run-off and fishery // *Ocean Science Journal*. – 2006. – Vol. 41, iss. 4. – P. 211–219. – <https://doi.org/10.1007/BF03020624>
21. *Sui Ya., Kong H., Shang Yu., Huang X., Wu F., Hu M., Lin D., Lu W., Wang Yo.* Effects of short-term hypoxia and seawater acidification on hemocyte responses of the mussel *Mytilus coruscus* // *Marine pollution bulletin*. – 2016. – Vol. 108, iss. 1/2. – P. 46–52. – <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.001>
22. *Sussarellu R., Fabioux C., Le Moullac G., Fleury E., Moraga D.* Transcriptomic response of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* to hypoxia // *Marine genomics*. – 2010. – Vol. 3, iss. 3/4. – P. 133–143. – <https://doi.org/10.1016/j.margen.2010.08.005>
23. *Tan K., Zhang H., Zheng H.* Selective breeding of edible bivalves and its implication of global climate change // *Reviews in Aquaculture*. – 2020. – Vol. 12, iss. 4. – P. 2559–2572. – <https://doi.org/10.1111/raq.12458>
24. *Turner L. M., Alsterberg C., Turner A. D., Girisha S. K., Rai A., Havenhand J. N., Venugopal M. N., Karunasagar I., Godhe A.* Pathogenic marine microbes influence the effects of climate change on a commercially important tropical bivalve // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6, iss. 1. – P. 1–10. – <https://doi.org/10.1038/srep32413>
25. *Vaquier-Sunyer R., Duarte C. M.* Thresholds of hypoxia for marine biodiversity // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2008. – Vol. 105, iss. 40. – P. 15452–15457. – <https://doi.org/10.1073/pnas.0803833105>
26. *Wang Yo., Hu M., Cheung S. G., Shin P. K. S., Lu W., Li J.* Immune parameter changes of hemocytes in green-lipped mussel *Perna viridis* exposure to hypoxia and hyposalinity // *Aquaculture*. – 2012. – Vol. 356/357. – P. 22–29. – <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.06.001>
27. *Wang Yo., Hu M., Li Q., Li J., Lin D., Lu W.* Immune toxicity of TiO₂ under hypoxia in the green-lipped mussel *Perna viridis* based on flow cytometric analysis of hemocyte parameters // *Science of the total environment*. – 2014. – Vol. 470/471. – P. 791–799. – <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.060>
28. *Wang Yi., Zheng Yi., Dong J., Zhang X.* Two-sided effects of prolonged hypoxia and sulfide exposure on juvenile ark shells (*Anadara broughtonii*) // *Marine Environmental Research*. – 2021. – Vol. 169. – P. 105326. – <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105326>
29. *Welker A. F., Moreira D. C., Campos É. G., Hermes-Lima M.* Role of redox metabolism for adaptation of aquatic animals to drastic changes in oxygen availability // *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology*. – 2013. – Vol. 165, iss. 4. – P. 384–404. – <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2013.04.003>
30. *Wijsman J. W. M., Troost K., Fang J., Roncarati A.* Global production of marine bivalves. Trends and challenges // *Goods and services of marine bivalves* / eds: A. C. Smaal [et al.]. – Cham, Switzerland : Springer, 2019. – P. 7–26. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-96776-9_2

FUNCTIONAL PARAMETERS OF THE BIVALVE MOLLUSK ARK SHELL (*ANADARA BROUGHTONII*) HEMOLYMPH UNDER EXPOSURE TO HYPOXIA

Andreyeva A. Yu., Kladchenko E. S., Kukhareva T. A., Rychkova V. N.

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

Abstract: Investigation of negative consequences of significant climate change on various types of aquatic organisms is an actual area of physiological research. Among key factors directly influencing aquatic organisms inhabiting coastal waters of the World Ocean at cellular and molecular levels, hypoxia plays a major role. In the present work, we studied the effect of short-term (24 h) and long-term (72 h) hypoxia on hemolymph cellular composition, hemocyte morphology, and intracellular reactive oxygen species (ROS) content in the commercial bivalve (*Anadara broughtonii*). Under the experiment *in vivo*, we showed that hypoxia is not associated with shifts in the hemolymph cellular composition of the ark shell, and also does not affect the morphology of hemocytes. At the same time, short-term hypoxia (24 h) lead to a decrease in the level of ROS production by hemocytes. Results of the present work indicate that ark shell possesses mechanisms that compensate oxygen deficiency; these mechanisms allow maintaining the efficacy of hemocyte cellular immune reactions by recovery of the level of spontaneous ROS production under prolonged hypoxia.

Keywords: hypoxia, bivalves, hemolymph, hemocytes, reactive oxygen species.

Сведения об авторах

Андреева Александра Юрьевна	кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», andreevaal@gmail.com
Кладченко Екатерина Сергеевна	научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», kladchenko_ekaterina@bk.ru
Кухарева Татьяна Александровна	кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», altali@yandex.ru
Рычкова Валентина Николаевна	младший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», novitsky_valya@mail.ru

Поступила в редакцию 14.06.2022 г.

Принята к публикации 09.08.2022 г.

**ТЕСТИРОВАНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ФИНСКОГО ЗАЛИВА
ПО ВЫЖИВАЕМОСТИ АМФИПОД И КАРДИОАКТИВНОСТИ
МОЛЛЮСКОВ-УНИОИД ***

Березина Н. А.¹, Шаров А. Н.², Максимов А. А.¹, Холодкевич С. В.²

¹*Зоологический институт Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: nadezhda.berezina@zin.ru*

²*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской
академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Аннотация: В этой статье представлены результаты комбинированной оценки донных отложений с разных участков восточной части Финского залива (Балтийское море) и определения содержания загрязняющих веществ (нефтепродукты, металлы, оловоорганические соединения). Результаты получены с использованием биотестирования по выживаемости амфипод *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899) и по сердечной активности двусторчатых моллюсков *Anodonta anatina* (Linnaeus, 1758). Выживаемость амфипод коррелировала с содержанием трибутилолова (ТВТ), тяжёлых металлов, особенно свинца, а кардиорезистентность (время восстановления сердечного ритма после нагрузки) моллюсков оказалась наиболее чувствительной к загрязнению нефтепродуктами. Вместе с тем оба вида-индикатора выявили нарушенное состояние среды обитания на одних и тех же станциях. Продемонстрированы хорошая индикативность обоих показателей в отношении потенциальной токсичности донных отложений и важность их комбинированного применения, поскольку указанные виды чувствительны к воздействию разного рода загрязнений. Такие особенности могут быть связаны с жизнедеятельностью использованных в качестве тест-объектов видов животных.
Ключевые слова: биотестирование, биомаркеры, донные отложения, зообентос, Балтийское море.

Введение

Одна из наиболее значимых, фундаментальных научных проблем последнего десятилетия — это оценка состояния экосистем водоёмов в условиях меняющегося климата и одновременного воздействия антропогенных факторов. В России развитие мониторинга пресноводных и морских экосистем признано актуальной задачей, решение которой требует разработки новых методов и поиска чувствительных индикаторов для оценки качества водной среды.

Согласно современным представлениям и мировому опыту оценка эколого-токсикологического состояния водной среды уже невозможна без биологических показателей и данных оценки интегральной токсичности с помощью биотестирования [Бакаева, Никаноров, 2015]. Биотестирование (англ. bioassay) — это процедура установления токсичности среды с помощью тест-объектов (живых организмов), сигнализирующих о её потенциальной опасности для этих организмов, независимо от того, какие вещества и в каком сочетании вызывают изменения их жизненно важных функций. Благодаря оперативности и доступности биотестирование широко используется во всём мире наряду с методами аналитической химии. Для успешной оценки и мониторинга загрязнения морской среды необходимо выявлять и рекомендовать эффективные чувствительные биоиндикаторы с учётом региональной специфики.

*Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 122031100274-7 и 122041100085-8 и частично при финансовой поддержке проекта ER90 HAZLESS Программы приграничного сотрудничества «Россия — Эстония» на 2014–2020 гг.

Отбор чувствительных тест-объектов с анализом показателей их состояния, отражающих связь между качеством окружающей среды и здоровьем живого организма, актуален и для Финского залива Балтийского моря. В этом регионе химическое загрязнение и периодически возникающая гипоксия придонных вод (из-за затоков) являются одними из основных факторов, ответственных за ухудшение качества среды обитания. При этом относительно мало известно о воздействии вредных веществ на биологические показатели донных животных, населяющих этот район. В Финском заливе макробентос обеднён, что связано с естественными гидрометеорологическими процессами, в частности с уменьшением речного стока и ухудшением кислородного режима глубинных вод [Максимов, Петухов, 2011]. Вместе с тем именно донные беспозвоночные, непосредственно связанные с донными отложениями, могут стать одними из лучших индикаторов их состояния. При этом важен выбор чувствительных показателей животных-биоиндикаторов, которые хорошо отражают состояние донных местообитаний. Из всех представителей бентосных сообществ моллюски и ракообразные наиболее часто используются в качестве тест-объектов в биомониторинге загрязнения окружающей среды.

Целью настоящей работы стало биотестирование качества донных отложений по показателям выживаемости амфипод и кардиорезистентности моллюсков в комбинации с аналитическим определением содержания тяжёлых металлов, оловоорганических соединений и полиароматических углеводородов в донных отложениях из глубоководных местообитаний (зон наибольшего накопления осадков и загрязнений) восточной части Финского залива. Основными критериями отбора тест-объектов были: хорошая представленность в незагрязнённых местообитаниях и лёгкость отлова организмов, связь со взвешенными веществами и донными отложениями, адаптированность к естественным колебаниям условий среды в заливе и пригодность для экспериментальных исследований.

Амфипода *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899) появилась в Балтийском море более сорока лет назад [Berezina, Panov, 2003]. Этот вид обилен в сообществах мелководных опреснённых заливов северо-восточной части моря. Рачок в основном питается детритом, водорослями и мелкими беспозвоночными. В Балтийском море продолжительность жизни *G. fasciatus* составляет 1,5 года с репродуктивной паузой зимой. Благодаря высокой плодовитости (8–45 яиц в кладке в зависимости от длины тела самки) при нескольких кладках в течение года он достигает высокой численности. Все эти характеристики делают *G. fasciatus* привлекательным видом для биотестирования донных отложений и мониторинга окружающей среды в регионе Балтийского моря [Berezina et al., 2013].

Биотестирование по выживаемости ракообразных остаётся очень эффективным методом оценки качества вод. Бентосные амфиподы обладают большим потенциалом в тестировании токсичности отложений, поскольку они тесно связаны с отложениями либо благодаря своей роющей активности, либо заглатыванию частиц отложений [Bat, 2005]. Амфипод широко использовали для 10-дневных тестов на выживание в донных отложениях [Nipper, Greenstein, Bay, 1989; Chapman et al., 2021; Matthiessen et al., 1998; Bat, 2005; Strode, Balode, 2013; Berezina et al., 2013; Podlesińska, Dąbrowska, 2019].

Двустворчатые моллюски *Anodonta anatina* (Linnaeus, 1758) широко распространены в Невской губе и восточной части Финского залива Балтийского моря. Встречается этот вид преимущественно в прибрежной части, на глубинах от нескольких сантиметров до нескольких метров, на песчаном, песчано-илистом и глинисто-песчаном дне. Большую часть времени моллюски проводят на одном месте, углубившись в песок и выставив верхнюю часть с ресничным отверстием. Питаются, как и все Unionidae, детритом, взвешенным в придонной воде, и мелкими планктонными организмами. Их тип питания и ограниченная подвижность, а также сравнительно большая продолжительность жизни (до 15 лет) делают этих моллюсков чувствительными к нарушениям среды обитания при загрязнении и хорошим индикатором состояния окружающей среды [Oliveira et al., 2015].

Реакция кардиосистемы моллюсков может рассматриваться как интегральный ответ организма на изменение факторов среды обитания [Depledge et al., 1996]. Частота сердечных сокращений (HR) отражает интенсивность физиологических процессов, а также во многих случаях позволяет судить о функциональном состоянии организма в целом. В последние годы появились неинвазивные методы регистрации кардиоактивности [Способ биологического мониторинга ... , 2006], что сделало возможным и удобным измерение сердечного ритма моллюсков в природных и лабораторных условиях [Шаров, Холодкевич, 2015].

Материал и методы

Донные отложения

Пробы донных отложений (серые и бурые илы) собраны в августе 2015 г. во время рейса на катамаране Centaurus-II на пяти глубоководных и одной мелководной станциях в местообитании тест-объектов в Финском заливе Балтийского моря (рис. 1, табл. 1). Также отбиралась придонная вода и проводились измерения вертикальных профилей гидрофизических параметров в морской среде: солёности и температуры воды с помощью океанологического зонда CTD SBE 19plus V2 с системой карусельного типа для отбора проб воды SBE32SC (Sea-Bird Scientific, США). Зонд оборудован розеткой с набором батометров для отбора проб воды с заданных горизонтов. Содержание кислорода измеряли в придонной воде методом Винклера [Standard methods ... , 1925]. В пробах донных отложений содержание органического углерода (C) определяли методом Тюрина (% на сухой вес донных отложений [Аринюшкина, 1961]).

Амфиподы *G. fasciatus* и моллюски *A. anatina* были использованы при тестировании донных отложений, животные были собраны из их популяций в восточной части Финского залива, в районе парка «Дубки» (Сестрорецк, ст. 1 или Ref.), и перевезены в изотермических контейнерах в лабораторию.

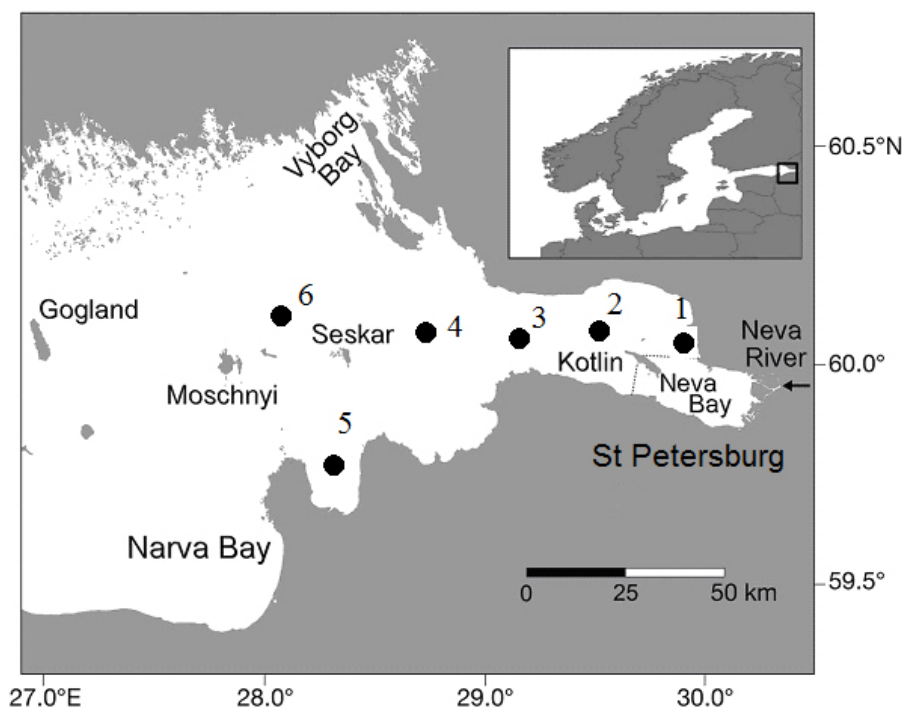


Рис. 1. Карта-схема восточной части Финского залива с отмеченными местами отбора проб (станции 2–6) и тестируемых животных (станция 1). Станции: 1 (Сестрорецк, фоновая), 2 (2F), 3 (4F), 4 (2U), 5 (2L), 6 (17F)

Выживаемость амфипод

Проведён 10-суточный тест на выживаемость, который основан на процедурах, описанных в рекомендациях [Guidelines for general biological ... , 1998; Berezina et al., 2013], с амфиподой *G. fasciatus* (рис. 2а). Испытательная установка состояла из стеклянных стаканов объёмом 1 л со слоем исследуемого осадка 3 см (~ 100 г), приготовленного из мелкой фракции осадков (просеянных через сито 0,25 мм).

После 2-дневного периода акклиматизации в каждый химический стакан вводили по 20 подопытных животных. Во время проверочных экспериментов воду в тестовых стаканах (1 л) осторожно аэрировали аквариумным насосом через наконечник пипетки, расположенный на 2 см выше осадка. Стаканчики хранили при постоянной температуре (10 °С) и условиях 12 : 12 (свет : темнота). Амфипод ежедневно кормили смесью корма для рыб (ТетраМин®) и сушёных водорослей (1 : 3). В результате этой экспериментальной процедуры концентрация растворённого кислорода, температура, солёность и рН поддерживались на одном уровне от начала до конца воздействия.

После экспозиции вышележащую воду осторожно декантировали, а осадок просеивали через сито с отверстиями диаметром 0,5 мм для удержания амфипод, которых затем промывали в стеклянной посуде, подсчитывали и взвешивали. Выживаемость амфипод в каждом варианте рассчитывали как процент живых особей в конце теста по отношению к исходной численности.

Кардиоактивность моллюсков

В лаборатории моллюски были в течение трёх суток акклимированы к условиям содержания. Они содержались в 100-литровом аквариуме с фильтрованной водопроводной водой с добавлением морской соли, аквариум был оснащён системой аэрации (O₂, 9 г/л) и фильтрации (Eheim Professional 4) воды при искусственном освещении (12 светлых / 12 тёмных часов) и температуре воды 18 °С. На створки моллюсков в область сердца цианоакрилатным клеем были наклеены миниатюрные сёдла, в которых закреплялись волоконно-оптические датчики для регистрации ритма сердца [Kholodkevich et al., 2017]. Моллюсков в период акклимации кормили сухими водорослями.

Для тестирования донных отложений 48 моллюсков с длиной раковины 64–74 мм были случайным образом отобраны и распределены по 8 экз. в пластиковых 20-литровых аквариумах с донными отложениями. Были сформированы 6 групп: контрольная (очищенный песок со ст. 1) и 5 вариантов с 5-сантиметровым слоем донных отложений со станций залива. Солёность добавляемой воды соответствовала солёности на соответствующей станции. Время экспозиции на всех типах донных отложений составило 30 суток.

Частоту сердечных сокращений (HR) и время восстановления (Trec) тестируемых моллюсков после стресса до фонового уровня использовали в качестве маркера их физиологического статуса после окончания экспозиции. Измерение HR проводили индивидуально на каждой особи. Длина моллюсков была от 68 до 74 мм. Использовался неинвазивный волоконно-оптический метод [Kholodkevich et al., 2017]. Сердечная мышца моллюска модулировала периодические изменения отражения и рассеяния света низкоинтенсивного полупроводникового лазера. Оптический сигнал поступал с датчика, закреплённого на поверхности раковины моллюска, на цифровой фотоплетизмограф (ЛВОФ-3, ООО «НИЦ "Экоконтур"», Россия). Анализ кардиограммы проводили с помощью программного обеспечения VarPulse 8.6 (Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности, Россия). Средние значения частоты сердечных сокращений регистрировали по данным фотоплетизмограммы после стабилизации ритма на постоянном уровне в течение не менее двух часов.

Испытуемых моллюсков помещали на 1 ч в воду с повышенной солёностью (её получали путём добавления раствора NaCl до концентрации 6 г/л). Время восстановления частоты сердечных сокращений (Trec) измеряли как время (мин), необходимое для восстановления их сердечного ритма до фонового уровня.

Экологическое состояние исследуемых участков классифицировали по пятибалльной шкале: 1 — высокое, 2 — хорошее, 3 — удовлетворительное, 4 — критическое и 5 — плохое (табл. 1). Различные биологические эффекты (измеренные как «выживаемость амфипод» (Surv) и «время восстановления сердечного ритма к фоновому уровню у моллюсков» (Trec)) сравнивались с показателями в норме или с фоновыми значениями, то есть в не затронутом загрязнением местообитании, в данном случае — с показателями на ст. 1.

Таблица 1

Количественные критерии оценки экологического состояния исследуемых районов на основе показателей — выживаемости амфипод (Surv) и времени восстановления пульса моллюсков (Trec)

Показатель/класс качества	1	2	3	4	5
Состояние	<i>Отличное</i>	<i>Хорошее</i>	<i>Удовлетворительное</i>	<i>Плохое</i>	<i>Очень плохое</i>
Выживаемость амфипод, %	100–90	89–70	69–50	49–30	< 29
Время восстановления пульса, % от контроля	0–10	11–50	51–100	101–150	> 150

Анализ донных отложений

Анализ содержания металлов (Cu, Zn, Pb, Cd, Fe и Mn) проводили с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) масс-спектрометром Agilent 7700x (Япония). Точность измерения контролировалась с использованием сертифицированного стандарта (CRM 5365-90) и обеспечивала подходящее извлечение (< 5 %). Согласно [Карандашев и др., 2015] пробы грунта перед анализом высушивали в печи при 30 °С и просеивали через пластиковое сито с диаметром пор 1 мм. Проходящую фракцию измельчали в агатовой ступке и расщепляли, используя комбинацию сверхчистых кислот HCl/HF/HNO₃ (1 : 1 : 1) в микроволновой печи Mars 5 (СЕМ, США). Продукты расщепления переносили в полипропиленовые флаконы, разбавляли до 50 мл деионизированной водой [Вода для лабораторного ... , 1987] и анализировали.

Анализ содержания полициклических ароматических гидрокарбонатов (ПАУ) проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на флуоресцентном детекторе [Методика выполнения измерений ... , 2009]. Анализ соединений ПАУ в отложениях в основном включает экстракцию органическими растворителями, очистку и разделение с помощью ВЭЖХ с ультрафиолетовым излучением.

Концентрации оловосодержащих соединений определяли методом газовой хроматографии на масс-спектрометре GS-МС [Качество почвы. Определение ... , 2018]. Подготовка проб осадка для определения ТВТ, процедуры экстракции и анализа описаны [Cole et al., 2015].

Донные отложения в основном (60–70 %) состояли из пелитовой (размер частиц < 0,01 мм) и алевритовой (0,01–0,05 мм) фракций и имели большое сходство между участками. Фракция песка (0,05–2 мм) колебалась от ничтожных значений (< 3 %) на ст. 6 и от 4–8 до 13 % на ст. 3–5. Аноксия на поверхности осадка и гипоксия в придонной воде не наблюдались, хотя значительное понижение содержания кислорода отмечено на станции 2F (2,8 мл/л, табл. 2). Глубина насыщенного кислородом слоя (отложения серого цвета) составляла около 5 см на станциях 2–4, но не превышала 1 см на участке 1. Общий органический углерод в отложениях колебался в пределах 0,5–7,1 % (табл. 2).

Статистика

Были рассчитаны средние со стандартными ошибками для HR и Trec, а также средние величины и их стандартные отклонения для показателя выживаемости амфипод. Проведён анализ корреляционной связи с использованием рангового коэффициента корреляции Спирмена. Значимыми корреляции считались при $p < 0,05$. При проведении сравнений с контролем использован критерий Манна — Уитни.

Таблица 2

Физико-химические характеристики придонных условий на станциях отбора и донных отложений в период отбора проб

Станция	Координаты	H	S	O ₂	C	Cd	Cu	Pb	Zn	ТВТ	ПАУ	НП
Ref.	60.080N, 29.920E	1–2	0,8	8,8	0,5	1	30	10	35	<10	45	<50
2F	60.083N, 29.501E	23	3,2	2,8	1,2	0,4–0,5	32	26–37	126	32	65	130
4F	60.064N, 29.193E	28	4	4,9	2,1	0,7–1	47	65–55	174	71	45	200
2U	60.084N, 28.717E	36	4,5	3,8	3,1	3,4–1,1	51	67–68	198	240	61	180
2L	59.907N, 28.179E	33	3,3	6,6	7,0	0,7–0,8	24	27–30	120	39	50	140
17F	60.115N, 28.179E	52	5,2	4,0	7,1	1,4–1,9	57	51–60	210	174	158	230

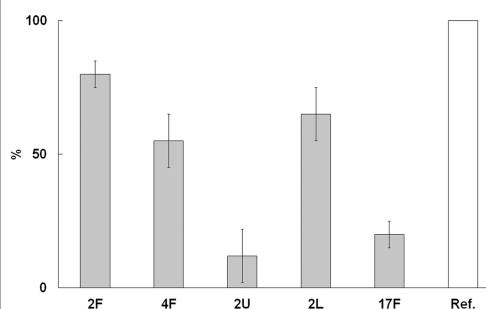
Примечания: H — глубина (м); S — солёность (г/л); O₂ — содержание кислорода в слое придонной воды (мл/л); C — содержание органического углерода в донных отложениях (%); Cd, Cu, Pb, Zn — содержание металлов (мг/кг с. в. (сухого вещества)); содержание оловосодержащих соединений — трибутилолова (ТВТ), полиароматических углеводородов (ПАУ) и нефтепродуктов (НП) (мкг/кг с. в. донных отложений).

Результаты и обсуждение

Оценка токсичности донных местообитаний (отложений) по выживаемости амфиподы *G. fasciatus* выявила несколько неблагоприятных участков (рис. 2). В контрольной пробе выживаемость составила 100 %, в то время как минимальная выживаемость (< 20 %) была обнаружена для донных отложений на станциях 2U и 17F.



(а)



(б)

Рис. 2. Результаты оценки качества местообитаний по выживаемости (%) амфипод *G. fasciatus* (10-дневный тест); а — фото рачка, б — средняя выживаемость и стандартное отклонение (%)

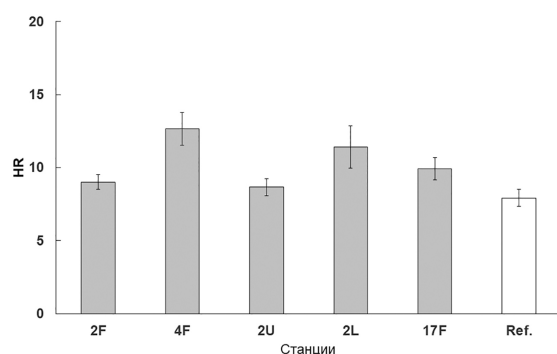
Частота сердечных сокращений варьировала в среднем от 8 до 13 ударов в минуту (рис. 3). Значимые отличия от фоновых значений (ст. Ref.) получены для моллюсков, экспонируемых с донными отложениями со станций 4F и 2L, они на 60 и 44 % соответственно превышали значения в контрольной пробе. При этом корреляций с измеренными характеристиками среды не обнаружено (табл. 3).

Наибольшее время восстановления HR (125 мин) моллюсков отмечено для донных отложений со станции 17F, оно в 2,5 раза выше, чем в контрольной пробе (46 мин). На станциях 4F и 2U превышение контрольных показателей составило > 100 %, что свидетельствует о переходе за порог хорошего и удовлетворительного качества среды (табл. 2).

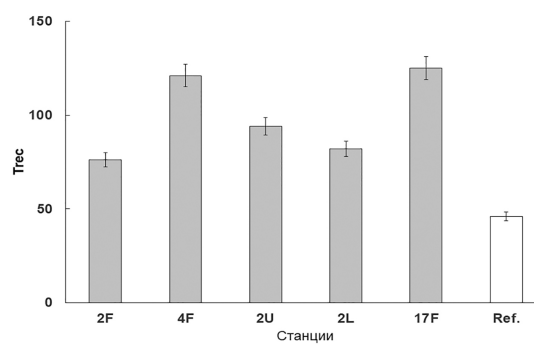
Показатели моллюсков и амфипод коррелировали с содержанием металлов, нефтепродуктов и оловосодержащих соединений (табл. 3). Также была обнаружена значимая обратная связь между временем восстановления сердечного ритма (кардиорезистентностью) моллюсков и выживаемостью амфипод (−0,83; p = 0,03).



(а)



(б)



(в)

Рис. 3. а — моллюски *A. anatina* во время тестирования, б — частота сердечных сокращений (HR), в — время восстановления частоты сердечных сокращений после нагрузки (Trec); приводится среднее значение и стандартная ошибка, n = 8

Таблица 3

Корреляции показателей и факторов среды

Показатель	Surv	p	HR	p	Trec	p
S	-0,94	0,003	0,37	NS	0,94	0,003
O ₂	0,43	NS	0,08	NS	-0,25	NS
C	-0,71	NS	0,49	NS	0,77	NS
Cd	-0,6	NS	-0,43	NS	0,31	NS
Cu	-0,77	NS	0,03	NS	0,77	NS
Pb	-0,99	0,003	0,26	NS	0,83*	0,03
Zn	-0,92	0,01	0,03	NS	0,73	NS
ТБТ	-0,94	0,03	0,37	NS	0,83*	0,03
ПАУ	-0,45	NS	0,66	NS	0,77	NS
НП	-0,83	0,03	0,60	NS	0,99	0,003
Surv	—	—	-0,25	NS	-0,83*	0,03

Примечания: S — солёность воды, O₂ — содержание кислорода, C — содержание углерода, НП — содержание нефтепродуктов; Surv — выживаемость, HR — частота сердечных сокращений, Trec — время восстановления сердечного ритма моллюсков; NS — связь недостоверна (p > 0,05)

Результаты показали, что показатели смертности амфипод (> 80 %) были самыми высокими на станциях 2U и 17F, что свидетельствует о высокой токсичности отложений. Донные отложения со станции 17F характеризовались высоким содержанием нефтепродуктов, ТВТ и свинца, что приводило к высокой смертности амфипод и увеличенному времени восстановления HR моллюсков (125 мин). На этой станции также выявлена наибольшая солёность придонной воды (5,2). Донные осадки в районах Лужской губы (2L) и Кронштадта (2F), согласно критериям качества для Трес (табл. 2), были в удовлетворительном состоянии, а по показателю выживаемости амфипод — в хорошем и удовлетворительном состоянии, что подтверждается и невысокой концентрацией загрязняющих веществ в донных отложениях.

Связь измеренных показателей с уровнем кислорода на станциях не обнаружена, что, видимо, связано с отсутствием выраженных гипоксических условий (< 3 мг/л) в период наблюдения и в эксперименте. Концентрация кислорода в придонном слое воды на тестируемых станциях залива колебалась от 2,8–6,6 (мл/л) или 4,0–9,4 (мг/л).

В целом моллюски наиболее чувствительны к загрязнению нефтепродуктами, а амфиподы больше реагировали на повышенное содержание ТВТ и тяжёлых металлов, особенно свинца (табл. 3). Таким образом, показаны, во-первых, хорошая индикативность обоих показателей (смертность амфипод и Трес моллюсков) в отношении потенциальной токсичности донных отложений и, во-вторых, важность применения обоих показателей в комбинации, поскольку они показывают чувствительность к воздействию разного рода загрязнений. Такие особенности могут быть связаны с жизнедеятельностью использованных в качестве тест-объектов видов животных.

Высокая чувствительность моллюсков при загрязнении нефтепродуктами показана ранее [Sukharenko, Nedzvetsky, Kyrychenko, 2017]. При изучении адаптации к присутствию растворённых нефтепродуктов у двустворчатого моллюска — мидии съедобной *Mytilus edulis* Linnaeus, 1758, обитающей в Белом море, наблюдался рост частоты сердечных сокращений при концентрациях 8,0 и 38,0 мг/л [Бахмет и др., 2012]. При действии высоких доз нефтепродуктов в морской воде (38,0 мг/л) снижалось содержание холестерина и арахидоновой кислоты в тканях моллюсков, что и приводит к нарушению физиологических функций моллюска, включая характеристики сердечного ритма. Двустворчатые моллюски широко используются в биомониторинге для обнаружения как биоаккумуляции углеводородов, так и биологических реакций на загрязнение нефтью [Cajaraville et al., 2000; Hylland et al., 2008; Turja et al., 2013]. Моллюски фильтруют взвешенные вещества из придонного слоя воды и поверхности донных отложений, где, как правило, аккумулируются нефтепродукты.

Амфиподы чувствительны к более широкому спектру загрязнений, включая нефтепродукты и ароматические углеводороды, содержащиеся в воде [Camus, Olsen, 2008; Turja et al., 2014]. Ранее обнаруживалась чувствительность амфипод к тяжёлым металлам и ТВТ в донных отложениях [Strode, Balode, 2013; Jacobson et al., 2011]. Амфиподы способны зарываться в донные отложения и питаться их частицами, таким путём накапливая в тканях вещества, ассоциированные с частицами грунта, в частности металлы и оловосодержащие соединения. При достижении определённого порога содержания такие донные отложения могут приводить к повышенной смертности организма. Эти пороговые концентрации составляют для ТВТ > 70 мкг/кг, а для металлов Zn и Pb > 120 и 60 мг/кг соответственно.

Важно также, что оба показателя (выживаемость амфипод и кардиорезистентность) были чувствительны к солёности воды (получены высокие корреляции). Это необходимо учитывать при использовании предложенных видов в тестах: солёность должна быть в диапазоне толерантности видов. Для взрослых особей амфиподы *G. fasciatus* верхняя граница толерантности к солёности воды составляет 4–6 ppt [Berezina, Panov, 2003], хотя в природных условиях, в частности в эстуарии р. Невы, их распространение ограничено солёностью выше 2 ppt из-за неудачного

размножения (эмбрионы и новорождённые особи чувствительны к солёности выше этого предела). Моллюски *A. anatina* и другие представители Anodontini адаптированы к жизни в воде солёностью до 6 ppt [Комендантов, Хлебович, Аладин, 2021], а на личиночных стадиях могут быть восприимчивы как к увеличению солёности воды > 2,9, так и к её понижению < 0,7 ppt [Beggel, Geist, 2015].

Выводы

Выбор подходящих организмов является важным шагом в разработке программ биомониторинга. Использование донных беспозвоночных (амфиподы *G. fasciatus* и моллюски *A. anatina*) как индикаторов для оценки качества донных отложений Финского залива показало их хорошую индикаторную реакцию на множественные стрессоры естественного и антропогенного происхождения. Применённые показатели выживаемости амфипод и кардиоактивности моллюсков при биотестировании донных отложений показали хорошую применимость, сопряжённость между самими показателями и уровнем загрязнения металлами, оловосодержащими соединениями и нефтепродуктами. Предложенные индикаторы позволяют быстро и экономически выгодно выявлять участки с повышенным риском накопления тех или иных опасных веществ и высоким уровнем потенциальной токсичности донных отложений для донной фауны, что должно получить дальнейшее развитие для целей регионального мониторинга.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников РГГМУ Т. Р. Еремину за организацию рейса, А. В. Исаева и О. В. Владимирову — за помощь в отборе проб и предоставленные данные по гидрохимии воды.

Список литературы

1. Ариццикина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1961. – 491 с.
2. Бакаева Е. Н., Никаноров А. М. Биологические подходы к оценке экотоксикологического состояния водных экосистем // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2015. – № 1 (185). – С. 72–83.
3. Бахмет И. Н., Фокина Н. Н., Нефедова З. А., Руоколайнен Т. Р., Немова Н. Н. Мидия *Mytilus edulis* L. Белого моря как биоиндикатор при воздействии растворённых нефтепродуктов // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2012. – № 2. – С. 38–46.
4. Вода для лабораторного анализа. Технические требования и методы испытаний : ISO 3696:1987 : введён впервые : дата введения 1987.04.01 // РСТ. Российский институт стандартизации : [офиц. сайт]. - Москва, 2021. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/3628438.aspx> (дата обращения: 09.06.2022).
5. Карандашев В. К., Лейкин А. Ю., Хвостиков В. А., Куцева Н. К., Пирогова С. В. Анализ вод методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015 – Т. 81, № 5. – С. 5–18.
6. Качество почвы. Определение содержания установленных оловоорганических соединений. Газохроматографический метод : ISO 23161:2018 : взамен ISO 23161:2009 : дата введения 2018.10.09 // РСТ. Российский институт стандартизации : [офиц. сайт]. - Москва, 2021. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6432906.aspx> (дата обращения: 09.06.2022).
7. Комендантов А. Ю., Хлебович В. В., Аладин Н. В. Особенности осмотической и ионной регуляции двустворчатых моллюсков в зависимости от факторов среды // Экология. – 1985. – № 5. – С. 35–42.

8. Максимов А. А., Петухов В. А. Роль макро- и мейобентоса в донных сообществах вершины Финского залива // Труды Зоологического института РАН. – 2011. – Т. 315, № 3. – С. 289–310.
9. Методика выполнения измерений массовой доли полиароматических углеводородов в пробах почв и донных отложений методом высокоэффективной жидкостной хроматографии : ФР.1.31.2004.01279 // Еса Service : [сайт]. – [Б. м.], 2009. – URL: <https://ecaservice.ru/otraslevye-resheniya/applications89/?ysclid=18auvzkaa3142088543> (дата обращения: 09.06.2022).
10. Способ биологического мониторинга окружающей среды (варианты) и система для его осуществления : патент № 2308720С1 Российская Федерация : МПК G01N 33/18 (2006.01), G01N 21/17 (2006.01) / Холодкевич С. В., Иванов А. В., Корниенко Е. Л., Куракин А. С. – № 2006122457/13 ; заявл. 20.06.2006 ; опубл. 20.10.2007, Бюл. № 29.
11. Шаров А. Н., Холодкевич С. В. О некоторых особенностях использования пресноводных двустворчатых моллюсков при проведении экотоксикологических исследований на основе мониторинга их кардиоритма волоконно-оптическим методом // Принципы экологии. – 2015. – № 2 (14). – С. 21–28.
12. Bat L. A review of sediment toxicity bioassays using the amphipods and polychaetes // Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. – 2005. – Vol. 5, nr 2. – P. 119–139.
13. Beggel S., Geist J. Acute effects of salinity exposure on glochidia viability and host infection of the freshwater mussel *Anodonta anatina* (Linnaeus, 1758) // Science of the Total Environment. – 2015. – Vol. 502. – P. 659–665. – <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.067>
14. Berezina N. A., Panov V. E. Establishment of new gammarid species in the eastern Gulf of Finland (Baltic Sea) and their effects on littoral communities // Proceedings of the Estonian Academy of Sciences: Biology and Ecology. – 2003. – Vol. 52, № 3 – P. 284–304.
15. Berezina N. A., Strode E., Lehtonen K. K., Balode M., Golubkov S. M. Sediment quality assessment using *Gmelinoidea fasciatus* and *Monoporeia affinis* (Amphipoda, Gammaridea) in the northeastern Baltic Sea // Crustaceana. – 2013. – Vol. 86, № 7/8. – P. 780–801. – <https://doi.org/10.1163/15685403-00003215>
16. Cajaraville M. P., Bebianno M. J., Blasco J., Porte C., Sarasquete C., Viarengo A. The use of biomarkers to assess the impact of pollution in coastal environments of the Iberian Peninsula: a practical approach // Science of the Total Environment. – 2000. – Vol. 247, iss. 2/3. – P. 295–311. – [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00499-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00499-4)
17. Camus L., Olsen G. H. Embryo aberrations in sea ice amphipod *Gammarus wilkitzkii* exposed to water soluble fraction of oil // Marine Environmental Research. – 2008. – Vol. 66, iss. 1. – P. 221–222. – <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2008.02.074>
18. Chapman P. M., Swartz R. C., Roddie B., Phelps H. L., Hurk P. V. D., Butler R. An international comparison of sediment toxicity tests in the North Sea // Marine Ecology Progress Series. – 1992. – Vol. 91. – P. 253–264. – <https://doi.org/10.3354/meps091253>
19. Cole R. F., Mills G. A., Parker R., Bolam T., Birchenough A., Kröger S., Fones G. R. Trends in the analysis and monitoring of organotins in the aquatic environment // Trends in Environmental Analytical Chemistry. – 2015. – Vol. 8. – P. 1–11. – <https://doi.org/10.1016/j.teac.2015.05.001>
20. Depledge M. H., Lundebye A.-K., Curtis T., Aagaard A., Andersen B. B. Automated interpulse-duration assessment (AIDA): a new technique for detecting disturbances in cardiac activity in selected macroinvertebrates // Marine Biology. – 1996. – Vol. 126, iss. 2. – P. 313–319.
21. Guidelines for general biological effects monitoring / Oslo and Paris Commis. – [S. l.] : OSPAR, 1998. – 38 p. – (Joint Assessment and Monitoring Programme).

22. Hylland K., Tollefsen K.-E., Ruus A., Jonsson G., Sundt R. C., Sanni S., Utvik T. I. R., Johnsen S., Nilssen I., Pinturier L., Balk L., Barsiene J., Marigomez I., Feist S. W., Borseth J. F. Water column monitoring near oil installations in the North Sea 2001–2004 // *Marine Pollution Bulletin*. – 2008. – Vol. 56, iss. 3. – P. 414–429. – <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.11.004>
23. Jacobson T., Sundelin B., Yang G., Ford A. T. Low dose TBT exposure decreases amphipod immunocompetence and reproductive fitness // *Aquatic Toxicology*. – 2011. – Vol. 101, iss. 1. – P. 72–77. – <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2010.09.001>
24. Kholodkevich S. V., Kuznetsova T. V., Sharov A. N., Kurakin A. S., Lips U., Kolesova N., Lethonen K. K. Applicability of a bioelectronic cardiac monitoring system for the detection of biological effects of pollution in bioindicator species in the Gulf of Finland // *Journal of Marine Systems*. – 2017. – Vol. 171. – P. 151–158. – <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.12.005>
25. Matthiessen P., Bifield S., Jarrett F., Kirby M. F., Law R. J., McMinn W. R., Sheahan D. A., Thain J. E., Whale G. F. An assessment of sediment toxicity in the River Tyne estuary, UK by means of bioassays // *Marine Environmental Research*. – 1998. – Vol. 45, no. 1. – P. 1–15.
26. Nipper M. G., Greenstein D. J., Bay S. M. Short- and long-term sediment toxicity test methods with the amphipod *Grandidierella japonica* // *Environmental Toxicology and Chemistry*. – 1989. – Vol. 8, iss. 12. – P. 1191–1200. – <https://doi.org/10.1002/ETC.5620081212>
27. Oliveira P., Lopes-Lima M., Machado J., Guilhermino L. Comparative sensitivity of European native (*Anodonta anatina*) and exotic (*Corbicula fluminea*) bivalves to mercury // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2015. – Vol. 167, pt A. – P. 191–198. – <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.06.014>
28. Podlesińska W., Dąbrowska H. Amphipods in estuarine and marine quality assessment – a review // *Oceanologia*. – 2019. – Vol. 61, iss. 2. – P. 179–196. – <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2018.09.002>
29. Standard methods for the examination of water and sewage / Amer. Publ. Health Assoc. [et al.]. – 6th ed. – New York : APHA, 1925. – [?] p.
30. Strode E., Balode M. Toxicity-resistance of Baltic amphipod species to heavy metals // *Crustaceana*. – 2013. – Vol. 86, no. 7/8. – P. 1007–1024.
31. Sukharenko E. V., Nedzvetsky V. S., Kyrychenko S. V. Biomarkers of metabolism disturbance in bivalve molluscs induced by environmental pollution with processed by-products of oil // *Biosystems Diversity*. – 2017. – Vol. 25, iss. 2. – P. 113–118. – <https://doi.org/10.15421/011717>
32. Turja R., Soirinsuo A., Budzinski H., Devier M. H., Lehtonen K. K. Biomarker responses and accumulation of hazardous substances in mussels (*Mytilus trossulus*) transplanted along a pollution gradient close to an oil terminal in the Gulf of Finland (Baltic Sea) // *Comparative Biochemistry and Physiology. Pt C, Toxicology and Pharmacology*. – 2013. – Vol. 157, iss. 1. – P. 80–92. – <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2012.09.006>
33. Turja R., Guimaraes L., Nevala A., Kankaanpää H., Korpinen S., Lehtonen K. K. Cumulative effects of exposure to cyanobacteria bloom extracts and benzo[a]pyrene on antioxidant defence biomarkers in *Gammarus oceanicus* (Crustacea: Amphipoda) // *Toxicon*. – 2014. – Vol. 78. – P. 68–77. – <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2013.11.015>

TESTING OF BOTTOM SEDIMENTS FROM THE GULF OF FINLAND USING AMPHIPOD SURVIVAL AND CARDIACITY OF UNIONID MOLLUSCS

Berezina N. A.^{1*}, Sharov A. N.², Maximov A. A.¹, Kholodkevich S. V.²

¹Zoological Institute of RAS, St. Petersburg, Russian Federation,

e-mail: nadezhda.berezina@zin.ru

²St. Petersburg Federal Research Center RAS,

St. Petersburg Research Center for Environmental Safety of RAS, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract: This article presents the results of a combined assessment of bottom sediments from different parts of the eastern Gulf of Finland (Baltic Sea) using biotesting on the survival of the amphipod *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899) and on the cardiac activity of the bivalve mollusks *Anodonta anatina* (Linnaeus, 1758) and the determination of pollutants (petroleum products, metals, organotin compounds) in bottom sediments. The survival of amphipods correlated with the content of TBT and heavy metals, especially lead, and cardiac resistance (time to restore the heart rate after loading) of mollusks was most sensitive to oil pollution. At the same time, both indicator species revealed the disturbed state of the habitat at the same stations. A good indication of both indicators in relation to the potential toxicity of bottom sediments was revealed and, secondly, the importance of using both indicators in combination, since they are sensitive to the effects of various kinds of pollution. Such features may be related with the activity and feeding type of the animal species used as test objects.

Keywords: biotesting, biomarkers, bottom sediments, zoobenthos, Baltic Sea.

Сведения об авторах

Березина Надежда Александровна	кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Зоологический институт Российской академии наук», nadezhda.berezina@zin.ru
Шаров Андрей Николаевич	доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», «Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук», sharov_an@mail.ru
Максимов Алексей Александрович	доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Зооло- гический институт Российской академии наук», alexey.maximov@zin.ru
Холодкевич Сергей Викторович	доктор технических наук, главный научный сотрудник ФГБУН «Санкт- Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», «Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук», kholodkevich@mail.ru

Поступила в редакцию 04.07.2022 г.

Принята к публикации 25.08.2022 г.

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ, ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ
И ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 502.5(292.471-751.2)

DOI: [10.21072/eco.2022.23.05](https://doi.org/10.21072/eco.2022.23.05)

ЛАНДШАФТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАМЯТНИКА ПРИРОДЫ
«ПРИБРЕЖНЫЙ АКВАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС У МЫСА ФИОЛЕНТ» *

Панкеева Т. В.¹, Миронова Н. В.¹, Пархоменко А. В.²

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

²Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, Российская Федерация,
e-mail: avparkhomenko52@gmail.com

Аннотация: Приведены сведения о ландшафтной структуре и составлена ландшафтная карта памятника природы регионального значения «Прибрежный аквальный комплекс (ПАК) у мыса Фиолент» (юго-западное побережье г. Севастополя). Ландшафтные исследования (2020–2021 гг.) проводили методом ландшафтного профилирования на ключевых участках. В результате изучения была уточнена и детализирована ландшафтная структура сухопутной части и прилегающей территории, выделены 3 местности, 8 урочищ. Доминирует местность крутых и обрывистых склонов, сложенных магматическими и осадочными известняковыми породами с фисташково-можжевельным редколесьем в комплексе с лесом из фисташки туполистной и дуба пушистого на коричневых почвах. Ландшафты наземной части обладают высокой аттрактивностью, выполняют важные средообразующие функции: формируют среду обитания, являются почвозащитными и водорегулирующими. Впервые составлена ландшафтная карта прибрежной зоны памятника природы «ПАК у мыса Фиолент», выделены 3 местности, 8 урочищ. Для ландшафтной структуры побережья характерны местности глыбово-валунного бенча и подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, где преобладают ерикария косматая и гонголария бородатая. Подводные ландшафты характеризуются сохранностью, высокими продукционными показателями макрофитобентоса. Многие виды морской флоры памятника природы охраняются на региональном, государственном и международном уровнях. Для обеспечения сохранности биологического и ландшафтного разнообразия целесообразно использовать системный подход к охране береговой зоны, что обеспечит наилучшие результаты по сохранению и восстановлению наземных и морских экосистем.

Ключевые слова: ландшафт, макрофитобентос, особо охраняемые природные территории, Чёрное море.

Введение

Концепция развития сети особо охраняемых природных территорий (ООПТ) России предполагает организацию развитой экологической сети, которая рассматривается как наиболее эффективный путь сохранения генофонда растительного и животного мира, типичных и редких ландшафтов, поддержания благоприятных экологических условий. Несовершенство

* Работа выполнена в рамках госзадания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (гос. рег. № 121030300149-0).

Работа выполнена в рамках госзадания Морского гидрофизического института РАН, тема № 0555-2021-0005, шифр «Прибрежные исследования».

пространственной организации объектов ООПТ и некоторые недостатки в природоохранном природопользовании ведут к нарушению функционирования заповедных объектов. Это приводит к потере уникальных природных ландшафтов.

За последние годы накоплены сведения о природоохранной ценности и биотопах ООПТ, расположенных в береговой зоне Крымского полуострова [Мильчакова и др., 2015; Особо охраняемые ... , 2020]. Тем не менее ООПТ г. Севастополя, особенно памятники природы гидрологического профиля, требуют более детальных исследований как наземной территории, так и морской акватории. В ранее вышедших работах были представлены материалы о видовом составе макрофитов и ландшафтном разнообразии памятника природы «Прибрежный аквальный комплекс (ПАК) у мыса Лукулл» [Евстигнеева, Танковская, 2021; Панкеева, Миронова, Пархоменко, 2021], ландшафтной структуре ПАК у мыса Сарыч [Панкеева, Миронова, Ландшафтная структура ... , 2022] и ПАК у Херсонеса Таврического [Панкеева, Миронова, Ландшафтные исследования ... , 2022], видовом составе наземной растительности в районе ПАК у мыса Фиолент [Бондарева, 2018]. В связи с этим цель данной работы — картографирование ландшафтной структуры памятника природы «ПАК у мыса Фиолент» для оптимизации его природоохранного режима.

Материалы и методы исследования

Памятник природы «ПАК у мыса Фиолент» расположен в юго-западной части г. Севастополя. Его общая площадь составляет 179,4 га, из которых площадь территории — 66,0 га, акватории — 113,4 га. Памятник природы входит в состав Гераклеийского экологического центра экологического каркаса (сети) Крыма.

Береговая зона отличается своеобразным геолого-геоморфологическим строением и активными динамическими процессами (оползни, обвалы). Береговые склоны сложены магматическими породами, сарматскими и меотическими известняками. Клиф у м. Фиолент представлен крутыми склонами высотой 120–180 м. Для клифовой зоны характерна система микроамфитеатральных структур, отделённых друг от друга небольшими водоразделами. Ширина этих амфитеатров достигает 100–150 м, формирование которых связано с выходами водных источников, приуроченных к зонам контакта известняков и пород таврической серии. Пляжево-бенчевая зона выражена в тех местах, где клиф сложен рыхлым материалом. Глыбовый бенч (глыбы из известняка, песчаника и магматических пород) приурочен фрагментарно к зонам выхода магматических пород. Галечниково-глыбовый бенч располагается у водораздельных пространств. К микроамфитеатральным структурам приурочен галечниково-гравийный бенч с отдельными глыбами известняка и песчаника. Пляжи сложены гравийно-галечниковым материалом [Горячкин, Долотов, 2019]. Для прибрежной зоны характерны причудливые формы выветривания, останцовые блоки, гроты и арки. Подводный склон приглубый, опущенный бенч с навалами глыб расположен на глубине 20–50 м. В прибрежной акватории встречаются крутые остроконечные скалы, небольшие островки и рифы.

Известны сведения о редких видах растений и животных памятника природы, в том числе морской флоры и фауны, 18 видов сосудистых растений охраняются на федеральном и региональном уровнях [Бондарева, 2018]. В составе флоры памятника природы выявлено 296 видов и подвидов сосудистых растений из 205 родов и 51 семейства. В систематическом спектре ведущую роль играют Asteraceae (44 вида; 14,9 %), Poaceae (39; 13,2 %), Brassicaceae (21; 7,1 %), Fabaceae (20; 6,8 %), Lamiaceae (17; 5,7 %), Rosaceae (14; 4,7 %), Caryophyllaceae и Apiaceae (по 13; 4,4 %), Boraginaceae (9; 3,0 %), Asparagaceae (7; 2,4 %) [Бондарева, 2018].

На прибрежных крутых склонах встречаются сообщества фисташки туполистной (*Pistacia mutica* Fisch. & C.A. Mey), можжевельника высокого (*Juniperus excelsa* M. Bieb.), можжевельника дельтовидного (*Juniperus deltoides* R.P. Adams) и дуба пушистого (*Quercus pubescens* Willd.). Из охраняемых видов можно отметить меч-траву обыкновенную (*Cladium mariscus* (L.) Pohl), рогачку меловую (*Erucastrum cretaceum* Kotov). Редким для региона является зверобой удлинённый (*Hypericum elongatum* Ledeb.) [Особо охраняемые ... , 2020].

Альгофлора включает 86 видов, из них 21 — зелёных (Chlorophyta), 23 — бурых (Ochrophyta) и 42 — красных (Rhodophyta) водорослей. В этом районе отмечены редкие виды: бриопсис кипарисовый (*Bryopsis cupressina*), ульва Кюлина (*Ulva kylinii*), фельдманния слабодерновинная (*Feldmannia caespitula*), мирионема заглушающая (*Myrionema strangulans*), стипокаулон метловидный (*Stypocaulon scoparium*), полисифония шиловидная (*Polysiphonia subulata*), хроодактилон украшенный (*Chroodactylon ornatum*) [Мильчакова и др., 2015]. Многие виды морской флоры занесены в Красную книгу Российской Федерации (КК РФ) [Красная книга ... , 2008], Красную книгу Республики Крым (КК РК) [Красная книга ... , 2015], Красную книгу Севастополя (ККС) [Красная книга ... , 2018] и списки международных конвенций, что свидетельствует о природоохранной ценности акватории. Так, филофора курчавая (*Phyllophora crispa* (Huds.) P.S. Dixon) и стилофора нежная (*Stilophora tenella* (Esper) P.C. Silva) входят в перечень видов КК РФ, КК РК и ККС, а ерикария косматая (*Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry = *Cystoseira crinita*), гонголария бородатая (*Gongolaria barbata* (Stackh.) Kuntze = *Cystoseira barbata*), лауренция чашевидная (*Laurencia coronopus* J. Ag.), осмундия перистонадрезная (*Osmundea pinnatifida* (Huds.) Stackh. = *Laurencia pinnatifida*), халоптерис метловидный (*Halopteris scoparia* (L.) Sauv. = *Stypocaulon scoparium*) — КК РК, нерейя нитевидная (*Nereia filiformis* (J. Ag.) Zanard) — КК РК и ККС. Цистозировые и филофоровые биотопы имеют международный охраняемый статус согласно классификации EUNIS [EUNIS Habitat, 2007; European Red List ... , 2016].

При исследовании ландшафтной структуры памятника природы «ПАК у мыса Фиолент» использовали метод ландшафтного профилирования с детальным описанием трансект и ключевых участков. Ландшафтные профили заложены для трёх трансект (рис. 1). Трансекты простирались от сухопутной границы памятника природы до нижней границы обитания донной растительности (табл. 1).

Таблица 1

Координаты, диапазон глубин и ширина фитали на трансектах памятника природы «ПАК у мыса Фиолент»

№	Координаты		Диапазон глубин, м	Ширина фитали, м
	северная широта	восточная долгота		
I	44°30.244'	33°30.225'	0,5–10	150
II	44°29.875'	33°29.278'	0,5–10	80
III	44°30.461'	33°28.921'	0,5–15	450

Полевые работы по изучению ландшафтной структуры сухопутной части и подводные исследования в прибрежной зоне памятника природы проводили в мае — июле 2020–2021 гг. Работы в акватории выполняли с применением лёгководолазного снаряжения [Pankeeva, Mironova, 2019]. Координаты трансект определяли при помощи портативного GPS-приёмника (*Oregon 650*). Первоначально дайверы-исследователи (команда состояла из двух человек), снабжённые дайв-компьютером (*AERIS F10*), проходили вдоль мерной линии, выполняя фото- и видеосъёмку, визуально определяли проективное покрытие (ПП) дна макрофитами и описывали донные отложе-

ния, пользуясь классификацией морских обломочных осадков по гранулометрическому составу [Блинова, Пронина, Штрик, 2005]. Для изучения состава фитобентоса использованы материалы гидробиотанической съёмки, проведённой в границах трасект. Отбор проб макрофитов проводили по стандартной методике [Калугина-Гутник, 1969]. Идентификацию видов водорослей проводили по определителю [Зинова, 1967] с учётом последних номенклатурных изменений. Выделение фитоценозов осуществляли согласно доминантной классификации по А. А. Калугиной-Гутник [Калугина-Гутник, 1975].

Для создания ландшафтной карты использовали программный пакет *QGIS 2.18.25* и электронную основу навигационной карты. Информацию о природных компонентах береговой зоны, полученную в ходе полевых исследований, оформляли графически в виде ландшафтных профилей (рис. 2). Для создания профилей использовали программный пакет *Surfer* версии 13.0.383. На гипсометрической кривой различными условными обозначениями отмечали геологическое строение, почвы, наземную растительность, литофациальные различия донных осадков, массовые виды макрофитов. Вертикальными линиями, разделяющими профиль на серию отрезков, показывали границы таксономических единиц (рис. 2). Географическую привязку границ донных природных комплексов (ДПК) и определение их площади осуществляли с помощью программы *QGIS*. Сопряжённый анализ батиграфии, карт литологического состава и данных водолазной съёмки позволили провести экстраполяцию участков дна со сходными параметрами для выделения границ ДПК. Результаты обобщения исследований ландшафтной структуры изучаемого района отражены на ландшафтной карте. Ландшафтная структура памятника природы исследована на уровне типов местностей и урочищ согласно общепринятым методикам в наземном и морском ландшафтоведении [Петров, 1989; Исаченко, 1991].

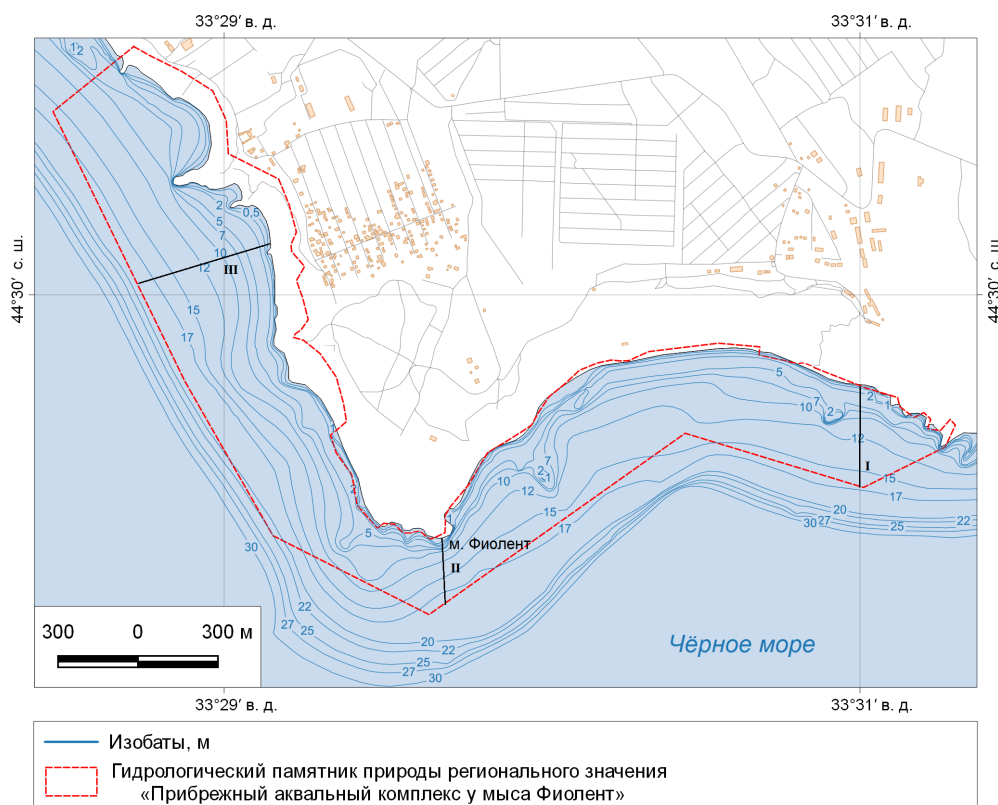


Рис. 1. Карта-схема расположения ландшафтных профилей памятника природы «ПАК у мыса Фиолент» (2021 г.)

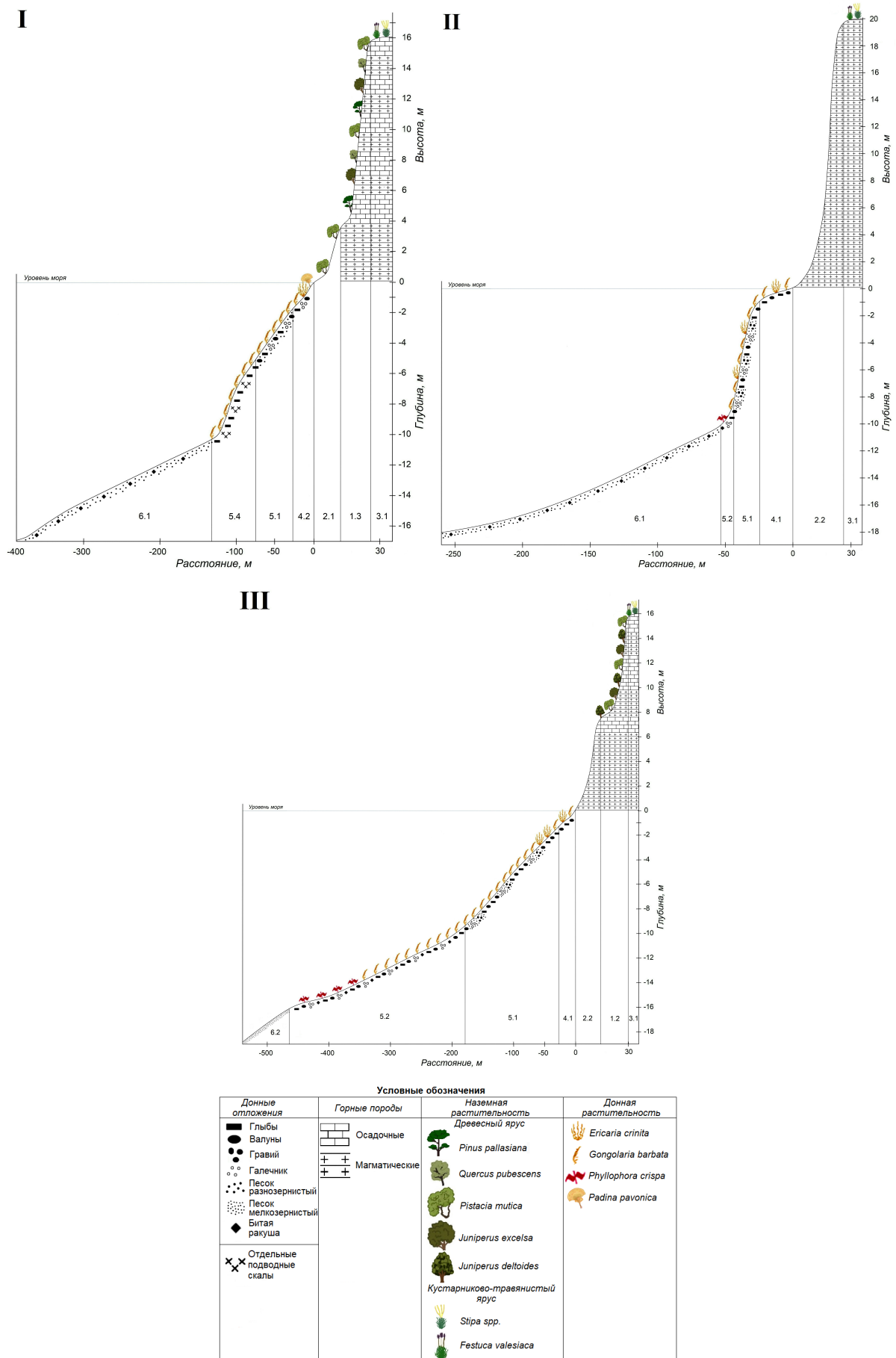


Рис. 2. Ландшафтные профили памятника природы «ПАК у мыса Фиолент»

Результаты исследований и их обсуждение

Ландшафтная структура памятника природы «ПАК у мыса Фиолент» характеризуется рядом особенностей, которые определяются в первую очередь геоморфологическим строением береговой зоны. Сложность геолого-геоморфологического строения территории памятника природы обусловлена зоной взаимодействия суши и моря, контактом осадочных и вулканических пород и активно протекающими геологическими и физико-географическими процессами.

Ландшафтная структура памятника природы «ПАК у мыса Фиолент» и прилегающей к нему территории (рис. 3). Памятник природы расположен в предгорной зоне разнотравных степей, шибляковых зарослей, лесостепи и дубовых лесов, занимает приморский ингрессионно-бухтовый, абразионно-гравитационный и оползневой ландшафтный пояс [Позаченюк, Панкеева, 2008].

В ландшафтной структуре наземной части памятника природы «ПАК у мыса Фиолент» господствует местность *крутых и обрывистых склонов, сложенных магматическими и осадочными известняковыми породами с фисташково-можжевельновым редколесьем в комплексе с лесом из фисташки туполистной и дуба пушистого на коричневых почвах* (1). Для данной местности наиболее характерными являются эрозионно-гравитационные процессы, расположенные вдоль по склону. Климат приморский, с очень тёплой зимой. Микроклиматические особенности обусловлены наветренной передовой позицией по отношению к западным ветрам, приносящим тепло зимой и прохладу летом.

Западную часть памятника природы занимает урочище *крутых гравитационно-осыпных и оползневых слабоступенчатых склонов с фисташковым и можжевельновым редколесьем* (1.1). Береговой обрыв представляет собой стену, сложенную белым известняком с оранжевыми железистыми прослойками: кварцевые кератофиры начинаются тёмным неровным слоем у подножья известнякового клифа, постепенно поднимаются и выдвигаются от линии обрыва в сторону моря, образуя отдельные очень крутые остроконечные скалы и несколько маленьких островков и рифов. Почвенный покров практически отсутствует. Фрагментарно представлены примитивные коричневые почвы. Крутые гравитационно-ступенчато-оползневые и гравитационно-осыпные склоны заняты низкорослой древесной растительностью из фисташки туполистной (*Pistacia tatica*) и можжевельника дельтовидного (*Juniperus deltoides*). В травостое господствует жабрицевопырейная ассоциация с проективным покрытием от 10 до 20 %. Для данной ассоциации характерны отдельные травянистые растения: молочай миртолистный (*Euphorbia myrsinites* L.), бедренец козельцовый (*Pimpinella tragium* Vill.), козелец разрезной (*Scorzonera laciniata* L.), бородач обыкновенный (*Bothriochloa ischaetum* (L.) Keng), наголоватка Регнера (*Jurinea roegneri* K. Koch), головчатка кожистая (*Cephalaria coriacea* (Willd.) Steud.), хвойник двухколосковый (*Ephedra distachya* L.), ферульник смолоносный коротколопастный (*Ferulago galbanifera* var. *brachyloba* (Boiss.) Thell.), лён чешуйчатый (*Linum squamulosum* Rudolphi ex Willd.), василёк восточный (*Centaurea orientalis* L.), бассия распростёртая (*Bassia prostrata* (L.) Beck), румия критмолистная (*Rumia crithmifolia* (Willd.) Koso-Pol.), смолёвка густоцветная (*Silene densiflora* d'Urv.), сухоцвет однолетний (*Xeranthemum annuum* L.).

Урочище *скально-магматических обрывистых склонов с единичными экземплярами видов можжевельников и фисташки туполистной* (1.2) приурочено к мысу Фиолент и прилегающим склонам. Склоны, сложенные магматическими породами, очень живописны с останцами выветривания и причудливыми формами. Доминирует пырейная ассоциация с редко произрастающим можжевельником дельтовидным (*Juniperus deltoides*) и пузырником киликийским (*Colutea cilicica* Boiss. & Balansa).

Восточная часть памятника природы занята урочищем *крутых гравитационно-осыпных и оползневых слабоступенчатых склонов с фисташково-можжевельным редколесьем и участием дуба пушистого и сосны Палласова, участками леса из фисташки туполистной* (1.3). На этом участке побережья увеличивается длина, уменьшается крутизна склона, незначительную роль играют эрозионно-гравитационные лотки. Кроме фисташки туполистной (*Pistacia mutica*) появляются дуб пушистый (*Quercus pubescens*) и сосна Палласова (*Pinus pallasiana* D. Don). В районах скопления рыхлого материала господствуют кострово-пырейные ассоциации, отмечен хвойник двухколосковый (*Ephedra distachya*).

Над крутыми склонами древнего клифа простирается урочище *обрывистых известняковых склонов* (1.4). Высота склонов варьирует от 10–20 м в западной части до нескольких метров в центральной и восточной частях памятника природы.

Пляжево-клифовая местность (2) выражена почти вдоль всего побережья, за исключением участка у мыса Фиолент, где обрывистые склоны омываются морем.

Урочище *обрывистых склонов активного клифа, сложенных рыхлыми гравитационно-оползневыми и глыбово-щебнисто-суглинистыми отложениями с редкими низкорослыми особями фисташки туполистной, можжевельника дельтовидного и разнотравно-злаковыми ассоциациями* (2.1), характерно для восточной и западной частей памятника природы. Клиф представлен крутыми склонами (от 30–45 до 90 градусов). У основания клифа имеются редкие волноприбойные ниши и гравитационные конусы выноса. На склонах доминируют отдельные низкорослые экземпляры фисташки туполистной (*Pistacia mutica*) и можжевельника дельтовидного (*Juniperus deltoides*). Разреженный травостой представлен пыреем скифским (*Elytrigia scythica* (Nevski) Nevski), жабрицей камеденосной (*Seseli gummiferum* Pall. ex Smith), морской горчицей черноморской (*Cakile euxina* Pobed.) и др.

Урочище *обрывистых скально-магматических склонов активного клифа* (2.2) приурочено к мысу Фиолент, а также фрагментарно встречается на всём протяжении побережья. Клиф у мыса Фиолент представлен крутыми склонами и достигает высоты 120–180 м. У основания клифа отмечены единичные волноприбойные ниши, характерны причудливые останцовые формы выветривания. На западной границе территории в пределах водораздела, образующего м. Лермонтова, расположен уникальный грот Дианы. На очень крутых склонах разреженно встречается хвойник двухколосковый (*Ephedra distachya*), пырей скифский (*Elytrigia scythica*) и козелец курчавый (*Scorzonera crispa* M. Bieb.).

Урочище *галечниково-гравийного пляжа с единичными глыбами известняка и вулканических пород* (2.3) хорошо выражено в западной части (у оползневой террасы шириной от 5 до 20 м) и в восточной (приурочено к балке, выработанной под Георгиевским монастырём, шириной 20–22 м). Оба пляжа имеют невысокий волноприбойный вал, отмечены скопления водорослей. На пляжах и приморских откосах встречаются мачок жёлтый (*Glaucium flavum* Crantz), морская горчица черноморская (*Cakile euxina*), на выступах скал произрастают донник белый (*Melilotus albus* Medik.), головчатка кожистая (*Cephalaria coriacea*), хвойник двухколосковый (*Ephedra distachya*), жабрица камеденосная (*Seseli gummiferum*). В местах выхода на пляж оползневых отложений наблюдаются заросли тростника южного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), отмечены хвощ ветвистый (*Equisetum ramosissimum* Desf.), экбалиум пружинистый (*Ecballium elaterium* (L.) A. Rich.), заросли дербенника иволистного (*Lythrum salicaria* L.), отдельные экземпляры левкоя душистого (*Matthiola odoratissima* (Pall. ex M. Bieb.) W.T. Aiton), парнолистника обыкновенного (*Zygophyllum fabago* L.). В приморской пляжной полосе встречается весьма редкое растение — меч-трава обыкновенная (*Cladium mariscus*).

Для прилегающей к памятнику природы территории характерна местность эрозионно-денудационных равнин, сложенных аллювиально-пролювиальными отложениями известняков с разнотравно-типчаково-ковыльной степью на коричневых эродированных почвах (3). В настоящее время природные комплексы сильно преобразованы антропогенной деятельностью (3.1).

Ландшафтная структура акватории памятника природы «ПАК у мыса Фиолент» (рис. 3). На большей части побережья на глубинах 0,5–1 м выражен *глыбово-валунный бенч*, где доминируют *ерикария косматая* и *гонголария бородастая* (4.1). Глыбовый бенч сложен вулканическими и осадочными породами, формируется у обрывистых скально-магматических склонов, очень узкий (до 1–2 м). ПП варьирует в широком диапазоне (10–80 %), что, вероятно, обусловлено гидродинамической активностью прибрежной зоны исследуемого района. На этих отложениях описан фитоценоз *Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata*. Его биомасса снижается при увеличении глубины, при этом вклад доминирующих видов остаётся высоким. Показательно, что если на глубине 0,5 м представлены практически «чистые» заросли ерикарии косматой (*Ericaria crinita*) и гонголарии бородастой (*Gongolaria barbata*), то глубже в структуре сообщества встречается кладостефус мутовчатый (*Cladostephus spongiosus* (Huds.) C. Ag.) и изредка павлинья (*Padina pavonica* (L.) Thivy). В состав эпифитной синузии на глубине 1 м входят вертебрата шилоносная (*Vertebrata subulifera* (C. Ag.) Kuntze), лауренция чашевидная (*Laurencia coronopus*) и халоптерис метловидный (*Halopteris scoparia*).

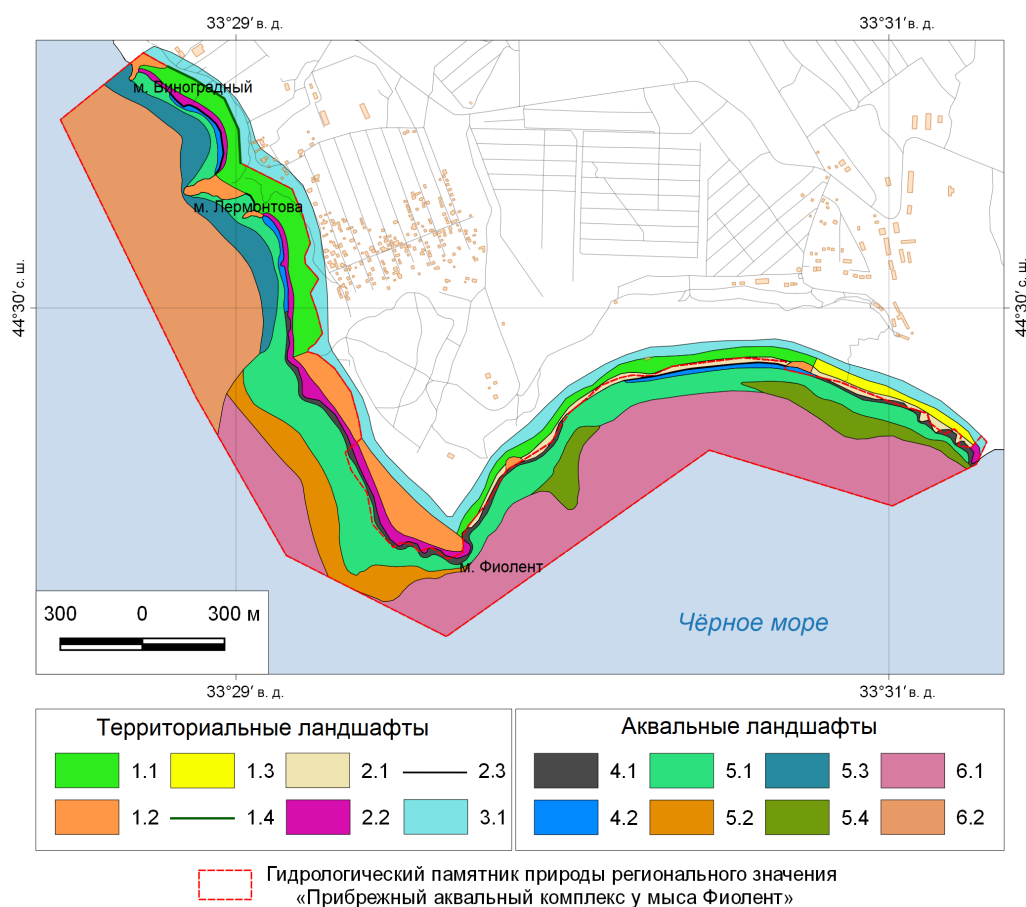


Рис. 3. Карта-схема ландшафтной структуры памятника природы «ПАК у мыса Фиолент» и прилегающей к нему территории

Территориальные ландшафты

Условные обозначения: *Местность:* 1 — крутые и обрывистые склоны, сложенные магматическими и осадочными известняковыми породами с фисташково-можжевельным редколесьем в комплексе с лесом из фисташки туполистной и дуба пушистого на коричневых почвах.

Урочища: 1.1 — крутые гравитационно-осыпные и оползневые слабоступенчатые склоны с фисташковым и можжевельным редколесьем;

1.2 — скально-магматические обрывистые склоны с единичными экземплярами видов можжевельников и фисташки туполистной;

1.3 — крутые гравитационно-осыпные и оползневые слабоступенчатые склоны с фисташково-можжевельным редколесьем и участием дуба пушистого и сосны Палласова;

1.4 — обрывистые известняковые склоны.

Местность: 2 — пляжево-клифовая.

Урочища: 2.1 — обрывистые склоны активного клифа, сложенные рыхлыми гравитационно-оползневыми глыбово-щебнисто-суглинистыми отложениями с редкими низкорослыми особями фисташки туполистной, можжевельника дельтовидного и разнотравно-злаковыми ассоциациями;

2.2 — обрывистые скально-магматические склоны активного клифа;

2.3 — галечниково-гравийный пляж с единичными глыбами известняка и вулканических пород.

Местность: 3 — эрозионно-денудационные равнины, сложенные аллювиально-пролювиальными отложениями известняков с разнотравно-типчаково-ковыльной степью на коричневых эродированных почвах.

Урочища: 3.1 — денудационные равнины сильно преобразованные, занятые дачными участками и другими селитебными комплексами.

Аквальные ландшафты

Местность: 4 — бенч.

Урочища: 4.1 — сложенный глыбово-валунными отложениями, где доминируют ерикария косматая и гонголария бородатая;

4.2 — сложенный галечниково-валунно-глыбовыми отложениями, где преобладают ерикария косматая, гонголария бородатая и падина павлинья.

Местность: 5 — подводный склон.

Урочища: 5.1 — сложенный грубообломочными отложениями, где господствуют ерикария косматая и гонголария бородатая, и мозаичным чередованием песчано-галечно-гравийных донных осадков, где растительность отсутствует;

5.2 — сложенный грубообломочными отложениями, где доминируют ерикария косматая и гонголария бородатая, и мозаичным чередованием галечно-гравийных с битой ракушей донных осадков, где преобладает филлофора курчавая;

5.3 — сложенный песчаными отложениями с отдельно стоящими глыбами, на которых господствует ерикария косматая;

5.4 — сложенный грубообломочными отложениями с отдельно стоящими подводными скалами, где преобладает ерикария косматая.

Местность: 6 — слабонаклонная равнина.

Урочища: 6.1 — сложенная песчаными отложениями с выраженными мелкими знаками ряби (рифелями), где донная растительность отсутствует;

6.2 — сложенная песчаными отложениями с выраженными крупными знаками ряби (рифелями), лишённая донной растительности.

К микроамфитеатральным структурам на глубинах 0,5–1 м приурочено урочище галечниково-валунно-глыбового бенча, где преобладают ерикария косматая, гонголария бородатая и падина павлинья (4.2). Ширина бенча составляет до трёх метров. На этих глубинах в восточной части памятника природы характерны окатанные валуны, тогда как в западной — доминируют глыбы. Прогалины между грубообломочными осадками заполнены преимущественно галечниковыми отложениями. В восточной части значения ПП низкие (10–20 %). Описан фитоценоз *Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata* – *Padina pavonica*. Его биомасса резко возрастает при увеличении глубины, при этом доля доминирующих видов 1-го яруса составляет примерно половину общей биомассы макрофитов. В структуре сообщества на глубине 0,5 м обильно представлены церамииум реснитчатый (*Ceramium ciliatum* (Ell.) Ducl.) и диктиота ленточная (*Dictyota fasciola* (Roth) J.V. Lamour.). В этом интервале глубин также встречаются кладостефус мутовчатый (*Cladostephus spongiosus*) и виды рода ульва (*Ulva*). На таллумах ерикарии косматой (*Ericaria crinita*) и гонголарии бородатой (*Gongolaria barbata*) произрастают виды рода кладофора (*Cladophora*) и халоптерис метловидный (*Halopteris scoparia*). Показательно, что при увеличении глубины в эпифитной синузии резко возрастает вклад вертебрата шилоносной (*Vertebrata subulifera*).

В западной части значения ПП также не превышают 10–20 %. Описан тот же фитоценоз (*Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata* – *Padina pavonica*). Его биомасса незначительно возрастает при увеличении глубины, при этом доля доминирующих видов 1-го яруса высокая. Характерно, что структура сообщества различается в этом интервале глубин. Так, если на глубине 0,5 м преобладает церамииум реснитчатый (*Ceramium ciliatum*) и встречается ульва кишечница (*Ulva intestinalis* L.), то на глубине 1 м — кладостефус мутовчатый (*Cladostephus spongiosus*). Эпифиты на меньшей глубине представлены слабо, тогда как глубже значительно повышается вклад вертебрата шилоносной (*Vertebrata subulifera*).

В ландшафтной структуре акватории памятника природы преобладает местность, приуроченная к подводному склону. Характерен резкий спад глубин, отмечен глыбовый навал из вулканических и известняковых пород. Выделены четыре урочища. Наибольшую площадь занимает урочище подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, где господствуют ерикария косматая и гонголария бородатая, и мозаичным чередованием песчано-галечно-гравийных донных осадков, где растительность отсутствует (5.1). Это урочище занимает прибрежную зону м. Фиолент (глубины 1–10 м) и прилегающие склоны в восточной и западной частях памятника природы (глубины 1–7 м). Характерен глыбовый навал, диаметр глыб достигает 1–5 м. Прогалины заполнены гравийно-галечными отложениями.

В этой части акватории значения ПП изменяются в пределах 50–60 %. Описан фитоценоз *Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata* – *Cladostephus spongiosus*. Его биомасса в восточной и западной частях склонов достаточно высокая, тогда как в районе м. Фиолент этот показатель несколько ниже. Однако у мыса отмечена наибольшая доля доминирующих видов 1-го яруса. В структуре альгоценоза в этом интервале глубин изредка встречается филлофора курчавая (*Phyllophora crispa* (Huds.) P.S. Dixon). Показательно, что на этих глубинах обильно представлены эпифиты. Их вклад составляет примерно треть общей биомассы макрофитов. В состав эпифитной синузии входят вертебрата шилоносная (*Vertebrata subulifera*), антитамион крестовидный (*Antithamnion cruciatum* (Agardh) Näg.), виды рода лауренция (*Laurencia*).

В западной части от м. Фиолент на глубинах 10–15 м расположено урочище подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, где доминируют ерикария косматая и гонголария бородатая, и мозаичным чередованием галечно-гравийных с битой ракушкой донных осадков, где преобладает филлофора курчавая (5.2). Характерен глыбовый навал, диаметр глыб варьирует от 1 до 15 м. Прогалины между глыбами заполнены песчано-гравийно-галечными отложениями. В этой части акватории значения ПП не превышают 50 %. Описан фитоценоз *Phyllophora crispa*.

Его биомасса невысокая, при этом на долю эдификатора сообщества приходится больше половины общей биомассы макрофитов. В структуре альгоценоза отмечены ерикария косматая (*Ericaria crinita*), нерейя нитевидная (*Nereia filiformis* (J. Ag.) Zanard.) и кладостефус мутовчатый (*Cladostephus spongiosus*). Характерно, что родохортон пурпуровый (*Rhodochorton purpureum* (Light.) Rosenv.) частично встречается в литофитной форме, при этом его основная часть представлена как эпифит.

От западной границы памятника природы до пляжа «Царское село» на глубинах 3–8 м расположено урочище *подводного склона, сложенного песчаными отложениями с отдельно стоящими глыбами, на которых господствует ерикария косматая* (5.3). Распространены песчаные мелкозернистые донные осадки, характерны мелкие рифели. В этой части акватории значения ПП изменяются в пределах 50–70 %. Описан фитоценоз *Ericaria crinita*. Его биомасса и вклад доминирующего вида высокие. В структуре сообщества, особенно на небольших глубинах, отмечены гонголария бородатая (*Gongolaria barbata*) и кладостефус мутовчатый (*Cladostephus spongiosus*). На слоевищах ерикарии косматой (*Ericaria crinita*) и гонголарии бородатой (*Gongolaria barbata*) обильно представлены эпифиты, среди которых преобладает вертебрата шилоносная (*Vertebrata subulifera*), также встречается лауренция тупая (*Laurencia obtusa* (Huds.) J.V. Lamour.).

В восточной части памятника природы на глубинах 5–10 м расположено урочище *подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями с отдельно стоящими подводными скалами, где преобладает ерикария косматая* (5.4). Характерен глыбовый навал и выходы скал. Значения ПП не превышают 20–30 %. Описан фитоценоз *Ericaria crinita*. Его биомасса относительно невысокая, при этом основная доля приходится на эдификатор сообщества. В структуре альгоценоза изредка встречается кладостефус мутовчатый (*Cladostephus spongiosus*) и родохортон пурпуровый (*Rhodochorton purpureum*), хотя значительная часть последнего вида представлена как эпифитная форма.

Для глубин более 10 м характерна местность *слабонаклонной равнины, сложенной песчаными отложениями, где донная растительность отсутствует*. Урочище *слабонаклонной аккумулятивной равнины, сложенной песчаными отложениями с выраженными крупными знаками ряби (рифелями), где донная растительность отсутствует* (6.1), отмечено в восточной части памятника природы на глубине более 10 м. Песок разнозернистый с примесью битой ракушки. Между рифелями отмечены скопления спутанных обрывков водорослей. В западной части памятника природы на глубине свыше 10 м распространено урочище *слабонаклонной равнины, сложенной песчаными отложениями с выраженными мелкими знаками ряби (рифелями), лишённое донной растительности* (6.2). Песок мелкозернистый.

В настоящее время ООПТ г. Севастополя представлены четырнадцатью объектами разной категории охраны, общей площадью 25021,3 га, из которых на сушу приходится 24350,4 га, а на акваторию — 670,9 га, что составляет 23,1 и 3,1 % площади города и акватории соответственно. Особенностью ООПТ региона является наличие шести ООПТ, в состав которых входит морская охраняемая акватория [Позаченюк и др., 2020]. Площадь акватории памятников природы гидрологического профиля достигает 345,2 га, что составляет 51,5 % общей площади охраняемой акватории региона. Однако их расположение в прибрежной зоне отличается изолированностью и незначительной площадью морской части. Известно, что в наземно-морских ООПТ надводная и подводная части береговой зоны являются элементами одной геосистемы, единой в структурно-генетическом и функционально-динамическом отношении, которые объединяются в одно целое вещественно-энергетическими потоками. Использование системного подхода при организации природоохранной деятельности обеспечит наилучшие результаты по сохранению и восстановлению наземных и морских экосистем.

Для ПАК у мыса Фиолент, в отличие от других памятников природы г. Севастополя, характерны более высокие показатели общей площади (52 % общей площади памятников природы региона) и площади наземной части (36,8 % площади памятника природы) (рис. 4). Ландшафты отличаются природоохранной ценностью, их научная значимость обусловлена флористическим и фаунистическим разнообразием биоценозов. Однако в последние десятилетия увеличение антропогенной нагрузки на приморскую зону привело к деградации естественных ландшафтов, в связи с чем необходимо выделить буферную охранную зону шириной не менее 100 м вдоль западной части сухопутной границы с определённым режимом хозяйственной деятельности.

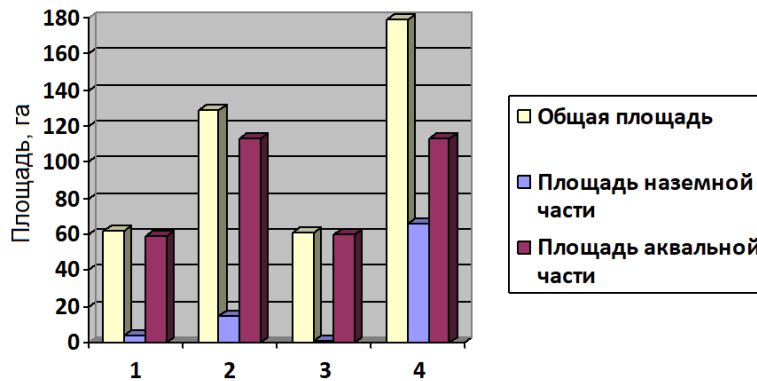


Рис. 4. Распределение площади наземной и аквальной частей памятников природы г. Севастополя (га): 1 — «ПАК у мыса Сарыч», 2 — «ПАК у мыса Лукулл», 3 — «ПАК у Херсонеса Таврического», 4 — «ПАК у мыса Фиолент»

Особенность памятника природы «ПАК у мыса Фиолент» состоит в том, что он имеет сопряжённое положение с другими объектами ООПТ юго-западной части г. Севастополя — природными заказниками регионального значения «Мыс Фиолент» и «Караньский», комплексным памятником природы «Мыс Фиолент» (табл. 2). Юго-западная часть г. Севастополя является экологическим коридором регионального уровня, который связывает ландшафты предгорного, горного и югобережного районов Крыма и по которому осуществляется миграция флоры и фауны вокруг Крымских гор. Приморская низкогорная зона представляет собой самый доступный и удобный путь обмена между предгорьем и южным берегом. Деградация средиземноморских ландшафтов в юго-западной прибрежной части региона приведёт к изоляции южного берега и предгорья, так как через восточную окраину Горного Крыма идёт обмен главным образом степными видами. Эта связь достаточно сильная: степень взаимодействия между Южным берегом Крыма и среднегорьем оценивается в 50 %, а для равнинного и Горного Крыма — около 45 % [Позаченюк, Панкеева, 2008]. Однако разный природоохранный статус сопряжённых охраняемых территорий и акваторий мало способствует сохранению и восстановлению природных комплексов.

Важную роль в оптимизации природоохранной деятельности играет разработка концепции экологических сетей, повышение природоохранного статуса охраняемых объектов с включением в их состав прибрежных территорий. Однако вопросы сопряжения наземных и морских экологических сетей в контактной зоне суша — море практически не разработаны. Ранее было обосновано создание природоохранного рекреационного объекта — регионального ландшафтного парка (РЛП) «Гераклея» на приморской территории Гераклейского полуострова, между Балаклавой и кутовой частью Казачьей бухты, с включением в его состав прилегающей морской акватории, объектов ООПТ в районе м. Фиолент и заказника «Бухта Казачья» [Тарасюк, 2001]. Также было рекомендовано создание национального природного парка с включением прибрежной акватории от м. Фиолент до м. Сарыч — национального парка «Севастопольский» [Перспективы создания ... , 2002] (рис. 5).

Таблица 2

Категория ООПТ	Площадь, га			Профиль*	Год создания
	общая	территория	акватория		
природные заказники регионального значения					
1. «Мыс Фиолент»	37,9	37,9	–	Л	1996
2. «Караньский»	568,7	451,0	117,7	Л	2017
памятники природы регионального значения					
3. «ПАК у мыса Фиолент»**	179,4	66,0	113,4	Г	1972
4. «Мыс Фиолент»	5,8	5,8	–	К	1969
Итого	791,8	560,7	231,1		

Примечания: * Л — ландшафтный, К — комплексный, Г — гидрологический; ** ПАК — прибрежный аквальный комплекс

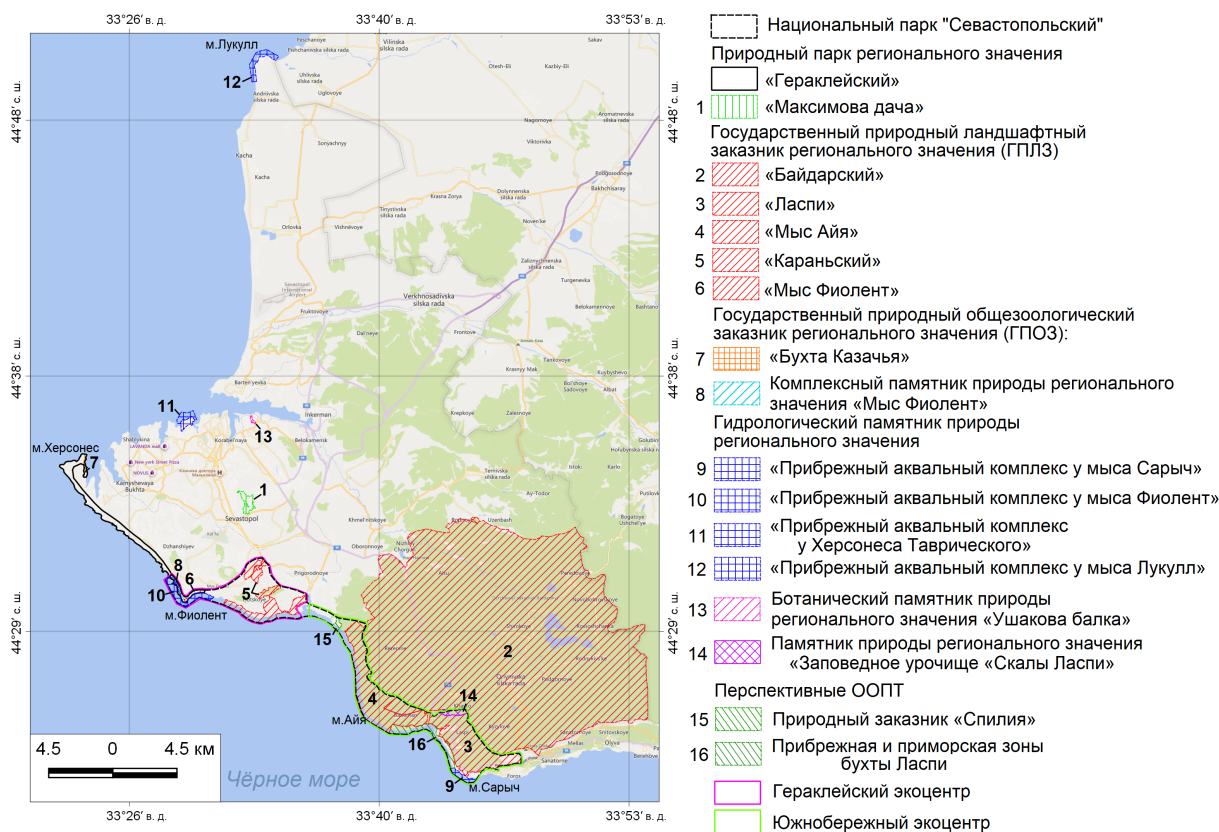


Рис. 5. Карта-схема экологической сети ООПТ г. Севастополя

Включение памятника природы «ПАК у мыса Фиолент» в состав единого природоохранного объекта вместе с прилегающими объектами (рис. 5) позволит создать юго-западный наземно-морской резерват, который в полном объеме будет выполнять природоохранные задачи. Целью этого резервата будет являться сохранение уникального приморского ландшафта с оригинальными формами рельефа в зоне контакта древневулканического массива м. Фиолент и Чёрного моря, а также охрана, сохранение и воспроизводство генофонда растительного и животного мира. Создание нового объекта полностью отвечает критериям подбора территорий и ландшафтных комплексов для создания ООПТ этих категорий. Организация природопользования

должна осуществляться на основе определения предельно допустимых нагрузок, что позволяет при осуществлении хозяйственной деятельности обеспечивать сохранение природоохранной ценности. Формирование полифункциональных объектов с дифференцированным режимом позволит максимально эффективно обеспечить охрану и рациональное использование природных ресурсов, развитие просветительской и образовательной деятельности, реализацию рекреационного потенциала территории и акватории.

Заключение

1. На основе проведённых ландшафтных исследований памятника природы регионального значения «ПАК у мыса Фиолент» составлена ландшафтная карта на уровне местностей и урочищ.

2. Уточнена и детализирована ландшафтная структура сухопутной части и прилегающей территории памятника природы, выделены 3 местности, 8 урочищ. Выявлено, что в ландшафтной структуре доминирует местность крутых и обрывистых склонов, сложенных магматическими и осадочными известняковыми породами с фисташково-можжевельным редколесьем в комплексе с лесом из фисташки туполистной и дуба пушистого на коричневых почвах.

3. Впервые для прибрежной зоны памятника природы составлена ландшафтная карта, выделены 3 местности, 8 урочищ. Показано, что для ландшафтной структуры побережья характерны местности глыбово-валунного бенча и подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, где преобладают ерикария косматая и гонголария бородатая.

4. Для оптимизации природоохранного режима памятника природы предложены следующие меры: 1) сформировать буферную охранную зону с шириной не менее 100 м вдоль западной части сухопутной границы с определённым режимом хозяйственной деятельности; 2) объединить объекты ООПТ юго-западной части г. Севастополя в единый наземно-морской резерват с установлением дифференцированного режима охраны на основе научно обоснованного функционального зонирования территории.

Список литературы

1. Блинова Е. И., Пронина О. А., Штрик В. А. Методические рекомендации по учёту запасов промысловых морских водорослей прибрежной зоны // Методы ландшафтных исследований и оценки запасов донных беспозвоночных и водорослей морской прибрежной зоны / М-во сел. хоз-ва РФ, Федерал. агентство по рыболовству, Всерос. науч.-исслед. ин-т по рыболовству и океанографии. – Москва : ВНИРО, 2005. – С. 80–127. – (Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки ; вып. 3).
2. Бондарева Л. В. Флора памятника природы регионального значения «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Фиолент» (Крым): сосудистые растения // Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Науки о Земле. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 341–350.
3. Горячкин Ю. Н., Долотов В. В. Морские берега Крыма. – Севастополь : Мор. гидрофиз. ин-т, 2019. – 256 с.
4. Евстигнеева И. К., Танковская И. Н. Гидрботанические исследования охраняемой акватории Западного Крыма (Чёрное море) // Фиторазнообразии Восточной Европы. – 2021. – Т. 15, № 4. – С. 16–33. – <https://doi.org/10.24412/2072-8816-2021-15-4-16-33>
5. Зинова А. Д. Определитель зелёных, бурых и красных водорослей южных морей СССР. – Москва ; Ленинград : Наука, 1967. – 397 с.

6. Исаченко А. Г. Ландшафтоведение и физико-географическое картографирование. – Москва : Высш. шк., 1991. – 368 с.
7. Калугина-Гутник А. А. Исследование донной растительности Чёрного моря с применением лёгководолазной техники // Морские подводные исследования: [сб. ст.] / АН СССР, Океаногр. комис., Секция подвод. исслед. ; редкол.: Б. П. Мантейфель [и др.]. – Москва : Наука, 1969. – С. 105–113.
8. Калугина-Гутник А. А. Фитобентос Чёрного моря. – Киев : Наук. думка, 1975. – 248 с.
9. Красная книга города Севастополя / Правительство Севастополя, Гл. упр. природ. ресурсов и экологии г. Севастополя ; отв. ред.: Довгаль И. В., Корженевский В. В. – Калининград ; Севастополь : РОСТ-ДООФК, 2018. – 432 с.
10. Красная книга Республики Крым. Растения, водоросли и грибы / М-во экологии и природ. ресурсов Республики Крым ; сост.: Абдулганиева Э. Ф. [и др.] ; отв. ред.: Ена А. В., Фатерыга А. В. – Симферополь : Ариал, 2015 – 478 с.
11. Красная книга Российской Федерации: (растения и грибы) / М-во природ. ресурсов и экологии Рос. Федерации [и др.] ; отв. ред.: Бардунов Л. В., Новиков В. С. – Москва : Т-во науч. изд. КМК, 2008. – 885 с.
12. Мильчакова Н. А., Александров В. А., Бондарева Л. В., Панкеева Т. В., Чернышева Е. В. Морские охраняемые акватории Крыма. – Севастополь : Ин-т мор. биол. исслед. ; Симферополь : Н. Орианда, 2015. – 312 с.
13. Особо охраняемые природные территории Севастополя / Гл. упр. природ. ресурсов и экологии г. Севастополя ; редкол.: Голубева Е. И. [и др.]. – Симферополь : Ариал, 2020. – 140 с.
14. Панкеева Т. В., Миронова Н. В. Ландшафтная структура береговой зоны памятника природы «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Сарыч» // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН. – 2022. – Вып. 1 (21) – С. 51–60. – <https://doi.org/10.21072/eco.2022.21.06>
15. Панкеева Т. В., Миронова Н. В. Ландшафтные исследования памятника природы «Прибрежный аквальный комплекс у Херсонеса Таврического» (Севастополь) // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2022. – Т. 8 (18), № 1. – С. 161–175.
16. Панкеева Т. В., Миронова Н. В., Пархоменко А. В. Ландшафтные исследования памятника природы «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Лукулл» // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН. – 2021. – Вып. 2 (18). – С. 36–48. – <https://doi.org/10.21072/eco.2021.18.03>
17. Перспективы создания Единой природоохранной сети Крыма / Таврич. нац. ун-т им. В. И. Вернадского, Ассоц. поддержки биол. и ландшафт. разнообразия Крыма – Гурзуф – 97. – Симферополь : Крым. учеб.-пед. изд-во, 2002. – 192 с.
18. Петров К. М. Подводные ландшафты: теория, методы исследования. – Ленинград : Наука, 1989. – 126 с.
19. Позаченюк Е. А., Панкеева Т. В. Геоэкологическая экспертиза административных территорий (Большой Севастополь). – Симферополь : Бизнес-Информ, 2008. – 296 с.
20. Позаченюк Е. А., Панкеева Т. В., Панкеева А. Ю., Пизова Е. В. Состояние особо охраняемых природных территорий города федерального значения Севастополя // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2020. – Т. 6 (16), № 2. – С. 161–171.
21. Тарасюк А. Н. Проблемы сохранения и развития природно-заповедного фонда Севастопольского региона // Записки общества геоэкологов. – 2001. – Вып. 5/6. – С. 53–63.
22. EUNIS Habitat Classification : [website]. – Copenhagen, 2007. – URL: <http://www.eea.europa.eu/themes/biodiversity/eunis/eunis-habitats-classification> (date of access: 15.02.2022).

23. European Red List of Habitats. Part 1. Marine habitats / S. Gubbay, N. Sanders, T. Haynes [et al.]. – Luxembourg : Publ. Office of the Europ. Union, 2016. – 46 p. – <https://doi.org/10.2779/032638>
24. Pankeeva T. V., Mironova N. V. Spatiotemporal changes in the macrophytobenthos of Laspi Bay (Crimea, Black Sea) // *Oceanology*, 2019. – Vol. 59, iss. 1. – P. 86–98. – <https://doi.org/10.1134/S0001437019010168>

**LANDSCAPE INVESTIGATIONS OF THE NATURAL MONUMENT
«COASTAL AQUATIC COMPLEX AT THE CAPE FIOLENT»**

Pankeeva T. V.¹, Mironova N. V.¹, Parkhomenko A. V.²

¹*A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: tatyanapankeeva@yandex.ru*

²*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: avparkhomenko52@gmail.com*

Abstract: Information about the landscape structure is given and a landscape map of the nature monument of regional significance «Coastal marine protected areas at the Cape Fiolent» (south-western coast of Sevastopol) is compiled. Landscape researches (2020–2021) were carried out by the method of landscape profiling in key areas. As a result of the study, the landscape structure of the land part and the adjacent territory was clarified and detailed, 3 terrains and 8 tracts were identified. The terrain is dominated by steep and precipitous slopes, composed of igneous and sedimentary limestone rocks with pistachio-juniper sparsely wooded in combination with a forest of *Pistacia mutica* and *Quercus pubescens* on brown soils. The landscapes of the terrestrial part have a high attractiveness, perform an important environmental function: they form a habitat, are soil-protective and water-regulating. During the study of the natural monument «Coastal marine protected areas at the Cape Fiolent», the landscape map of the coastal zone was compiled, 3 terrains, 8 tracts were identified. The landscape structure of the coastal area is characterized by areas of a block-boulder bench and an underwater slope composed of coarse-detrital deposits, where *Ericaria crinita* and *Gongolaria barbata* prevails. Underwater landscapes of the natural monument are also characterized by preservation, high production indicators of macrophytobenthos. Many species of marine flora of the natural monument are protected at the regional, state and international level. To ensure the integrity and preservation of biological and landscape diversity, it is advisable to use a systematic approach to the protection of the coastal zone, which will ensure the best results in the conservation and restoration of terrestrial and marine ecosystems.

Keywords: landscape, macrophytobenthos, protected areas, Black Sea.

Сведения об авторах

Панкеева
Татьяна
Викторовна кандидат географических наук, старший научный сотрудник
ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковале-
вского РАН», tatyanapankeeva@yandex.ru

Миронова
Наталья
Всеволодовна кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковале-
вского РАН», dr.nataliya.mironova@yandex.ru

Пархоменко
Анастасия
Владимировна старший инженер-исследователь ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизиче-
ский институт РАН», avparkhomenko52@gmail.com

Поступила в редакцию 25.05.2022 г.

Принята к публикации 12.08.2022 г.

АНТРОПОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЛАНДШАФТОВ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ) *

Журавлева О. В.¹, Каранин А. В.¹, Сухова М. Г.^{1,2}

¹Горно-Алтайский государственный университет, г. Горно-Алтайск, Российская Федерация,
e-mail: juravolg@mail.ru, vedmedk@bk.ru

²Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, Российская Федерация,
e-mail: mar_gs@ngs.ru

Аннотация: В данной статье предпринята попытка количественной оценки пространственной трансформации ландшафтов трёх административных районов Республики Алтай (Майминского, Кош-Агачского и Усть-Коксинского) вследствие антропогенного воздействия. В качестве ключевого показателя использовано изменение площади застроенной территории за период с 2017 по 2021 год. В результате установлено, что площадные изменения застроенной территории населённых пунктов исследуемых административных районов можно считать умеренными, значения показателя не достигают наблюдаемых по отдельным территориям в развивающихся странах, однако сопоставимы или превышают максимальные уровни некоторых развитых стран, например Германии и Чехии.

Ключевые слова: трансформация геосистем, экстенсивное развитие, оценка, скорость изменения границ, динамика, Республика Алтай.

Введение

Вопросы изучения преобразования геосистем под влиянием тех или иных процессов остаются актуальными, поскольку необходимо понимание направленности и скорости происходящих в этих геосистемах изменений в целях предотвращения процессов деградации.

Антропогенная трансформация ландшафтов обусловлена хозяйственной деятельностью человека, будь то промышленное, гражданское строительство или вовлечение земель в сельскохозяйственное производство. Это часто необходимое и оправданное вторжение, так как речь идёт об осознанном преобразовании природы для обеспечения жизнедеятельности социума. Однако часть территорий подвергается процессам преобразования неоправданно, что связано с экологическими просчётами, халатностью и т. д.

Существуют различные методы и подходы к изучению воздействия хозяйственной деятельности человека на ландшафты и оценки их ответных преобразований. Так, например, историко-ландшафтоведческие исследования направлены на оценивание антропогенно обусловленных изменений ландшафтов за определённое историческое время [Мильков, 1970; Жекулин, 1972; Жекулин, 1975; Давыдчук, 1977]. Другим подходом, который давно используется в подобных исследованиях, является подход, основанный на учёте степени деградации природных ландшафтов, выражаемой через величину нарушенности их отдельных компонентов [Сочава, 1978].

Материал и методы

Одним из аспектов, позволяющих судить о скорости трансформации геосистем, является процесс экстенсивного территориального развития населённых пунктов. Особую динамику этот показатель приобретает в районах освоения, которыми, применительно к региону исследования, могут считаться области, представляющие интерес как рекреационные территории.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Алтай в рамках научного проекта № 20-45-040016.

Для оценки изменения ареалов поселений нами выполнена оцифровка контуров застроенных территорий по снимкам 2017 и 2021 годов в масштабе 1:10 000. В качестве основы для картирования применялись космоснимки компании Digital Globe (Maxar Technologies) [Maxar, 2022], представленные в приложении Google Earth Pro. Сервис Google Earth и производные продукты широко используются в научных исследованиях, о чём свидетельствует обширный ряд публикаций [Calva et al., 2019; Lashko, 2021; Luo et al., 2018].

Кроме продукта корпорации Google для картопостроительных и картометрических работ использовалась свободная геоинформационная система QGIS [QGIS. Geographic ...].

Настоящее исследование касается низкогорного Майминского района Республики Алтай, расположенного в её северо-западной части, на границе с Алтайским краем, и высокогорных Кош-Агачского и Усть-Коксинского районов, расположенных на юго-востоке и в центральной части, на границе с Монголией, Китаем и Казахстаном (рис. 1). Эти территории выбраны как диаметрально противоположные по своим физико-географическим и экономико-географическим условиям в границах республики. Представляется интересным оценить скорость антропогенной трансформации геосистем таких разных регионов, приняв в качестве оценочного критерия расширение границ застройки. То есть речь идёт о полном переходе от естественных ландшафтов, хоть и испытывающих антропогенный прессинг у границ населённых пунктов, к антропогенным.

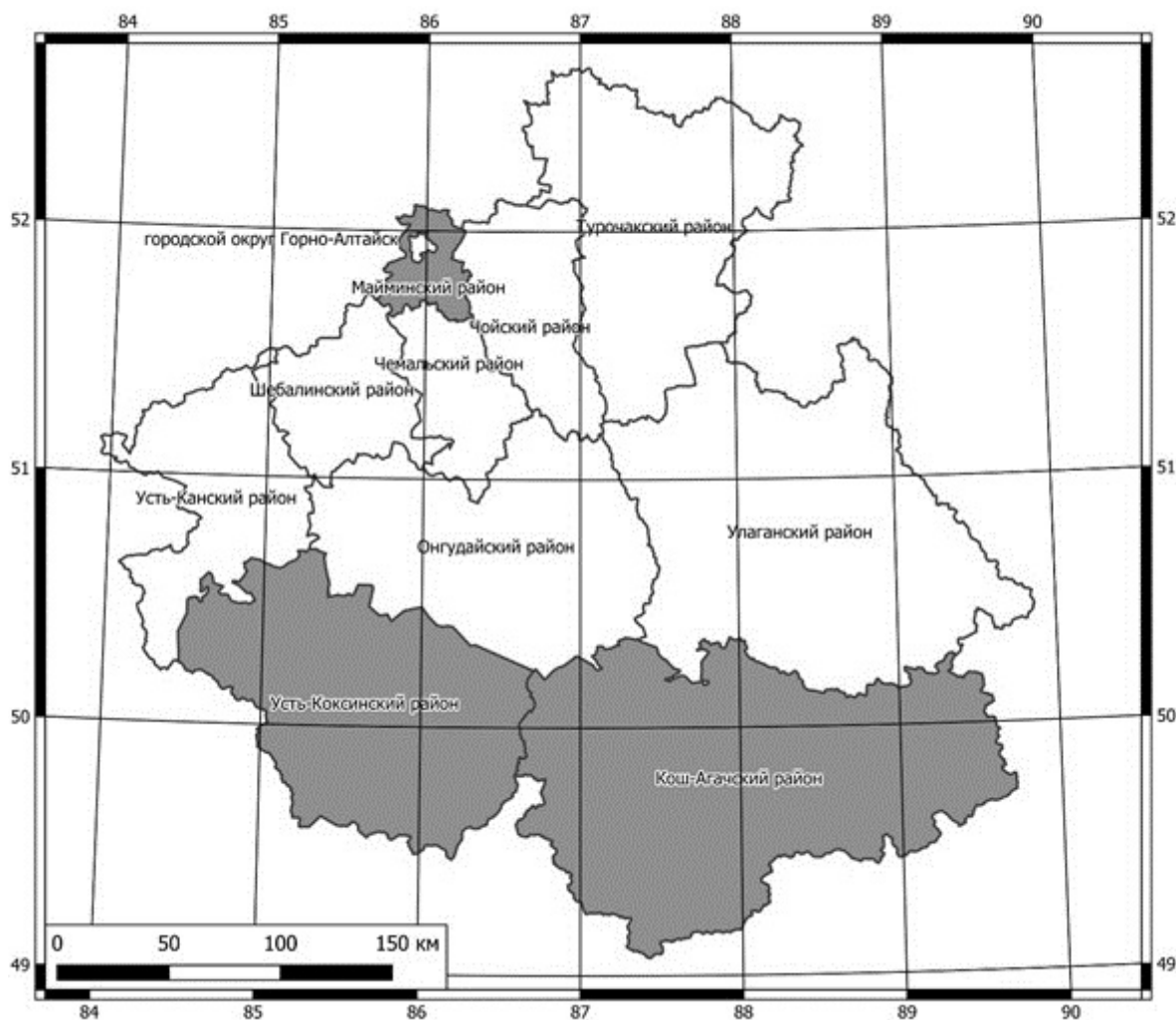


Рис. 1. Районы исследования

Результаты и обсуждение

Майминский – район с наибольшей плотностью населения (26,92 чел./км²), на его территории располагается единственный город региона. Район площадью 1285 км² расположен в северо-западной части Республики Алтай. Здесь наиболее благоприятные условия для жизни, начиная с природно-климатических и заканчивая транспортной доступностью и наличием инфраструктуры. Развиты деревопереработка, молочное скотоводство, пантовое оленеводство, птицеводство, хмелеводство, садоводство, овощеводство, пчеловодство. Кроме того, вдоль Катунки расположено большое количество туристических комплексов.

За исследуемый период (2017–2021 гг.) население района увеличилось на 1540 человек: с 33 042 до 34 582 человек [Численность населения ... , 2017; Численность населения ... , 2021]. Вместе с тем площадь застройки увеличилась на 3,6 км², что составляет 8,5 % (рис. 2). При этом основную долю прироста дал не единственный город, а населённые пункты, которые активно вовлекаются в обслуживание возрастающего туристического потока (рис. 3).

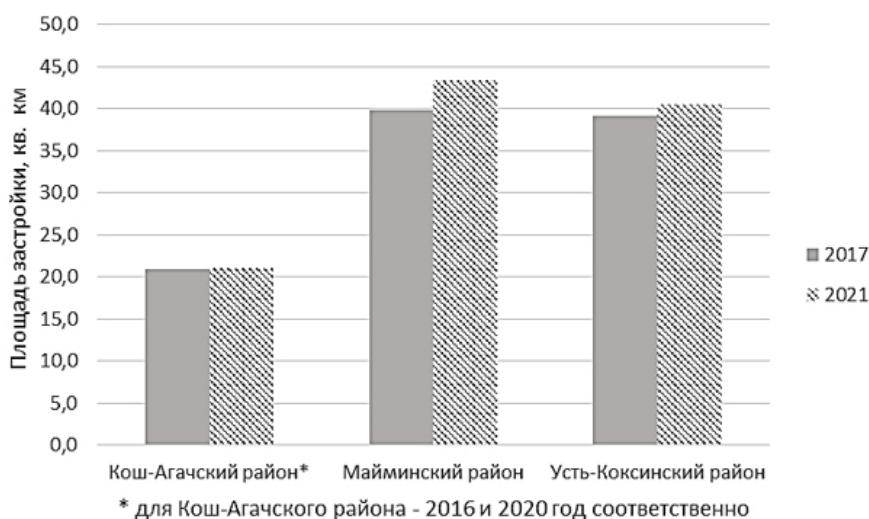


Рис. 2. Увеличение площади застройки в Кош-Агачском, Майминском и Усть-Коксинском районах Республики Алтай за период с 2017 по 2021 г.

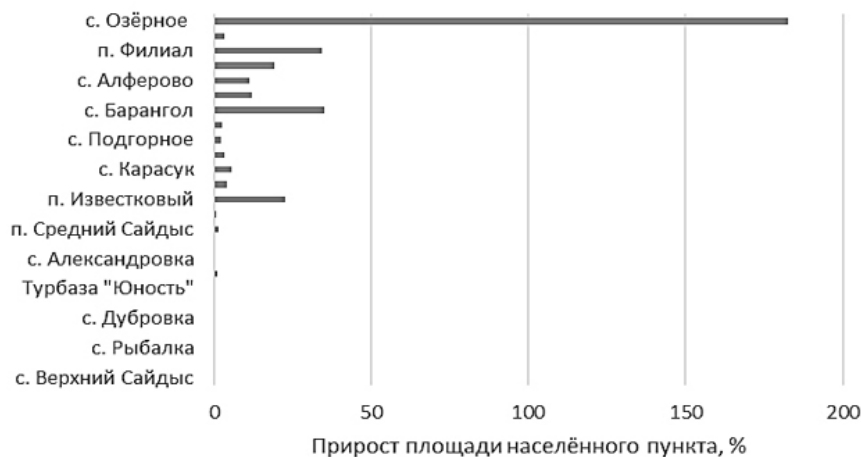


Рис. 3. Прирост площади некоторых населённых пунктов Майминского района Республики Алтай

Наиболее ярким примером является с. Озёрное. Причина в том, что в непосредственной близости от этого села ведётся строительство всепогодного курорта «Манжерок». Идея создания курорта возникла ещё в 2004 году, для реализации проекта было образовано ЗАО «Горнолыжный комплекс "Манжерок"». Со временем в состав акционеров вошло Государственное учреждение Республики Алтай «Центр по развитию туризма и рекреации Республики Алтай». В 2010 году была запущена первая канатная дорога и первые три корпуса гостиничного комплекса, однако возникли сложности с финансированием проекта и работы были приостановлены. В 2017 году в результате различных событий курорт стал одним из приоритетных инвестпроектов ПАО «Сбербанк России». С этого времени был запущен и реализован целый ряд проектов по строительству и развитию инфраструктуры и, как следствие, мы видим прирост освоенных площадей ближайшего населённого пункта — с. Озёрное на 180 %. Необходимо подчеркнуть, что речь идёт только о населённом пункте и не учитывается вовлечение и трансформация площадей для реализации самого проекта всепогодного курорта «Манжерок» (рис. 4).



Рис. 4. Контур застройки в 2017 и 2021 гг. в с. Озёрное

Кош-Агачский район расположен в южной части республики, в наиболее приподнятой части Алтае-Саянской горной страны. Его площадь составляет 19 845 км² при очень низкой плотности населения — 1 чел./км². Природные условия весьма суровы, поэтому территория была приравнена к районам Крайнего Севера. Развита мясное скотоводство, козоводство, овцеводство, коневодство, пантовое оленеводство, также ведётся добыча вольфрамомолибденовой руды.

За исследуемый период население района увеличилось на 802 человека: с 18 814 до 19 616 человек [Численность населения ... , 2017; Численность населения ... , 2021]. Площадь застройки увеличилась на 2,1 км², что составляет 1,1 % (рис. 2). В отличие от Майминского района прирост земель населённых пунктов здесь составил весьма незначительную величину (рис. 5). В основном этот прирост обеспечили застройки в районе Кош-Агачской солнечной электростанции и в районе горного обогатительного комбината.

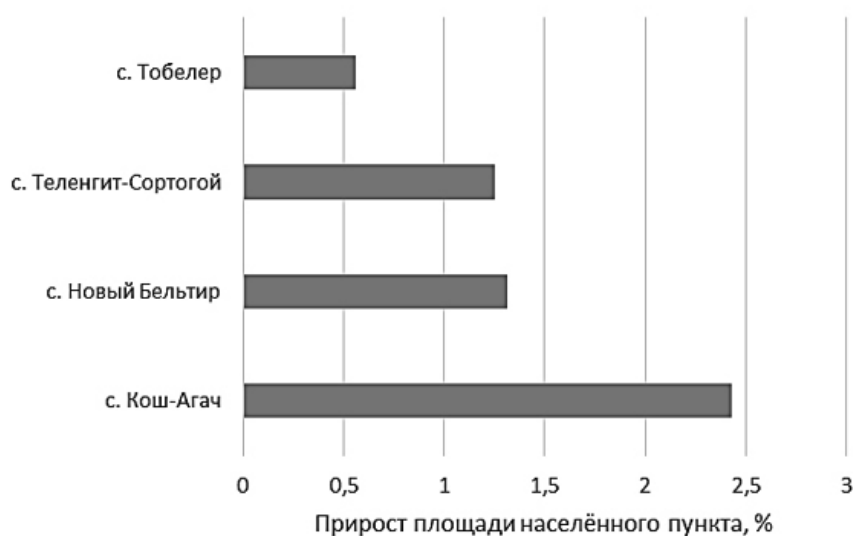


Рис. 5. Прирост площади некоторых населённых пунктов Кош-Агачского района Республики Алтай

Усть-Коксинский район расположен в юго-западной части Республики Алтай. Его рельеф наиболее полно отражает особенности Алтайской горной страны: высокие горные хребты с областями современного горно-долинного оледенения сочетаются с широкими долинами рек и межгорными депрессиями. Площадь территории 12 958 км², плотность населения 1,23 чел./км². Богатейшие природно-климатические ресурсы позволяют развивать лесозаготовку, пантовое мараловодство, мясо-молочное скотоводство, козоводство, овцеводство, коневодство, пчеловодство, производство продовольственного зерна, сбор лекарственно-технического сырья. Активно развивается туризм.

За исследуемый период население района сократилось на 423 человека: с 16 404 до 15 981 человек [Численность населения ... , 2017; Численность населения ... , 2021]. Площадь застройки увеличилась на 1,3 км², что составляет 3,4 % (рис. 1). Основной прирост обеспечивался за счёт строительства новых турбаз и ферм. Что касается площади застройки населённых пунктов, то здесь мы зафиксировали её сокращение в с. Катанда (–0,84 %) и с. Амур (–0,003 %) (рис. 6).

Скорость изменения площади застроенной территории населённых пунктов Кош-Агачского (0,28 % в год), Усть-Коксинского (0,85 % в год) и Майминского (2,1 % в год) районов можно считать довольно умеренной: показатели не достигают значений, наблюдаемых по отдельным

ареалам в развивающихся странах (например, для города Цзинчжоу в Китае — 3,1 % в год в период с 1999 по 2014 г. [Wang et al., 2018], для окрестностей города Сулеймания на северо-востоке Ирака — 4 % в год в период с 1989 по 2005 г. [Марчуков, Чеман, 2012]), однако сопоставимы или превышают максимальные уровни некоторых развитых стран (1–1,2 % в год для Германии [Siedentop, Kausch, 2004] и Чехии [Hoymann, 2012]).

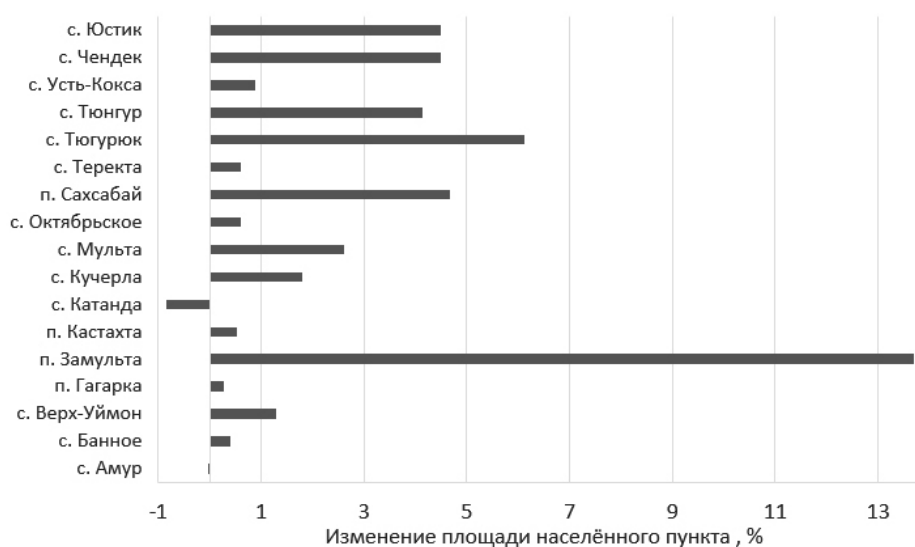


Рис. 6. Изменение площади некоторых населённых пунктов Усть-Коксинского района Республики Алтай

Учитывая незначительную долю площади населённых пунктов относительно всей территории районов (Кош-Агачский — 0,1 %, Усть-Коксинский — 0,3 %, Майминский — 3,4 %), отличающейся низкой экономической плотностью, а также сельский характер расселения, можно отметить, что динамика антропогенной трансформации ландшафтов по оцениваемому критерию не носит необратимого характера.

Выводы

Для Республики Алтай пока не стоит вопрос выбора и поиска компромисса между неотложными человеческими потребностями и поддержанием способности биосферы производить товары и услуги в долгосрочной перспективе. Значимая антропогенная трансформация ландшафтов, подвергающихся интенсивному хозяйственному использованию, в основном обусловлена экстенсивным территориальным развитием населённых пунктов, туристических баз и сельскохозяйственных ферм. Изъятие земель под нужды промышленности очень невелико. Однако если говорить о воздействии таких процессов, как перевыпас скота, деградация земель вследствие активизации процессов засоления, увеличивающийся поток туристов, то они со временем также способны привести к значительной антропогенной трансформации естественных ландшафтов. В данном исследовании мы рассмотрели лишь один из параметров, который можно интерпретировать наиболее однозначно, — изменение площади застройки. Однако наблюдаемых нами явлений, способных усугубить ситуацию, гораздо больше. Тем не менее даже один исследуемый параметр в ретроспективе всего 5 лет показал ощутимые изменения. Изучение антропогенных факторов трансформации природных комплексов региона необходимо для понимания того, как уменьшить возможный ущерб, предотвратить разрушение экосистем, сокращение биоразнообразия, снижение биологической продуктивности.

Список литературы

1. Давыдчук В. С. История становления антропогенного фактора развития ландшафта: (На примере Верхнего Поочья) : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.01. – Москва, 1977. – 19 с.
2. Жекулин В. С. Историческая география ландшафтов. – Новгород : [б. и.], 1972. – 228 с.
3. Жекулин В. С. Историческая география: предмет и методы / Ленингр. гос. пед. ин-т им. А. И. Герцена. – Ленинград : ЛГПИ, 1975. – 62 с.
4. Марчуков В. С., Чеман Д. А. Оценка изменений застроенных территорий и растительного покрова Ирака по многозональным космическим снимкам // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2012. – № 5. – С. 41–44.
5. Мильков Ф. Н. Ландшафтная сфера Земли. – Москва : Мысль, 1970. – 207 с.
6. Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1978. – 319 с.
7. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2017 года // Федеральная служба государственной статистики : [офиц. сайт]. – [Москва, 2017]. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/mun_obr2017_348639.rar (дата обращения: 01.06.22).
8. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2021 года // Федеральная служба государственной статистики : [офиц. сайт]. – [Москва, 2021]. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/bul_Chislen_nasel_MO-01-01-2021.rar (дата обращения: 01.06.22).
9. Calva L. G., Golubov J., Mandujano M. C., Lara-Domínguez A. L., López-Portillo J. Assessing Google Earth Pro images for detailed conservation diagnostics of mangrove communities // Journal of Coastal Research. – 2019. – Vol. 92, spec. iss. 1. – P. 33–43. – <https://doi.org/10.2112/SI92-005.1>
10. Hoymann J. Quantifying demand for built-up area — a comparison of approaches and application to regions with stagnating population // Journal of Land Use Science. – 2012. – Vol. 7, iss. 1. – P. 67–87. – <https://doi.org/10.1080/1747423X.2010.522600>
11. Lashko S. P. Hypsometry of Google Earth as an instrument of monitoring agricultural activity on the coast of Kremenchuk reservoir // 15th International Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», 17–19 November, Kyiv / Europ. Assoc. of Geoscientists and Engineers. – [S. l.] : EAGE, 2021. – P. 1–5. – <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215k2006>
12. Luo L., Wang X., Guo H., Lasaponara R., Shi P., Bachagha N., Li L., Yao Ya, Masini N., Chen F., Ji W., Cao H., Li C., Hu N. Google Earth as a powerful tool for archaeological and cultural heritage applications: a review // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, iss. 10. – [no. art.] 1558 (33 p.). – <https://doi.org/10.3390/rs10101558>
13. Maxar : website / Maxar Technologies Inc. – [S. l.], 2022. – URL: <https://www.maxar.com/> (date of access: 01.06.22).
14. QGIS. Geographic Information System / QGIS Assoc. – URL: <https://www.qgis.org/> (date of access: 01.06.22).
15. Siedentop S., Kausch S. Die räumliche struktur des flächenverbrauchs in Deutschland: eine auf gemeindedaten basierende analyse für den zeitraum 1997 bis 2001 // Raumforschung und Raumordnung. – 2004. – Vol. 62, no. 1. – P. 36–49. – <https://doi.org/10.1007/BF03183466>
16. Wang L., Zhu J., Xu Ya., Wang Z. Urban built-up area boundary extraction and spatial-temporal characteristics based on land surface temperature retrieval // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, iss. 3. – [no. art.] 473 (21 p.). – <https://doi.org/10.3390/rs10030473>

ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION OF LANDSCAPE (BY THE EXAMPLE OF THE REPUBLIC OF ALTAI)

Zhuravleva O. V.¹, Karanin A. V.¹, Sukhova M. G.^{1,2}

¹Gorno-Altai State University, Gorno-Altai, Russian Federation,

e-mail: juravolg@mail.ru, vedmedk@bk.ru

²Institute of Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russian Federation,

e-mail: mar_gs@ngs.ru

Abstract: This article attempts to quantify the spatial transformation of the landscapes of three administrative districts of the Altai Republic (Maiminsky, Kosh-Agachsky and Ust-Koksinsky) due to anthropogenic impact. The change in the built-up area for the period from 2017 to 2021 was used as a key factor. As a result, it was found that the areal changes in the built-up area of the settlements of the studied administrative regions can be considered moderate, the values of the indicator do not reach those observed for individual territories in developing countries, but are comparable and exceed the maximum levels of some developed countries, such as Germany and the Czech Republic.

Keywords: transformation of geosystem boundaries, extensive development, assessment, rate of change, dynamics, Republic of Altai.

Сведения об авторах

Журавлева Ольга Валерьевна кандидат географических наук, доцент кафедры географии и природопользования ФГБОУ ВО «Горно-Алтайский государственный университет», juravolg@mail.ru

Каранин Андрей Владимирович кандидат географических наук, доцент кафедры географии и природопользования ФГБОУ ВО «Горно-Алтайский государственный университет», vedmedk@bk.ru

Сухова Мария Геннадьевна доктор географических наук, доцент, проректор по НИИД ФГБОУ ВО «Горно-Алтайский государственный университет», старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН, mgs.gasu@yandex.ru

*Поступила в редакцию 10.06.2022 г.
Принята к публикации / 28.06.2022 г.*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ имени А.О. КОВАЛЕВСКОГО РАН»
КАРАДАГСКАЯ НАУЧНАЯ СТАНЦИЯ им. Т.И.ВЯЗЕМСКОГО – ПРИРОДНЫЙ ЗАПОВЕДНИК РАН

ТРУДЫ КАРАДАГСКОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ им. Т.И. ВЯЗЕМСКОГО – ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА РАН

Основан в мае 2016 г.

Основатель журнала –
ФГБУН «Карадагская научная станция им. Т.И.Вяземского –
природный заповедник РАН»

Научное издание

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций

**Свидетельство о регистрации средства массовой информации
Сер. ПИ № ФС77-76870 от 11 октября 2019 г.**

Утверждено к печати научно-техническим советом Карадагской научной станция им.
Т.И.Вяземского – природного заповедника РАН – филиалом Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт биологии
южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»
(протокол № 4 от 23.09.2022 г.)

Главный редактор: канд. геогр. наук Горбунов Р. В.
Заместитель главного редактора: канд. биол. наук Мальцев В. И.
Технические редакторы: Миронюк О. А.
Корректор: Уткина Е. Г.
Компьютерная вёрстка: Майборода Д. И.

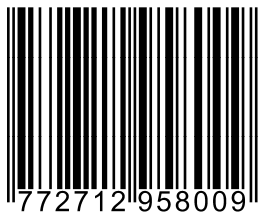
Подписано к печати: 27.09.2022 г.

Дата выхода: 30.09.2022 г.

Формат 60x84/8 Усл. печ. л. 10,9 Тираж: 100 экз.

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

ISSN 2712-9586



9 772712 958009 >