

БИОРАЗНООБРАЗИЕ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

О массовых скоплениях шаров из зелёной водоросли *Cladophora liniformis* Kützing в прибрежной зоне Керченского полуострова (Крым, Чёрное море)

МИЛЬЧАКОВА Н. А., КАНДАУРОВА Д.А., ЧЕРНЫШЕВА Е. Б.

ТОМ 11
ВЫПУСК 2
2026

БИОРАЗНООБРАЗИЕ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

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

Все материалы проходят двойное независимое анонимное рецензирование.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор: Горбунов Роман Вячеславович, д. г. н., ФИЦ ИнБЮМ
Заместитель главного редактора: Довгаль Игорь Васильевич, д. б. н., профессор, ФИЦ ИнБЮМ
Ответственный секретарь: Жукова Юлия Владимировна, ФИЦ ИнБЮМ

Алекперов Ильхам Хайям оглы, чл.-корр. НАН Азербайджана, д. б. н., проф., Институт зоологии НАН Азербайджана, Азербайджан

Василов Раиф Гаянович, д. б. н., проф., НИЦ «Курчатовский институт»

Воскресенская Елена Николаевна, д. г. н., проф., ИПТС

Давидович Николай Александрович, д. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Дмитренко Павел Сергеевич, д. х. н., ТИБОХ

Егоров Виктор Николаевич, академик РАН, д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Илюшина Татьяна Владимировна, д. г. н., проф., МИИГАиК

Керимов Ибрагим Ахмедович, д. ф.-м. н., проф., ГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова

Киприянова Лаура Мингалиевна, д. б. н., ИВЭП СО РАН

Кузнецов Андрей Николаевич, д. б. н., Совместный Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр

Найденко Сергей Валерьевич, чл.-корр. РАН, д. б. н., проф., ИПЭЭ РАН

Неврова Елена Леонидовна, д. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Ольчев Александр Валентинович, д. б. н., проф., МГУ им. М. В. Ломоносова

Плугатарь Юрий Владимирович, чл.-корр. РАН, д. с.-х. н., НБС — ННЦ РАН

Полонский Александр Борисович, чл.-корр. РАН, д. г. н., проф., ИПТС

Пономарева Елена Николаевна, д. б. н., проф., ЮНЦ РАН

Рожнов Вячеслав Владимирович, академик РАН, д. б. н., ИПЭЭ РАН

Рындин Алексей Владимирович, академик РАН, д. с.-х. н., ФИЦ СЦ РАН

Рябушко Виталий Иванович, д. б. н., ФИЦ ИнБЮМ

Солдатов Александр Александрович, д. б. н., проф., ФИЦ ИнБЮМ

Черных Дмитрий Владимирович, д. г. н., доцент, ИВЭП СО РАН

Широкова Вера Александровна, д. г. н., проф., ИИЕТ РАН

Яицкая Наталья Александровна, к. г. н., ФИЦ СЦ РАН

Cosenza Carlos Alberto Nunes, D. Sc., Federal University of Rio de Janeiro, Brazil

Krykhtine Fabio Luiz Peres, D. Sc., Federal University of Rio de Janeiro, Brazil

Mayén-Estrada Rosaura, PhD, National Autonomous University of Mexico, Mexico

Pešić Vladimir, PhD, University of Montenegro, Montenegro

Ranasinghe Dona Marina Sherine Hemanthi

Kariyawasam, PhD, University of Sri Jayewardenepura, Sri Lanka

Tapas Chatterjee, PhD, D. Sc., Indian School of Learning, ISM Annexe, India

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, просп. Нахимова, д. 2.
Телефон +7 (8692) 54-41-10

Соиздатель журнала:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр «Субтропический
научный центр Российской академии наук»
354002, Российская Федерация, Краснодарский край, г. Сочи,
ул. Яна Фабрициуса, 2/28

E-mail: biodiversity_journal@ibss-ras.ru | Сайт журнала: <https://eco-ibss.ru>

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», 2026

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», 2026

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ имени А. О. КОВАЛЕВСКОГО РАН»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр
«СУБТРОПИЧЕСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

БИОРАЗНООБРАЗИЕ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

2026 Том 11 вып. 2

Основан в мае 2016 г.

Научный журнал

Выходит 4 раза в год

СОДЕРЖАНИЕ

Биоразнообразие экосистем и его сохранение

Мильчакова Н. А., Чернышева Е. Б. О распространении зелёной водоросли *Ulva maeotica* (Proshkina-Lavrenko) P. M. Tsarenko в прибрежной зоне Каспийского моря (Дагестанский сектор) 3–9

Панкеева Т. В., Каширина Е. С. Природоохранная ценность и перспективы создания природного заказника «Спилия» (Севастополь) 10–24

Тихонова Е. А., Соловьёва О. В., Сидоров И. Г., Аблязов Э. Р., Гусева Е. В., Нгуен Чонг Хиен, Ву Тхы Минь Чау, Ле Дык Мань, Май Куанг Туэн, Ле Минь Туан Ихтиофауна реки Донгнай в границах национального парка Каттхьен (Вьетнам) с учётом физико-химических параметров среды обитания в сезон дождей 25–35

Структура, функционирование и динамика экосистем

Мильчакова Н. А., Кандаурова Д. А., Чернышева Е. Б. О массовых скоплениях шаров из зелёной водоросли *Cladophora liniformis* Kützinger в прибрежной зоне Керченского полуострова (Крым, Чёрное море) 36–46

Zhao B., Jiang C. The role of spatial resolution in vegetation information extraction: a comparison of Jilin-1 and Sentinel-2 satellite data in the Grodnenskaya Pushcha biosphere reserve (Belarus) 47–57

Pham C. N., Gorbunov R. V., Lapchenko V. A., Gorbunova T. Yu., Tabunshchik V. A. Snow cover chemistry in Crimean forest ecosystems: a case study of the Karadag Nature Reserve 58–78

Проблемы загрязнения водных экосистем и морская радиохемиоэкология

Бурдиян Н. В., Дорошенко Ю. В., Зиновьева Е. В. Микробиологическая характеристика акватории Керченского пролива и черноморского предпроливья спустя три месяца после аварии танкеров в декабре 2024 г. (по материалам 134-го рейса НИС «Профессор Водяницкий») 79–86

Биологические ресурсы, биотехнология и аквакультура

Тренкешиу Р. П., Лелеков А. С., Боровков А. Б. Основы метабономики микроводорослей 87–95

Federal State Budget Scientific Institution
Federal Research Center
«A. O. KOVALEVSKY INSTITUTE OF BIOLOGY OF THE SOUTHERN SEAS OF RAS»
Federal State Budget Scientific Institution
Federal Research Center
«THE SUBTROPICAL SCIENTIFIC CENTRE OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES»

BIODIVERSITY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

2026 Vol. 11 iss. 2

Established in May 2016

Periodical

Issued 4 times a year

CONTENT

Biodiversity of ecosystems and its conservation

Milchakova N. A., Chernysheva E. B. **On the distribution of the green alga *Ulva maeotica* (Proshkina-Lavrenko) P. M. Tsarenko in the coastal zone of the Caspian Sea (Dagestan sector)** 3–9

Pankeeva T. V., Kashirina E. S. **The environmental value and prospects for the creation of «Spilia» natural reserve (Sevastopol)** 10–24

Tikhonova E. A., Soloveva O. V., Sidorov I. G., Abliazov E. R., Guseva E. V., Nguyen Trong Hiep, Vu Thi Minh Chau, Le Duc Manh, Mai Quang Tuyen, Le Minh Tuan **Ichthyofauna of the Dong Nai River aquatory in the Cat Tien National Park (Vietnam) taking into account the physicochemical parameters of their habitat during the rainy season** 25–35

Structure, functioning and dynamic of the ecosystem

Milchakova N. A., Kandaurova D. A., Chernysheva E. B. **On mass findings of green alga *Cladophora liniformis* Kützting balls in the coastal zone of the Kerch Peninsula (Crimea, Black Sea)** 36–46

Zhao B., Jiang C. **The role of spatial resolution in vegetation information extraction: a comparison of Jilin-1 and Sentinel-2 satellite data in the Grodnenskaya Pushcha biosphere reserve (Belarus)** 47–57

Pham C. N., Gorbunov R. V., Lapchenko V. A., Gorbunova T. Yu., Tabunshchik V. A. **Snow cover chemistry in Crimean forest ecosystems: a case study of the Karadag Nature Reserve** 58–78

Problems of pollution of aquatic ecosystems and marine radiochemoecology

Burdiyan N. V., Doroshenko Yu. V., Zinovieva E. V. **Microbiological characteristics of the water area of the Kerch Strait and the Black Sea pre-strait three months after the tanker accident in December 2024 (based on the materials of the 134th voice of the R/V «Professor Vodyanitsky»)** 79–86

Biological resources, biotechnology and aquaculture

Trenkenshu R. P., Lelekov A. S., Borovkov A. B. **Basics of microalgae metabonomics** 87–95

БИОРАЗНООБРАЗИЕ ЭКОСИСТЕМ
И ЕГО СОХРАНЕНИЕ

УДК 582.263-19(262.81.05:470.67)

DOI: [10.21072/eco.2026.11.2.01](https://doi.org/10.21072/eco.2026.11.2.01)

О РАСПРОСТРАНЕНИИ ЗЕЛЁНОЙ ВОДОРОСЛИ
ULVA MAEOTICA (PROSHKINA-LAVRENKO) P. M. TSARENKO
В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ (ДАГЕСТАНСКИЙ СЕКТОР) *

Мильчакова Н. А., Чернышева Е. Б.

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

г. Севастополь, Российская Федерация,

e-mail: nmilchakova@ibss-ras.ru

Аннотация: Дана эколого-биоморфологическая характеристика зелёной водоросли *Ulva maeotica* — охраняемого на региональном уровне эндемика Азово-Черноморского бассейна, обнаруженного впервые в прибрежной зоне Каспийского моря. Качественные пробы макрофитобентоса отбирали на 16 участках взморья Дагестана, на глубине от 0,1 до 3 м, в 2024 и 2025 гг. Показано, что *U. maeotica* встречается на двух участках побережья г. Махачкалы в составе ульвового фитоценоза (глубина 0,2–0,5 м) на илисто-песчаных донных отложениях в акваториях с повышенным хозяйственно-бытовым загрязнением. Приведены анатомо-морфометрические показатели *U. maeotica*, некоторые экологические факторы, влияющие на её рост и развитие, а также причины расширения ареала. Показано, что данные о новых и чужеродных видах макрофитов Каспийского моря могут быть использованы для решения природоохранных задач по снижению рисков их инвазии и сохранению прибрежных экосистем дагестанского сектора Каспийского моря.

Ключевые слова: новые и чужеродные виды, флора макроводорослей, Chlorophyta, прибрежные биотопы, Каспийское море

Введение

Согласно данным альгологических исследований, в составе флоры макроводорослей Каспийского моря к середине XX в. насчитывалось 63 вида, из которых 29 относилось к зелёным (Chlorophyta), 13 — бурым (Ochrophyta) и 21 — красным (Rhodophyta) водорослям [Зинова, Забержинская, 1965; Зинова, 1967; Забержинская, 1968; Зинова, Калугина-Гутник, 1974; Калугина-Гутник, 1975]. В последующих работах указывалось на наличие во флоре около 70 видов (на основе обобщения ранее опубликованных и собственных данных, без инвентаризации гербарных фондов) [Степаньян, 2016]. Некоторые исследователи отмечали, что в последние десятилетия наблюдалось снижение общего количества видов макрофитов Каспийского моря, тогда как доля зелёных водорослей, преимущественно представителей родов *Ulva*, *Cladophora* и *Ulotrix*, произрастающих в основном в эвтрофных водах, увеличилась в некоторых регионах в 1,5–2 раза [Степаньян, 2016; Muradova, Mukhtarova, Feyziyev, 2024]. Так, доля Chlorophyta у берегов Азербайджана (Апшеронский полуостров) при низком разнообразии макрофитов (14 видов) достигла 71 % [Muradova, Mukhtarova, Feyziyev, 2024].

В результате проведённых исследований макрофитобентоса прибрежной зоны Каспийского моря (дагестанский сектор) в 2024–2025 гг. нами выявлен новый вид альгофлоры — зелёная водоросль *Ulva maeotica* (Proshkina-Lavrenko) P.M.Tsarenko (= *Enteromorpha maeotica* Pr.-Lavr.), ранее являвшаяся эндемиком Азовского моря [Прошкина-Лавренко, 1945]. После обнаружения этого

*Изучение макрофитобентоса Каспийского моря выполнено в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ (№ 124022400148-4).

вида в районе Керченского пролива, в лиманах и мелководных заливах северо-восточной и северо-западной частей Чёрного моря, у берегов Румынии и Болгарии он стал считаться эндемиком Азово-Черноморского бассейна [Зинова, 1967; Калугина-Гутник, 1975; Красная книга Краснодарского края, 2017; Степаньян, 2019; Красная книга Республики Крым, 2025; Caraus, 2002; Dimitrova-Konaklieva, 2000].

С учётом редкости для Азово-Черноморского бассейна, эндемичности и дизъюнктивного ареала, *U. maeotica* включена в Красную книгу Республики Крым [Красная книга Республики Крым, 2025] и Красную книгу Украины [Червона книга України, 2009] со статусом «редкий», а в Красную книгу Краснодарского края — как «уязвимый» [Красная книга Краснодарского края, 2017]. У берегов Крымского полуострова *U. maeotica* охраняется в акваториях природных заповедников «Лебяжий острова» и «Казантипский», ландшафтно-рекреационного парка «Бакальская коса», государственного природного заказника «Каркинитский» и других особо охраняемых территорий (ООПТ) [Морские охраняемые ... , 2015].

В связи с находкой *U. maeotica* в прибрежной зоне дагестанского сектора Каспийского моря была поставлена цель работы: охарактеризовать анатомо-морфометрические и биотопические особенности нового для альгофлоры вида, оценить вероятность формирования его самоподдерживающейся популяции и расширения ареала.

Материал и методы

Характеристика района исследований. В составе донных отложений прибрежной зоны дагестанского сектора Каспийского моря преобладают илистые пески, реже встречаются известковые массивы, обнажившиеся в последние годы из-за снижения уровня моря. Солёность поверхностных вод на взморье г. Махачкалы варьировала от 8,8 до 9,8 ‰ [Качество морских ... , 2026], в районе отбора проб макрофитобентоса — от 4 до 5 ‰. Среднегодовая температура воды составляла 20,7 °С при диапазоне варьирования от 9,4 до 29,1 °С. Прибрежные водные массы достаточно аэрированы, содержание растворённого кислорода изменялось от 7,97 до 10,27 мгО₂/дм³ при среднегодовом значении 9,43 мгО₂/дм³ [Качество морских ... , 2026]. Основной вклад в загрязнение прибрежных акваторий вносят фенолы, что свидетельствует о стойком антропогенном воздействии. Среднегодовое содержание нитритов, нитратов и фосфатов не превышало предельно допустимых концентраций (ПДК), у аммонийного азота оно было близко или превышало ПДК [Качество морских ... , 2026]. По данным за 2024 г., водные массы у побережья г. Махачкалы отнесены к IV классу качества — «загрязнённые» — на основании индекса загрязнённости вод, равному 1,49 и рассчитанному по содержанию фенолов, аммонийного азота, нефтяных углеводородов и растворённого кислорода.

Материал и методы. Качественные пробы макроводорослей отбирали в прибрежной зоне Дагестана на 16 участках вручную, от псевдолииторальной зоны до глубины 3 м, в летний и осенний периоды 2024 и 2025 гг. Идентификацию видов проводили методами световой микроскопии с использованием определителей и справочных пособий [Зинова, 1967; Виноградова, 1974; Экологическая физиология ... , 2016], их названия даны с учётом номенклатурных изменений [Guiry M., Guiry G.]. Гербарные образцы макроводорослей размещены в гербарных фондах ФИЦ ИнБЮМ (SIBS) и Дагестанского государственного университета (LENUD).

Уточнение ареала *U. maeotica* проводили по GBIF [GBIF. Global Biodiversity ...] и опубликованным источникам [Экологическая физиология ... , 2016; Красная книга Краснодарского края, 2017; Красная книга Республики Крым, 2025; Caraus, 2002; Червона книга України, 2009]. К чужеродным относили вид, проникший в Каспийское море, за границы своего ареала, самостоятельно, случайно или преднамеренно интродуцированный [The great reshuffling ... , 2001].

Результаты и обсуждение

Согласно современной номенклатуре *Ulva maeotica* (Proshkina-Lavrenko) P.M. Tsarenko относится к отделу Chlorophyta, классу Ulvophyceae, порядку Ulvales, семейству Ulvaceae [Guiry M., Guiry G.]. Большинство представителей ульвовых водорослей довольно хорошо изучены, тогда как сведения об эколого-биологических особенностях *U. maeotica* в Азово-Черноморском бассейне малочисленны [Зинова, 1967; Калугина-Гутник, 1975; Экологическая физиология ... , 2016; Степаньян, 2019]. Как и многие представители рода, ульва меотическая произрастает на мелководных участках акваторий, чаще всего значительно загрязнённых хозяйственно-бытовыми стоками [Виноградова, 1974].

Анализ анатомо-морфометрических признаков *U. maeotica* из прибрежной зоны Махачкалы показал, что они соответствуют диагностическим: слоевище грубоватое, тёмно-зелёного цвета, пузыревидное, яйцевидной или продолговато-яйцевидной формы, неразветвлённое, с коротким стебельком и базальной подошвой, с характерным отверстием на вершине [Зинова, 1967; Виноградова, 1974; Экологическая физиология ... , 2016; Dimitrova-Konaklieva, 2000]. В акваториях двух местообитаний длина таллома *U. maeotica* варьировала от 5,7 до 7,5 см (табл. 1, рис. 1А), его ширина в средней части — от 1,0 до 1,6 см, что также сходно с линейными размерами по диагнозу, хотя максимальная длина и ширина могут достигать 20 и 8 см соответственно [Зинова, 1967; Виноградова, 1974].

Таблица 1

Линейные размеры талломов *Ulva maeotica* из местообитаний прибрежной зоны г. Махачкалы (дагестанский сектор Каспийского моря, июнь 2025 г.)

Местообитание	Длина таллома, см	Ширина таллома, см		
		основание	средняя часть	вершина
Чёрные камни, от уреза воды до глубины 1,5 м	6,9–7,5	0,2–0,3	1,1–1,6	0,7–1,6
Пос. Редукторный, у горбольницы, от уреза воды до глубины 0,3 м	5,7	0,1	1	0,8

Клетки *U. maeotica* расположены без особого порядка, с поверхности 4–6-угольные, чаще равносторонние, реже вытянутые, с округлыми углами (см. рис. 1Б), что также соответствует диагностическому описанию [Виноградова, 1974; Dimitrova-Konaklieva, 2000]. Размеры поверхностных клеток (табл. 2) несколько меньше, чем по диагнозу, и незначительно различаются в разных частях таллома.

В целом диапазон длины и ширины клеток ульвы меотической из Каспийского моря варьировал от 5 до 12,5 и от 5 до 17,5 мкм, а по диагнозу составлял 12–26 мкм [Зинова, 1967; Виноградова, 1974]. Форма и размеры клеток были сходны в разных частях таллома, за исключением основания, где они были мельче и менее вытянуты (см. табл. 2) по сравнению с растениями из Азовского моря и взморья Болгарии (длина и ширина 38–125 и 17–23 мкм соответственно) [Виноградова, 1974; Dimitrova-Konaklieva, 2000].

Анализ эколого-биотопических особенностей *U. maeotica* из прибрежной зоны г. Махачкалы показал, что этот вид встречался на илистых песках среди навала крупных валунов от уреза воды до глубины 1,5 м и при солёности от 4,5 до 9,8 ‰ (рис. 1В, 1Г), на участках с повышенным загрязнением хозяйственно-бытовыми стоками и фенолами [Качество морских ... , 2026]. В границах нативного ареала в Азово-Черноморском бассейне *U. maeotica* произрастает в мелководных

лиманах и заливах, на илисто-песчаных донных отложениях, до глубины 1,5 м и при солёности от 9 до 60 ‰ [Зинова, 1967; Виноградова, 1974; Маслов, 2010; Экологическая физиология ... , 2016; Dimitrova-Konaklieva, 2000]. За последние десятилетия наблюдалось значительное расширение ареала ульвы меотической в Азово-Черноморском бассейне: она была зарегистрирована у Южного берега Крыма [Маслов, Ткаченко, 2008], в районе Варны, мыса Калиакра [Dimitrova-Konaklieva, 2000], у берегов Румынии [Caraus, 2002] и в заливах северо-западной части Чёрного моря. Позднее *U. maeotica* была обнаружена на кавказском шельфе — в Темрюкском заливе, лиманах Таманского полуострова, у косы Тузла и от бухты Туапсинская до Адлера [Красная книга Краснодарского края, 2017]. В Азовском море, помимо лиманов северной части и солёного озера Сиваш, *U. maeotica* отмечается в Бейсугском лимане [Степаньян, 2019].

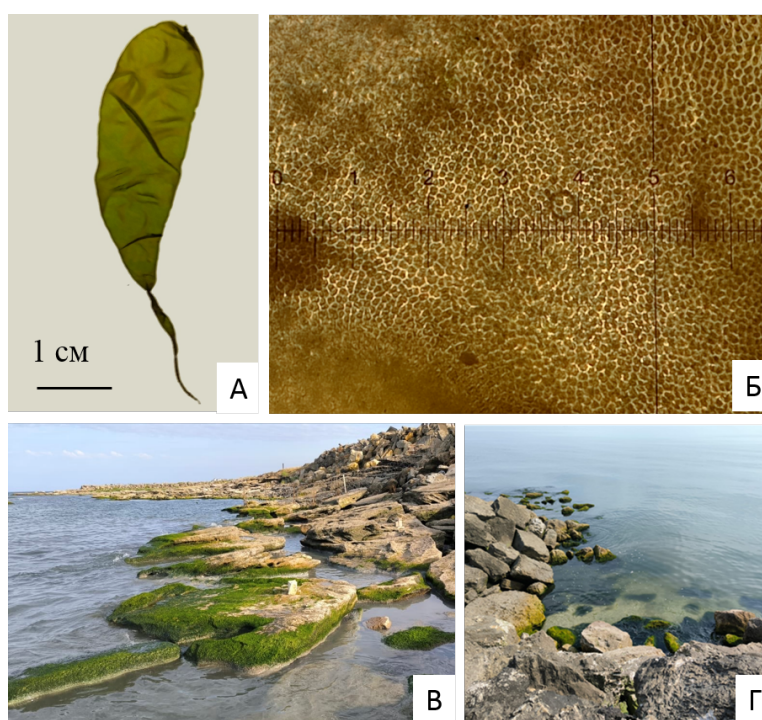


Рис. 1. Внешний вид *Ulva maeotica* и её местообитания в прибрежной зоне г. Махачкалы (июнь 2025 г.): А — гербарный образец; Б — поверхностные клетки, средняя часть таллома (увеличение 10 × 10); В — биотоп у Чёрных камней; Г — биотоп у пос. Редукторный

Таблица 2

Линейные размеры поверхностных клеток *U. maeotica* из прибрежной зоны г. Махачкалы (дагестанский сектор Каспийского моря, июнь 2025 г.)

Значение	Длина/ширина, мкм		
	основание	средняя часть	вершина
Минимальное	5/5	5/5	5/7
Максимальное	12,5/15	12,5/17,5	12,5/15
Среднее квадратичное отклонение	2,2/2,2	2,3/2,1	1,8/2,4

Согласно исследованиям флоры Каспийского моря, которые ведутся с 1930-х годов, *U. maeotica* не встречалась ранее ни в одном из приморских регионов: ни в устьевых зонах рек, ни в мелководных заливах или лиманах. По-видимому, она могла проникнуть в западную часть Среднего Каспия из Азово-Черноморского бассейна, но время и пути вселения пока неизвестны. Очевидно, что расширение ареала этого вида связано с его эвригалинностью и толерантностью к эвтрофированию, способностью к росту и развитию при колебаниях температуры и высокой степени загрязнения. Эти экологические особенности могут способствовать формированию самоподдерживающейся популяции *U. maeotica* и, соответственно, её инвазивному «успеху» в Каспийском море. Хотя некоторые авторы отмечают, что из-за загрязнения вод возможно сокращение ареала *U. maeotica* в Азово-Черноморском бассейне [Степаньян, 2019], но это противоречит данным большинства исследователей, отмечавшим эврибионтность вида и его устойчивость к эвтрофированию [Виноградова, 1974; Маслов, 2010; Экологическая физиология ... , 2016; Dimitrova-Konaklieva, 2000].

Вполне возможно, что в современных экологических условиях и при интенсификации природопользования в Каспийском море [Ozturk, Altay, Dimeyeva, 2022] вероятность вселения других макроводорослей, особенно зелёных из родов *Ulva* и *Cladophora*, будет возрастать, как и некоторых видов гидробионтов [Самые опасные ... , 2018; Aquatic invasions ... , 2004]. В этой связи изучение причин и путей проникновения новых и чужеродных видов, ведение регулярного мониторинга состояния наиболее уязвимых природных комплексов прибрежной зоны, в том числе акваторий ООПТ, позволит выработать научно обоснованные рекомендации по сохранению регионального биоразнообразия и биоресурсов Каспийского моря.

Заключение

В прибрежной зоне дагестанского сектора Каспийского моря летом 2025 г. обнаружен новый вид флоры макрофитов — зелёная водоросль *Ulva maeotica* (Proshkina-Lavrenko) Р.М. Tsarenko, эндемик Азово-Черноморского бассейна. Выявленные эколого-биоморфологические и анатомо-морфометрические особенности *U. maeotica* соответствуют диагностическим признакам и сходны с описанными для нативного ареала, некоторые различия могут отражать фенотипическую изменчивость вида.

Находка ульвы меотической в Каспийском море и расширение её ареала за пределами Азово-Черноморского бассейна обусловлены, вероятно, эврибионтностью и толерантностью вида, способностью к быстрому росту и размножению в различных экологических условиях.

Для оценки вероятности формирования самоподдерживающейся популяции *U. maeotica* и её инвазивного «успеха» в прибрежных, наиболее уязвимых экосистемах Каспийского моря необходимо ведение регулярного мониторинга, результаты которого могут быть использованы для выявления путей проникновения новых и чужеродных видов и выработки мер по сохранению регионального биоразнообразия и биоресурсов в условиях усиливающегося антропогенного пресса.

Список литературы

1. Виноградова К. Л. Ульвовые водоросли (Chlorophyta) морей СССР. – Ленинград : Наука, 1974. – 166 с.
2. Забержинская Э. Б. Флора водорослей-макрофитов Каспийского моря : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 094. – Баку, 1968. – 16 с.
3. Зинова А. Д. Определитель зелёных, бурых и красных водорослей южных морей СССР. – Москва ; Ленинград : Наука, 1967. – 398 с.
4. Зинова А. Д., Забержинская Э. Б. Новые для Каспийского моря виды водорослей // Новости систематики низших растений. – 1965. – Т. 2. – С. 97–100. – <https://doi.org/10.31111/nsnr/1965.2.97>

5. Зинова А. Д., Калугина-Гутник А. А. Сравнительная характеристика флоры водорослей южных морей // Биологическая продуктивность южных морей / Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского ; отв. ред. Грезе В. Н. – Киев : Наук. думка, 1974. – С. 43–51.
6. Калугина-Гутник А. А. Фитобентос Чёрного моря. – Киев : Наук. думка, 1975. – 248 с.
7. Качество морских вод по гидрохимическим показателям : Ежегодник 2024 / Гос. океаногр. ин-т им. Н. Н. Зубова ; под ред. А. Н. Коршенко. – Москва : Наука, 2026. – 299 с.
8. Красная книга Краснодарского края. Растения и грибы / отв. ред. С. А. Литвинская. – 3-е изд. – Краснодар : Администрация Краснодар. края, 2017. – 850 с.
9. Красная книга Республики Крым. Т. 2. Растения и грибы / сост. Э. Ф. Абдулганиева [и др.] ; отв. ред.: А. В. Ена, Д. В. Епихин. – 3-е изд. – Калининград : Полиграфычъ, 2025. – 504 с.
10. Маслов И. И. Макрофитобентос Сиваша // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартьян». – 2010. – № 1. – С. 143–151. – <https://www.elibrary.ru/vhnupx>
11. Маслов И. И., Ткаченко Ф. П. Фитосозологические аспекты флоры водорослей-макрофитов Чёрного моря (Украина) // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2008. – № 96. – С. 12–17. – <https://www.elibrary.ru/ulgjkd>
12. Морские охраняемые акватории Крыма / Рос. акад. наук, Ин-т мор. биол. исслед. им. А. О. Ковалевского ; под ред. Н. А. Мильчаковой. – Симферополь : Н. Оріанда, 2015. – 312 с.
13. Прошкина-Лавренко А. И. Новые роды и виды водорослей из солёных водоёмов СССР // Ботанические материалы Отдела споровых растений / АН СССР, Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова. – Ленинград : Изд-во АН СССР, 1945. – Т. 5, вып. 10/12. – С. 142–154.
14. Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100) / Петросян В. Г., Дгебуадзе Ю. Ю., Хляп Л. А [и др.] ; ред. Дгебуадзе Ю. Ю. [и др.]. – Москва : Т-во науч. изд. КМК, 2018. – 688 с.
15. Степаньян О. В. Макрофитобентос Каспийского моря: разнообразие, распределение, продуктивность // Океанология. – 2016. – Т. 56, № 3. – С. 429–439. – <https://doi.org/10.7868/S0030157416030217>
16. Степаньян О. В. Расширение ареала *Ulva maeotica* и *Cladophora siwaschensis* в Азовском и Чёрном морях // Альгология. – 2019. – Т. 29, № 3. – С. 287–297. – <https://doi.org/10.15407/alg29.03.287>
17. Червона книга України. Рослинний світ / за ред. Я. П. Дідуха. – Київ : Глобалконсалтинг, 2009. – 900 с.
18. Экологическая физиология водных фототрофных организмов : Полевой определитель водорослей рода *Ulva* Чёрного, Азовского, Каспийского морей и Восточной Балтики / Афанасьев Д. Ф., Камнев А. Н., Сушкова Е. Г., Штайнхаген С. Э. ; под ред. И. П. Ермакова. – Москва : Перо, 2016. – 51 с.
19. Aquatic invasions in the Black, Caspian and Mediterranean seas / eds: Dumont H., Shiganova T., Niermann U. – Dordrecht : Kluwer Acad. Publ., 2004. – 313 p. – (NATO Science Series. 4, Earth and Environmental Sciences ; 35).
20. *Caraus I.* Algae of Romania. A distributional checklist of actual algae // Studii si Cercetari Stiintifice Universitatea Bacau. Seria Biologie. – 2002. – Vol. 7. – P. 1–694. (in Romanian).
21. *Dimitrova-Konaklieva S.* Flora of the marine algae of Bulgaria (Rhodophyta, Phaeophyta, Chlorophyta). – Sofia ; Moscow : Pensoft Publ., 2000. – 294 p. – (Floristica ; 2). (in Bulgarian).
22. GBIF. Global Biodiversity Information Facility. – URL: <https://www.gbif.org/> (accessed 08.05.2026).

23. Guiry M. D., Guiry G. M. 2026. AlgaeBase. World-wide electronic publication, University of Galway. – URL: <https://www.algaebase.org> (accessed: 11.05.2026).
24. Muradova A. B., Mukhtarova S. J., Feyziyev Y. M. Systematic study and bioecological characteristics of the algal flora of the Caspian coastal areas of the Absheron Peninsula // Plant & Fungal Research. – 2024. – Vol. 7, iss. 2. – P. 36–45. – <https://doi.org/10.30546/2664-5297.2024.7.2.50.011>
25. Ozturk M., Altay V., Dimeyeva L. A. Climate change, biodiversity and ecology of Caspian Sea: an overview // Climate change alleviation for sustainable progression : Floristic prospects and arboreal avenues as a viable sequestration tool / eds: M. A. Dervash, A. A. Wani. – Boca Raton, USA : CRC Press, 2022. – P. 445–468.
26. The great reshuffling : Human dimensions of invasive alien species / ed. J. A. McNeely. – Gland, Switzerland : IUCN, 2001. – 242 p.

ON THE DISTRIBUTION OF THE GREEN ALGA *ULVA MAEOTICA*
(PROSHKINA-LAVRENKO) P. M. TSARENKO IN THE COASTAL ZONE
OF THE CASPIAN SEA (DAGESTAN SECTOR)

Milchakova N. A., Chernysheva E. B.

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

Abstract: This paper provides an ecological and biomorphological characterization of the green alga *Ulva maeotica*, an endemic species of the Azov-Black Sea basin protected at the regional level, which was recorded for the first time in the coastal zone of the Caspian Sea. Qualitative samples of macrophytobenthos were collected at 16 sites along the Dagestan coast at depths from 0.1 to 3 m in 2024 and 2025. It was shown that *U. maeotica* occurs at two sites near the coast of Makhachkala, where it forms part of an Ulva-dominated plant community at depths of 0.2–0.5 m on silty-sand bottom sediments in areas subjected to increased domestic pollution. Anatomical and morphometric characteristics of *U. maeotica* are provided, along with some environmental factors influencing its growth and development, as well as the reasons for its range expansion. The data obtained on new and alien species of macroalgae in the Caspian Sea can be used to address conservation tasks aimed at reducing the risks of their invasion and preserving the coastal ecosystems of the Dagestan sector of the Caspian Sea.

Keywords: alien species, flora of macroalgae, Chlorophyta, coastal biotopes, Caspian Sea

Сведения об авторах

Мильчакова Наталия Афанасьевна	руководитель лаборатории фиторесурсов ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: nmilchakova@ibss-ras.ru
Чернышева Елена Борисовна	младший научный сотрудник лаборатории фиторесурсов ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: chernysheva_e@ibss-ras.ru

Поступила в редакцию 10.05.2026
Принята к публикации 15.06.2026

ПРИРОДООХРАННАЯ ЦЕННОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ПРИРОДНОГО ЗАКАЗНИКА «СПИЛИЯ» (СЕВАСТОПОЛЬ) *

Панкеева Т. В., Каширина Е. С.

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

г. Севастополь, Российская Федерация,

e-mail: tatyanapankeeva@yandex.ru, e_katerina.05@mail.ru

Аннотация: Представлены результаты комплексного экологического описания территории горы Спидия для определения природоохранной ценности и последующего создания особо охраняемой природной территории — государственного природного ландшафтного заказника «Спидия». Планируемый заказник общей площадью 119 га расположен в Севастополе, городе федерального значения. На основе архивных, литературных данных и натурных исследований определено, что территория планируемого природного заказника «Спидия» отличается биологическим и ландшафтным разнообразием, наличием видов растений, занесённых в Красную книгу Российской Федерации и Красную книгу города Севастополя. Высокую природоохранную ценность имеют лесные сообщества, доминантами в которых являются такие охраняемые виды, как *Juniperus excelsa* M. Bieb., *Juniperus deltoides* R. P. Adams, *Pinus brutia* Ten и *Pinus nigra* J. F. Arnold subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe. В видовом составе фитоценозов зафиксировано не менее 250 видов растений, из которых 22 вида включены в Красную книгу Российской Федерации, 41 — в Красную книгу города Севастополя. Охраняемая фракция флоры представлена 33 родами, относящимися к 19 семействам. В ландшафтной структуре планируемого ГПЛЗ «Спидия» преобладают урочища крутых и очень крутых склонов с фисташково-можжевельновыми, можжевельновыми и сосновыми фитоценозами. Показано, что ландшафты изучаемой территории отличаются биологическим разнообразием, реликтовым характером флоры, аттрактивностью, научной ценностью и средообразующей значимостью. Выявлено, что значительное влияние оказывает рекреационная нагрузка и нерегулируемое движение автотранспорта. Придание горе Спидия заповедного статуса будет способствовать сохранению уникальных комплексов и формированию экологической сети г. Севастополя и Республики Крым.

Ключевые слова: особо охраняемые природные территории, природный заказник, охраняемые виды, ландшафтная структура, Красная книга, Севастополь, Спидия

Введение

Для Крымского полуострова, общая площадь природных комплексов которого достигла критического уровня, создание особо охраняемых природных территорий (ООПТ) является актуальной задачей. В настоящее время Крым признан одним из центров биологического и ландшафтного разнообразия Европы, что задекларировано Всемирным союзом охраны природы. Природоохранные территории являются основными средообразующими ресурсами региона, резерватами генофонда растительного и животного мира, эталонами природных систем, находящимися в естественном или близком к нему состоянии, их сохранение предусмотрено Конвенцией о биологическом разнообразии, ратифицированной Российской Федерацией (РФ).

В Севастополе, городе федерального значения, для охраны среды обитания видов животных и растений, занесённых в Красную книгу (КК) РФ [[Красная книга Российской Федерации, 2024](#)] и КК г. Севастополя (КК С) [[Красная книга города Севастополя, 2018](#)], созданы девятнадцать объектов разной категории охраны регионального значения, общей площадью 25027,8 га, из которых

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ (№ гос. регистрации 124022400152-1 и 124030100030-0).

на сушу приходится 24310,2 га, а на акваторию — 717,6 га, что составляет 28,9 и 3,3 % соответственно площади суши и акватории [Панкеева, Миронова, Горбунов, 2025]. Несмотря на значительные показатели по площади, занимаемой объектами ООПТ, природоохранная сеть региона в полной мере не сформирована в единое целое и многие природные экосистемы в регионе г. Севастополя не обеспечены охраной, на этих территориях происходит уничтожение охраняемых видов растений и животных, занесённых в КК РФ [Красная книга Российской Федерации, 2024] и КК С [Красная книга города Севастополя, 2018], особенно реликтовых деревьев.

Так, леса с преобладанием *Juniperus excelsa* M. Bieb. и *Juniperus deltoides* R. P. Adams или при небольшом их участии в Крыму занимают 3,7 тыс. га (1,7 % лесов горного Крыма), они представляют собой один из уникальных элементов растительности полуострова [Высокоможже-веловые леса ... , 1992; Дидух, 1992; Фатерыга, 2009; Плугатарь, 2015], но являются, по сути, исчезающими сообществами. Значительные площади этих лесов (до 73,0 %) сосредоточены в границах города Севастополя, но до настоящего времени наиболее крупные редколесные массивы *Juniperus excelsa* и *J. deltoides*, расположенные в Балаклавском муниципальном округе, не обеспечены охраной (в т. ч. на Балаклавских высотах, на горах Спилія (Аскети) и Гасфорта).

Сохранение природных ландшафтов горы Спилія (Аскети) впервые было предложено в 1994 г. [Технико-экономическое ... , 1994]. В «Комплексной программе охраны окружающей природной среды, рационального использования природных ресурсов и экологической безопасности г. Севастополя на период до 2010 г.» было предложено заповедать приморские территории близ Балаклавы как компактный участок хорошо сохранившегося лесного массива — «типичное реликтовое сообщество можжевельника высокого с участием можжевельника колючего и фисташки туполистной» и как «местообитание охраняемых видов животных — геккона крымского и средиземноморского, полозов желтобрюхого и леопардового и др.» [Комплексная программа ... , 2001]. В 2019 году проведено комплексное экологическое обследование данной территории [Материалы комплексного ... , 2019]. Однако до настоящего времени исследуемая территория не имеет природоохранного статуса. В последние годы на территории планируемого заказника активно развивается рекреационная деятельность, что приводит к деградации уникальных природных комплексов Южного берега.

В этой связи цель исследования — обоснование природоохранной ценности горы Спилія для создания ООПТ.

Материалы и методы

Планируемый государственный природный ландшафтный заказник (ГПЛЗ) «Спилія» располагается в юго-западной части Крымского полуострова, в юго-восточной части г. Севастополя, между Балаклавской бухтой и Золотым пляжем. В административных границах территория принадлежит Балаклавскому муниципальному округу г. Севастополя.

Западная граница предлагаемой к сохранению территории проходит по оврагу Шайтан-Дере, далее по бровке горного массива с вершиной г. Спилія и г. Аскети с включением остатков фортификационных сооружений «Форт Южный», далее северная граница проходит по склону между грунтовыми дорогами, ведущими к «Объекту 100» и урочищу Инжир, восточная граница опускается по приморскому склону к пляжу «Золотой» (рис. 1). Южная граница проходит вдоль береговой линии Чёрного моря. Общая площадь планируемого ГПЛЗ составляет 119 га.

Авторами выполнено комплексное экологическое обследование территории для определения природоохранной ценности г. Спилія на основе архивных, литературных данных и натурных исследований. Полевые работы на территории, планируемой ООПТ, проведены в период 2010–2025 гг. Геоботанические описания выполнены по стандартным методикам [Программа и методика ... , 1974]. Всего выполнено 20 описаний в разных типах растительных сообществ. Номенклатура видов растений приведена по сводке А. В. Ены [Ена, 2012]. Номенклатура охраняемых видов приведена согласно Красной книге г. Севастополя [Красная книга города Севастополя, 2018].

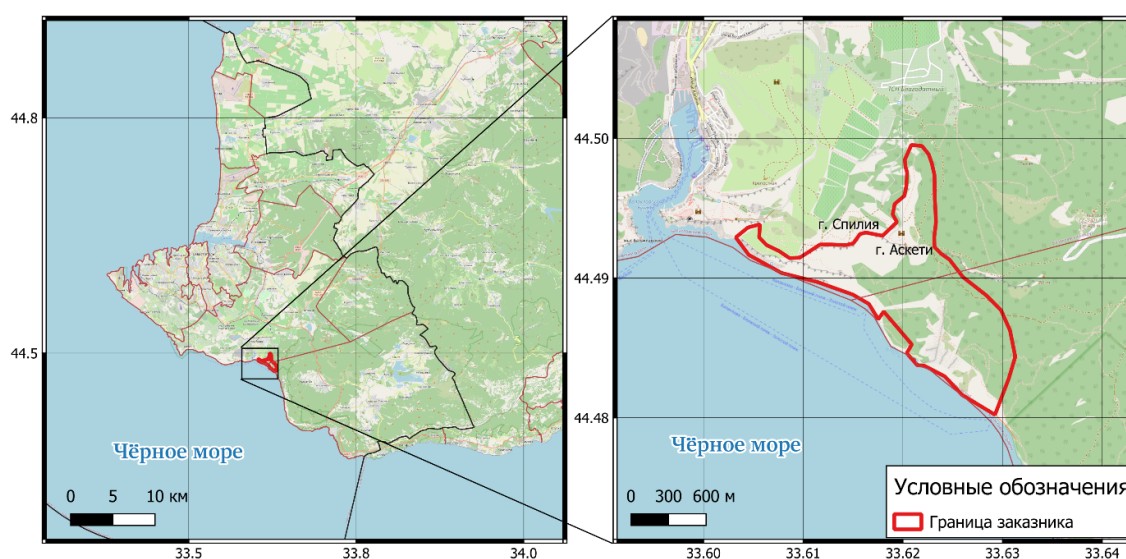


Рис. 1. Географическое положение планируемого ГПЛЗ «Спилия»

При изучении ландшафтной структуры заложено семь ландшафтных профилей и описано более 90 ключевых участков. Для создания ландшафтной карты использовали программный пакет QGIS 2.14.18 и электронную основу топографической карты. Ландшафтная карта составлена на уровне урочищ.

Результаты исследования и обсуждение

Общие сведения о физико-географических условиях планируемой ООПТ. В тектоническом отношении планируемый ГПЛЗ «Спилия» расположен в пределах юго-западной части Южнобережного поднятия Горно-крымского складчато-надвигового образования. Исследуемый район является частью Байдарско-Варнутской структурной зоны [Муратов, 1960], который характеризуется сложным геологическим строением. Характерны отложения триасовой, юрской и меловой систем, которые представлены карбонатной, флишевой, флишеидной и терригенной грубообломочными формациями [Швидкий, 1999]. Основную часть изучаемой территории в орографическом плане занимают крутые склоны и террасы естественного горного амфитеатра, покрытые сосново-можжевелевым и дубово-можжевелевым редколесьем. На приморских склонах распространены оригинальные геоморфологические формы, частично связанные с карстовыми процессами — ниши, полуамфитеатры, структурные террасы и многочисленные трещины дробления, эрозионные борозды и промоины. В районе пляжа «Золотой» получили развитие суффозионные процессы [Панкеева и др., 2019].

Для территории заказника «Спилия» характерны следующие геоморфологические формы: водораздельно-грядовые и останцово-водораздельные поверхности; эрозионные формы рельефа (овраги, балки и др.), пологие склоны (крутизна от 3° до 9°), среднекрутые склоны (крутизна от 9° до 18°), крутые склоны (крутизна от 18° до 70°), крутые и обрывистые клифовые склоны (крутизна более 70°). Крутизна склонов меняется в значительных пределах: от отвесных (с углами наклона до 90°) до пологих, уклоны которых варьируют в пределах $5\text{--}15^\circ$ (рис. 2) [Материалы комплексного ... , 2019]. Для южного склона горного амфитеатра характерны большие уклоны местности ($25\text{--}45^\circ$). Большая часть территории заказника — это склоны южной и юго-западной экспозиции. Верхний участок заказника занимает склон северо-восточной экспозиции (рис. 3)

[Материалы комплексного ... , 2019]. Основную часть изучаемой территории в орографическом плане занимают крутые склоны и террасы естественного горного амфитеатра, покрытые сосново-можжевельным и дубово-можжевельным редколесьем. С северо-запада и севера амфитеатр ограничен горными массивами Главной гряды — г. Крепостная гора (115 м), г. Спилия (251 м) и г. Аскети (361 м). Гора Спилия открывает собой цепь вершин, опоясавших залив Мегало-Яло и венчающих один из самых живописных пейзажей Южного берега.

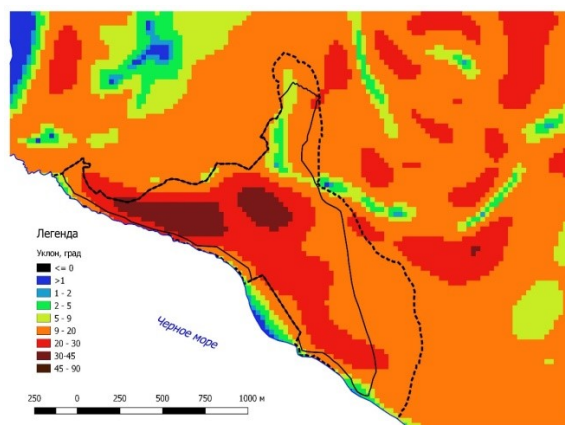


Рис. 2. Уклоны местности планируемого ГПЛЗ «Спилия» (составлено А. А. Новиковым)

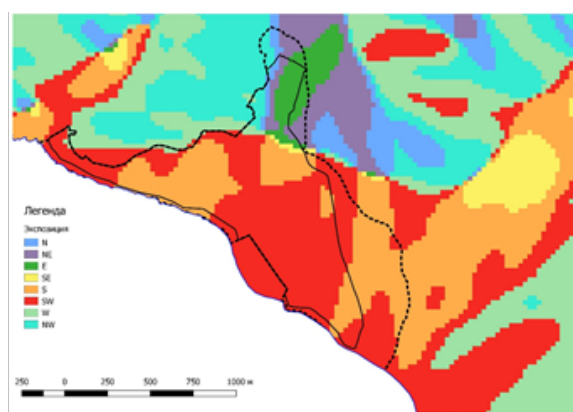


Рис. 3. Экспозиция склонов планируемого ГПЛЗ «Спилия» (составлено А. А. Новиковым)

Климат исследуемого участка относится к западному южнобережному средиземноморскому типу климата, который характеризуется засушливым, жарким летом с умеренно-тёплой мягкой зимой. Наряду с общими чертами климата территории, здесь наблюдаются микроклиматические особенности, которые обусловлены амфитеатральной структурой и бризовой циркуляцией. Характерны положительные температуры: среднегодовая составляет +12 °С, среднеянварская — +2,5 °С и среднеиюльская — +23 °С. Среднегодовое количество осадков составляет 354 мм. Режим осадков территории характерен для субсредиземноморского климата с зимним максимумом и летним минимумом. Таким образом, климатические условия района способствовали формированию ландшафтов, близких к средиземноморским [Климатический атлас Крыма, 2000].

Постоянный водоток на территории планируемого заказника не формируется. В холодный период года, а также во время дождей образуются временные водотоки, быстро спускающиеся в море. Они протекают, как правило, в неглубоких балках. Трещиноватые известняки и конгломераты юры, окаймляющие береговые склоны г. Спилия, легко поглощают атмосферные осадки

и дренируют воду до водоупора. Незначительная площадь водосбора и другие факторы влияют на места разгрузки этих трещинно-карстовых вод. Большая часть воды разгружается в более или менее крупных родниках у пос. Благодатный, в долине Кефало-Врисе, в г. Балаклава на ул. Калича и ул. Новикова [Материалы комплексного ... , 2019].

Наиболее характерным типом почв предполагаемого природного заказника являются коричневые почвы, которые представлены преимущественно подтипом карбонатных. Почвы малогумусные, отличаются повышенной скелетностью. Мощность профиля коричневых почв незначительная и достигает толщины от нескольких сантиметров до 10–50 см, а их гумусово-аккумулятивный горизонт — 5–15 см. Они характеризуются наличием карбонатов Са с поверхности и по всему профилю, более слабой оглинённостью метаморфического горизонта.

Наземная флора и растительность. Согласно схеме флористического районирования, территория планируемого заказника «Спилия» расположена в Байдарском районе Южнокрымского округа Крымско-Новороссийской подпровинции Эвксинской провинции. Район относится к Средиземноморской флористической области. Согласно геоботаническому районированию, территория заказника относится к Средиземноморской области склерофильных лесов, маквиса, шибляка, фриган и томиляров [Дидух, 1992]. Флора участка представлена не менее чем 250 видами высших растений.

Растительный покров заказника «Спилия» отличается пестротой и мозаичностью, что обусловлено сложным рельефом, особенностями микроклимата и особенностями природопользования. В целом, растительный покров представлен степными и лесными сообществами. По отношению к увлажнению на территории заказника произрастают ксерофитные субсредиземноморские кустарники и редколесья, мезоксерофитные и мезофитные широколиственные леса.

Широколиственные, смешанные и хвойные леса и редколесья покрывают склоны южной экспозиции и частично выположенную вершину г. Аскети. Леса отличаются высоким средообразующим потенциалом, выполняют водорегулирующую и почвозащитную функцию для горных территорий города Севастополя.

В планируемом заказнике «Спилия» представлены лесные сообщества с доминированием хвойных пород деревьев: можжевельник высокий (*J. excelsa*), можжевельник дельтовидный (*J. deltoides*), сосна брутйская (*Pinus brutia* Ten) и сосна Палласа (*Pinus nigra* J. F. Arnold subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe). Виды сосен использованы для лесопосадок на террасированных склонах. Перечисленные доминанты первого яруса занесены в региональные и национальные природоохранные списки, что определяет высокую природоохранную ценность их сообществ [Красная книга Российской Федерации, 2024; Красная книга города Севастополя, 2018].

Широколиственные леса представлены дубово-грабовыми формациями (*Quercus pubescens* Willd., *Carpinus orientalis* Mill.) с примесью ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior* L.), клёна полевого (*Acer campestre* L.) и фисташки туполистной (*Pistacia mutica* Fisch. & C. A. Mey). Кустарниковый ярус лесных сообществ образован такими средиземноморскими видами растений, как жасмин кустарниковый (*Jasminum fruticans* L.), иглица понтийская (*Ruscus aculeatus* L.) (КК С), сумах дубильный (*Rhus coriaria* L.), скумпия кожевенная (*Cotinus coggygria* Scop.), пузырник килийский (*Colutea cilicica* Boiss. & Balansa). Астрагал трагакантовый (*Astracantha arnacantha* (M. Bieb.) (КК С, КК РФ) образует подушковидные формы на степных склонах. Травяной ярус сильно разрежен, общее проективное покрытие находится на уровне 20–50 %. Среди травянистых растений широко представлены виды полыни (*Artemisia* Sp.), дубровник обыкновенный (*Teucrium chamaedrys* L.) и белойойлочный (*T. polium* L.), грудница мохнатая (*Galatella villosa* (L.) Rchb. f.) и др. На глинистых сильно эродированных склонах встречаются каперсы травянистые (*Capparis herbacea* Willd.) и крашенинниковия терескеновая (*Krascheninnikovia ceratoides* (L.) Gueldenst.) (КК С).

Степные сообщества распространены на склонах преимущественно западной экспозиции: овраг Шайтан-Дере, г. Спилия и г. Аскети. Степи представлены мозаичным сочетанием злаковых, ковыльных и полынно-типчаковых участков. В составе сообществ злаковых степей доминируют бородач обыкновенный (*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng), росичка кроваво-красная (*Digitaria sanguinalis* (L.) Scop.). К основным злакам примешивается разнотравье, состоящее из видов молочаев (молочай миртолистный *Euphorbia myrsinites* L.; молочай-солнцегляд *Euphorbia helioscopia* L.), дубровников, черноголовника многобрачного (*Poterium polygamum* Waldst. & Kit.), льна австрийского (*Linum austriacum* L.), зопника перекасти-поле (*Phlomis herba-venti* L.), эфедры двухколосковой (*Ephedra distachya* L.) и др. Из охраняемых видов здесь встречаются асфodelина жёлтая (*Asphodeline lutea* (L.) Rchb) и а. крымская (*Asphodeline taurica* (Pall. ex M. Bieb.) Endl.), ирис карликовый (*Iris pumila* L.), железница крымская (*Sideritis taurica* Steph. ex Willd.) и др.

Полынные степи на каменистых грунтах занимают ограниченную площадь вдоль обрыва на западном склоне г. Спилия и г. Аскети. В травостое преобладает полынь крымская (*Artemisia taurica* Willd.).

Привершинная часть г. Аскети преобразована хозяйственной деятельностью с фрагментами нарушенной степи. Индикаторами антропогенного преобразования является наличие в составе фитоценозов рудеральных видов, таких как синеголовник полевой (*Eryngium campestre* L.), синяк обыкновенный (*Echium vulgare* L.) и др.

На песчаном пляже встречаются занесённые в КК С [Красная книга города Севастополя, 2018] кендырь сарматский (*Apocynum venetum* (L.) Woodson subsp. *sarmatiense* (Woodson) Avetisjan) и катран приморский (*Crambe maritima* L.) [Плантариум]. На скальных местообитаниях произрастает охраняемый вид — оносма многолистная (*Onosma polyphylla* Ledeb.).

Фитоценозы представляют высокую природоохранную ценность как местообитание редких видов растений и животных.

Охраняемые виды. Исследуемая территория отличается флористическим богатством, наличием реликтовых и эндемичных видов (рис. 4). На территории проектируемой ООПТ отмечен 21 вид растений, занесённых в КК РФ, и 41 вид — в КК С (табл. 1) [Красная книга Российской Федерации, 2024; Красная книга города Севастополя, 2018].

Охраняемая фракция флоры отличается разнообразием и представлена 33 родами, относящимся к 19 семействам (табл. 2).

Таблица 1

Список охраняемых растений планируемого заказника «Спилия»

Русское название	Латинское название	Категория	
		КК С	КК РФ
Семейство Кипарисовые — Cupressaceae			
Можжевельник высокий	<i>Juniperus excelsa</i> M. Bieb.	2	2
Можжевельник дельтовидный	<i>Juniperus deltoides</i> R. P. Adams	2	
Семейство Сосновые — Pinaceae			
Сосна брутийская	<i>Pinus brutia</i> Ten.	2	2
Сосна Палласа	<i>Pinus nigra</i> J. F. Arnold subsp. <i>pallasiana</i> (Lamb.) Holmboe	4	1
Семейство Спаржевые — Asparagaceae			
Иглица колючая	<i>Ruscus aculeatus</i> L.	2	
Семейство Ирисовые — Iridaceae			
Шафран узколистый	<i>Crocus angustifolius</i> Weston	2	
Шафран Палласа	<i>Crocus pallasii</i> Goldb.	3	2
Шпажник черепитчатый	<i>Gladiolus imbricatus</i> L.	3	
Ирис карликовый	<i>Iris pumila</i> L.	4	3
Семейство Орхидные — Orchidaceae			
Анакамптис пирамидальный	<i>Anacamptis pyramidalis</i> (L.) R. M. Bateman, Pridgeon et M. W. Chase	2	2

Анакамптис кавказский	<i>Anacamptis morio</i> (L.) R. M. Bateman, Pridgeon et M. W. Chase subsp. <i>caucasica</i> (K. Koch) H. Kretzschmar, Eccarius et H. Dietr	3	3
Комперия Компера	<i>Comperia comperiana</i> (Steven) Asch. et Graebn	2	2
Ремнелепестник козий	<i>Himantoglossum caprinum</i> (M. Bieb.) Spreng.	2	2
Офрис оводоносная	<i>Ophrys oestriфера</i> M. Bieb.	2	2
Ятрышник мелкоточечный	<i>Orchis punctulata</i> Steven ex Lindl.	2	3
Ятрышник пурпурный	<i>Orchis purpurea</i> Huds.	3	3
Ятрышник обезьяний	<i>Orchis simia</i> Lam.	2	3
Семейство Ксанторреевые — Xanthorrhoeaceae			
Асфodelина жёлтая	<i>Asphodeline lutea</i> (L.) Rchb.	2	
Асфodelина крымская	<i>Asphodeline taurica</i> (Pall.) Endl.	2	3
Семейство Астровые — Asteraceae			
Василёк козий	<i>Centaurea caprina</i> Steven	2	
Семейство Бурасниковые — Boraginaceae			
Оносма многолистная	<i>Onosma polyphylla</i> Ledeb.	2	3
Семейство Капустные — Brassicaceae			
Катран приморский	<i>Crambe maritima</i> L.	3	
Каперсы травянистые	<i>Capparis herbacea</i> Willd.	2	
Крашенинниковия терескеновая	<i>Krascheninnikovia ceratoides</i> (L.) Gueldenst.	3	
Семейство Кудрявковые — Pteleaceae			
Приноготовник головчатый	<i>Paronychia cephalotes</i> aggr.	2	2
Семейство Бобовые — Fabaceae			
Астрагал трагакантовый	<i>Astragalus arnacantha</i> M. Bieb.	2	2
Астрагал капельный	<i>Astragalus guttatus</i> Bankset Sol.	1	
Дрок беловатый	<i>Genista albida</i> Willd.	2	3
Подковник реснитчатый	<i>Hippocrepis ciliata</i> Willd.	3	
Копеечник бледный	<i>Hedysarum candidum</i> M. Bieb.	2	2
Семейство Кутровые — Apocynaceae			
Кендырь сарматский	<i>Apocynum venetum</i> (L.) Woodson subsp. <i>sarmatiense</i> (Woodson) Avetisjan	1	
Семейство Яснотковые — Lamiaceae			
Железница сирийская	<i>Sideritis syriaca</i> L.	2	
Семейство Норичниковые — Scrophulariaceae			
Коровяк восточный	<i>Verbascum orientale</i> (L.) All.	3	
Семейство Лилейные — Liliaceae			
Тюльпан душистый	<i>Tulipa suaveolens</i> Roth	1	2
Семейство Ладанниковые — Cistaceae			
Ладанник крымский	<i>Cistus tauricus</i> J. Presl et C. Presl	2	
Семейство Мятликовые — Poaceae			
Овёс бородастый	<i>Avena barbata</i> Pottex Link	3	
Ковыль понтийский	<i>Stipa pontica</i> P. Smirn.	2	
Семейство Маковые — Papaveraceae			
Мачок жёлтый	<i>Glaucium flavum</i> Crantz	2	2
Семейство Сумаховые — Anacardiaceae			
Фисташка туполистная	<i>Pistacia mutica</i> Fisch. et C. A. Mey.	2	3
Семейство Толстянковые — Crassulaceae			
Крупночашелистник этинский	<i>Macrosepalum aetnense</i> (Tineo) Palanov	3	
Очиток краснеющий	<i>Sedum rubens</i> L.	3	



Копеечник бледный (*Hedysarum candidum*)



Астрагал капельный (*Astragalus guttatus*)



Комперия Компера (*Comperia comperiana*)



Анакамптис пирамидальный (*Anacamptis pyramidalis*)

Рис. 4. Охраняемые виды растительного мира планируемого ГПЛЗ «Спилия» (фото Свирина С. А.)

Таблица 2

Таксономическая структура охраняемой фракции флоры планируемого заказника «Спилия»

№	Семейство	Число родов	Число видов	№	Семейство	Число родов	Число видов
1	Orchidaceae	5	8	11	Lamiaceae	1	1
2	Fabaceae	4	5	12	Boraginaceae	1	1
3	Iridaceae	3	4	13	Asteraceae	1	1
4	Brassicaceae	3	3	14	Scrophulariaceae	1	1
5	Crassulaceae	2	2	15	Anacardiaceae	1	1
6	Poaceae	2	2	16	Papaveraceae	1	1
7	Cupressaceae	1	2	17	Cistaceae	1	1
8	Xanthorrhoeaceae	1	2	18	Apocynaceae	1	1
9	Pinaceae	1	2	19	Liliaceae	1	1
10	Asparagaceae	1	1	20	Illecebraceae	1	1

Наиболее богатое семейство Orchidaceae представлено 8 видами из 5 родов. Семейство Fabaceae в заказнике включает 5 видов из 4 родов, Iridaceae — 4 вида из 3 родов, Brassicaceae — 3 вида из 3 родов. Остальные 16 семейств в заказнике состоят из 1-2 видов из 1-2 родов.

Ландшафтная структура. Исследуемая территория соответствует зоне полусубтропических дубовых, фисташково-дубовых и можжевельно-сосновых лесов шибляковых зарослей, расположена в поясе дубово-фисташковых, можжевельно-сосновых лесов и шибляковых зарослей. Характерным типом местности этого пояса являются приморские крутые и среднекрутые низкорослые склоны с фисташково-дубово-можжевельным редколесьем и сосновыми лесами на коричневых эродированных сильнощебнистых суглинистых почвах, подстилаемых четвертичными глыбово-суглинисто-щебнистыми отложениями. В ландшафтной структуре выделено 24 ландшафтных контура на уровне урочищ (рис. 5). Дифференциация ландшафтных комплексов проведена в зависимости от приуроченности к геоморфологическим комплексам. На формирование ландшафтной структуры в пределах зарезервированной площади существенное влияние оказывает приморская позиция. Так, на территориях, имеющих ближнюю приморскую позицию и соответствующих открытым склонам и водоразделам, формируются типичные полусубтропические фисташково-можжевельные и можжевельные комплексы на коричневых короткопрофильных сильнощебнистых почвах [Позаченюк, Панкеева, 2008].

Наиболее характерным и уникальным урочищем ГПЛЗ «Спилия», занимающим центральную часть, является урочище крутых склонов, сложенных верхнеюрскими породами с можжевельным редколесьем на коричневых эродированных сильнощебнистых суглинистых почвах, подстилаемых четвертичными коллювиальными глыбово-щебнисто-суглинистыми отложениями (7). Из-за высокого природоохранного статуса *J. excelsa* это урочище особенно ценно и уникально, в связи с чем требует строгого режима охраны. Особую живописность, неповторимость и эстетичность горному амфитеатру придаёт урочище обрывистых склонов горных массивов, сложенных среднеюрскими отложениями с единичным произрастанием можжевельника высокого (8). В силу изолированности и труднодоступности, урочище является своего рода рефугиумом реликтовых, краснокнижных и эндемичных видов растений и субсредиземноморской растительности. Склоны массивов с останцами выветривания причудливых форм имеют пейзажную и эстетическую привлекательность. Ценным в биоценотическом плане является урочище крутых склонов с дубово-можжевельными лесами с единичными экземплярами видов сосен (с. брутийской и с. Палласа) на коричневых эродированных сильнощебнистых легко-суглинистых почвах, подстилаемых четвертичными коллювиальными щебнисто-суглинистыми отложениями (13). В пределах этого урочища отмечены виды, внесённые в КК РФ [Красная книга Российской Федерации, 2024] и КК С [Красная книга города Севастополя, 2018] — *Pinus brutia*, *P. pallasiana*, *J. excelsa* и *J. deltoides*. В подлеске широко представлена иглица колючая (*Ruscus aculeatus* L.) [Красная книга города Севастополя, 2018]. Отмечены виды семейства Orchidoideae [Красная книга Российской Федерации, 2024; Красная книга города Севастополя, 2018]: анакамптис пирамидальный (*Anacamptis pyramidalis*), ятрышник пурпурный (*Orchis purpurea*), я. мелкоточечный (*Orchis punctulata*), я. обезьяний (*Orchis simia*), комперия Компера (*Comperia cimperana*), ремнелепестник козий (*Himantoglossum caprinum*), офрис оводоносная (*Ophrys oestriifera*) и др.

В приморской части характерно урочище крутых склонов, сложенных верхнеюрскими породами с фисташково-дубово-можжевельным редколесьем с единичными экземплярами сосен (с. брутийской и с. Палласа) на коричневых эродированных сильнощебнистых суглинистых почвах, подстилаемых четвертичными коллювиальными глыбово-щебнисто-суглинистыми отложениями (6, 10). Встречается фисташка туполистная (*Pistacia mutica*) [Красная книга Российской Федерации, 2024; Красная книга города Севастополя, 2018], в подлеске — иглица колючая (*Ruscus aculeatus*) [Красная книга города Севастополя, 2018].

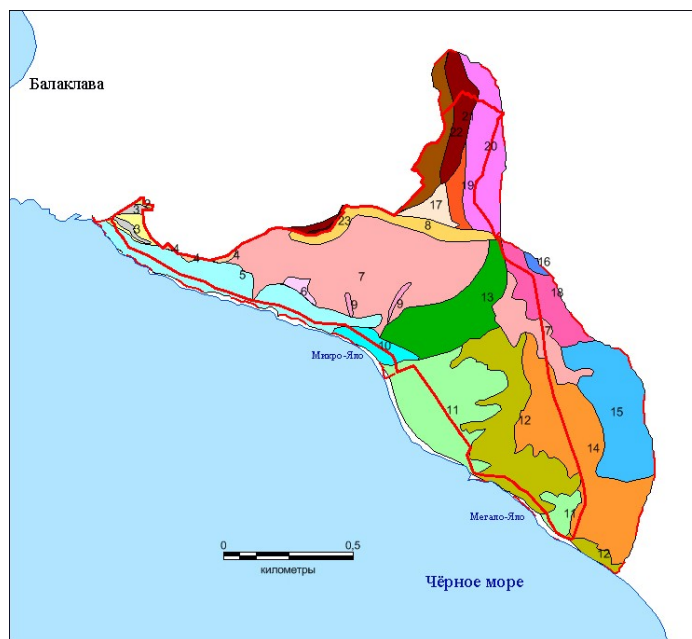


Рис. 5. Картограмма ландшафтной структуры перспективного к заповеданию ГПЛЗ «Спилия»

Условные обозначения: Зона полусубтропических дубовых, фисташково-дубовых и можжевельно-сосновых лесов шибляковых зарослей. Пояс дубово-фисташковых, можжевельно-сосновых лесов и шибляковых зарослей.

Тип местности: Приморские крутые и среднекрутые низкогорные склоны с фисташково-дубово-можжевельным редколесьем и сосновыми лесами на коричневых эродированных сильнощепнистых суглинистых почвах, подстилаемых четвертичными глыбово-суглинисто-щепнистыми отложениями.

Урочища: 1 – крутые склоны, сложенные среднеюрскими породами с фрагментами петрофитной растительности с участием видов асфоделины и астрагала трагантового на коричневых эродированных сильнощепнистых легкосуглинистых почвах; 2 – крутые склоны, сложенные среднеюрскими породами с кустарниковыми зарослями типа шибляк и петрофитными степями на коричневых эродированных сильнощепнистых легкосуглинистых почвах; 3 – балки с кустарниковыми зарослями держи-дерева колючего, жасмина кустарникового и граба восточного на коричневых эродированных, в днище намытых почвах, подстилаемых четвертичными делювиально-пролювиальными щепнисто-суглинистыми отложениями; 4 – крутые гравитационные склоны (осыпи) с единичными экземплярами можжевельника высокого с фрагментарными короткопрофильными коричневыми почвами и скоплениями глыбово-щепнистых отложений из обломков верхнеюрского известняка; 5 – приморские обрывистые склоны, сложенные верхнеюрскими отложениями с единичным произрастанием можжевельника высокого; 6 – крутые сильноэродированные склоны, сложенные верхнеюрскими породами с можжевельным редколесьем на коричневых эродированных сильнощепнистых суглинистых почвах, подстилаемых четвертичными коллювиальными глыбово-щепнисто-суглинистыми отложениями; 7 – обрывистые склоны горных массивов, сложенные среднеюрскими отложениями с единичным произрастанием можжевельника высокого; 8 – балки с фисташково-можжевельно-дубовым редколесьем на коричневых щепнистых по склонам эродированных, в днище намытых почвах, подстилаемых четвертичными делювиально-пролювиальными щепнисто-суглинистыми отложениями и единичными глыбами; 9 – крутые склоны, сложенные верхнеюрскими породами с фисташково-дубово-можжевельным редколесьем с единичными экземплярами сосны (брутейской и Палласа) на коричневых эродированных сильнощепнистых суглинистых почвах, подстилаемых четвертичными коллювиальными глыбово-щепнисто-суглинистыми отложениями; 10 – крутые и среднекрутые склоны, сложенные верхнеюрскими породами с сосновыми лесами и единичным произрастанием можжевельников (высокого и дельтовидного) на коричневых эродированных сильнощепнистых легкосуглинистых почвах, подстилаемых

четвертичными коллювиальными суглинисто-щепнистыми отложениями; 11 – крутые и среднекрутые склоны, сложенные верхнеюрскими породами с фисташково-дубово-можжевельным редколесьем на коричневых эродированных сильнощепнистых легкосуглинистых почвах, подстилаемых четвертичными коллювиальными глыбово-щепнисто-суглинистыми отложениями; 12 – крутые сильноэродированные склоны, сложенные аргиллитовыми отложениями с единичным произрастанием можжевельника высокого, сосны Палласа и терескенниками; 13 – крутые склоны с дубово-можжевельными лесами с единичными экземплярами сосны (брутейской и Палласа) на коричневых эродированных сильнощепнистых легкосуглинистых почвах, подстилаемых четвертичными коллювиальными щепнисто-суглинистыми отложениями; 14 – крутые террасированные склоны с посадками сосны Палласа и с брутейской с дубово-можжевельными лесами на коричневых эродированных сильнощепнистых легкосуглинистых почвах, подстилаемых четвертичными коллювиальными щепнисто-суглинистыми с включением глыб отложениями; 15 – крутые террасированные склоны с посадками сосны брутейской и Палласа; 16 – водораздельно-грядовые с дубово-можжевельным редколесьем с петрофитными сообществами с включением видов асфоделины; 17 – водораздельно-грядовые и останцово-водораздельные антропогенно-преобразованные с единичными экземплярами можжевельника высокого и петрофитными сообществами с включением полыни и ковыля на фрагментарных короткопрофильных коричневых почвах и скоплениях глыбово-щепнистых отложений из обломков среднеюрского известняка; 18 – крутые склоны с можжевельным редколесьем в комплексе с дубово-грабниковыми лесосшибляками; 19 – крутые гравитационные склоны (осыпи) с единичными экземплярами можжевельника высокого с участием астрагала трагантового с фрагментарными короткопрофильными коричневыми почвами и скоплениями глыбово-щепнистых отложений из обломков среднеюрского известняка; 20 – крутые склоны с можжевельным редколесьем на коричневых эродированных сильнощепнистых легкосуглинистых почвах, подстилаемых четвертичными коллювиальными щепнисто-суглинистыми отложениями; 21 – крутые и среднекрутые антропогенно-преобразованные склоны с единичными экземплярами можжевельника высокого, жасмином кустарниковым и астракантой колодезкой на коричневых эродированных сильнощепнистых легкосуглинистых почвах, подстилаемых четвертичными коллювиальными щепнисто-суглинистыми отложениями; 22 – крутые и среднекрутые склоны с можжевельным редколесьем в комплексе с дубово-грабниковыми лесосшибляками и ясенем обыкновенным на коричневых эродированных сильнощепнистых легкосуглинистых почвах, подстилаемых четвертичными коллювиальными щепнисто-суглинистыми отложениями; 23 – прибрежные склоны, сложенные среднеюрскими отложениями с полынно-злаковыми и петрофитными сообществами на коричневых короткопрофильных почвах; 24 – крутые и среднекрутые склоны с полынно-злаковыми и петрофитными сообществами с участием астрагала трагантового и видов асфоделины на коричневых эродированных сильнощепнистых легкосуглинистых почвах, подстилаемых четвертичными коллювиальными щепнисто-суглинистыми отложениями.

Редким является урочище крутых сильноэродированных склонов, сложенных аргиллитовыми отложениями с единичным произрастанием можжевельника высокого, сосны Палласа и терескениками (12). Здесь отмечен ареал редкого для Крыма вида, нуждающегося в охране на региональном уровне — крашенинниковия терескеновая (*Krascheninnikovia ceratoides*) [Красная книга города Севастополя, 2018].

Для восточной части зарезервированной территории характерны урочища крутых и средней крутизны склонов с произрастанием сосны брутйской и с. Палласа (11, 14, 15). Типичны каперсы травянистые (*Capparis herbacea*) [Красная книга города Севастополя, 2018].

В западной части заказника ГПЛЗ «Спилия» на склонах с ближней приморской позицией формируются урочища крутых склонов с петрофитными асфоделиновыми и ковыльными сообществами в комплексе с кустарниковыми зарослями типа шибляк и единичным произрастанием можжевельника (1, 2, 4). Овражно-балочный тип местности достаточно распространён в предполагаемом природном заказнике (3, 9). Урочища водораздельно-грядовые и останцово-водораздельные (16, 17) с петрофитными, асфоделиновыми и ковыльными сообществами формируются на территориях с максимальной антропогенной нагрузкой.

Закрытые северные склоны планируемого заказника имеют переходные черты к ландшафтам среднегорья (зоны широколиственных и сосновых лесов северного макросклона гор; пояса дубовых и смешанных широколиственных лесов на эрозионном среднегорье). Однако открытые южные склоны, имеющие ближнюю позицию к морю, заняты урочищами крутых склонов с можжевельным редколесьем в комплексе с дубово-грабинниковыми лесошибляками (18, 19, 20). Южная приморская часть предполагаемого заказника занята крутыми и обрывистыми клифовыми склонами, сложенными верхнеюрскими известняками с единичным можжевельником высоким (5). У подножия обрывистых клифов сформировался узкий пляжево-бенчевый комплекс, сложенный гравийно-галечниковыми и глыбовыми отложениями. На пляжах встречается катран приморский (*Crambe maritima*) [Красная книга Российской Федерации, 2024; Красная книга города Севастополя, 2018].

Угрозы биологическому и ландшафтному разнообразию. Значительной угрозой для планируемой к заповеданию территории является уничтожение растительного покрова под влиянием ненормированных рекреационных нагрузок, браконьерской вырубki, пожаров и движения автотранспорта. Увеличение рекреационной нагрузки на территорию приводит к формированию дорожно-тропиночной сети, отмечается замусоривание. Строительство объектов временной рекреации и кострища встречаются в наиболее ценных сообществах, образуемых охраняемыми видами. Почвенно-растительный покров в местах нестационарных рекреационных объектов испытывает значительное антропогенное влияние, на отдельных участках отмечена разной степени деградация травяного покрова и сильное повреждение отдельных деревьев [Каширина, Панкеева, 2023]. Одним из крайне негативных факторов, влияющих на современное состояние природных комплексов планируемого ООПТ, является организация мототуров, особенно «эндуротуров». Такой вид деятельности наносит непоправимый урон растительным сообществам и отдельным популяциям видов, занесённых в КК РФ и КК С. Для территории планируемого заказника остаётся угроза уничтожения природных комплексов в результате строительства, поскольку прилегающие к нему участки отданы под частную застройку. Это приведёт не только к полному уничтожению растительного покрова в местах строительства, но и к фрагментации и уничтожению естественных ландшафтов и, прежде всего, сообществ с участием *J. excelsa* и *J. deltoides*, разрушению местообитаний охраняемых видов флоры и фауны на значительном удалении от селитебных зон. Нарушение растительного покрова способствует распространению инвазионных видов, таких как айлант высочайший (*Ailanthus altissima*) и опунция стелющаяся (*Opuntia humifusa*), которые угрожают биологическому разнообразию планируемого ООПТ [Багрикова, 2013; Багрикова, Бондарева, Рыфф, 2014]. К природным факторам негативного влияния на состояние природных комплексов относятся оползни, абразия, эрозия, обвалы и сейсмичность.

Все указанные угрозы негативного воздействия влияют на отдельные особи и на фитоценоз в целом: изменяется структура сообщества, флористический состав, вертикальное и горизонтальное строение, проективное покрытие, сомкнутость, доминирование, процессы возобновления [Высокоможжевеловые леса ... , 1992; Дидух, 1992; Кобечинская, Отурина, 1998; Фатерыга, 2009; Лавров, Блінкова, Плугатар, 2011; Плугатарь, 2015].

Придание г. Спидия заповедного статуса будет способствовать формированию экосети ООПТ г. Севастополя. Объект входит в состав экоцентров «Айя-Сарычский приморский» и «Западно-Южнобережный» экологического каркаса (сети) Крыма. [Разработка схемы региональной экологической сети ... , 2008]. Территория ГПЛЗ «Спидия» является экологическим коридором регионального уровня, который связывает ландшафты предгорного, горного и южнобережного регионов Крыма, по которому осуществляется миграция флоры и фауны. Прибрежная низкогорная зона южнобережного комплекса ГПЛЗ «Спидия» представляет самый доступный и удобный путь обмена между Предгорьем и Южным берегом Крыма. Деградация южнобережных ландшафтов в западной прибрежной части района 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 между равнинным и горным Крымом — около 45 % [Гришанков, 1977].

Ландшафты ГПЛЗ «Спидия» отличаются высоким уровнем природоохранной ценности, их научная значимость обусловлена флористическим и фаунистическим разнообразием биоценозов. Ландшафты обладают аттрактивностью. В то же время природные системы являются открытыми и, как следствие, очень уязвимыми, они не могут устойчиво функционировать без проведения комплекса природоохранных мероприятий.

Необходимо заметить, что на территории ГПЛЗ «Спидия» сохранились историко-археологические памятники различных исторических эпох, находящиеся в хорошей сохранности и имеющие научное и рекреационно-просветительское значение. Среди них остатки фортификационных сооружений конца XIX в. — начала XX в. — «Форт Южный» с сохранившимися беллигеративными ландшафтами. Он представляет собой экскурсионный объект, с которым связаны значительные события II Оборона г. Севастополя (1941–1942 гг.). Другой интересный объект — это «кордонная дорога», построенная балаклавским греческим гарнизоном для контроля сухопутной границы и соединявшая Балаклаву с г. Феодосия (конец XIII в. — середина XIX в.).

Таким образом, исследуемый район целесообразно рассматривать как территорию перспективную для заповедания, где возможны лишь ограниченные виды рекреационной деятельности (экотуризм).

Выводы

1. Представлены результаты комплексного экологического обследования территории г. Спидия, направленного на определение её природоохранной значимости для придания статуса ООПТ.
2. Установлено, что исследуемая территория представляет собой типичный участок южнобережного средиземноморья, которая отличается высокой сохранностью можжевельников редколесий. Высокую природоохранную ценность имеют лесные сообщества, доминантами в которых являются такие охраняемые виды, как *Juniperus excelsa*, *J. deltoides*, *Pinus brutia* и *P. nigra*.
3. В видовом составе зафиксировано не менее 250 видов растений, из которых 22 вида охраняются в КК РФ, 41 — в КК С. Охраняемая фракция флоры представлена 33 родами, относящимися к 19 семействам.

4. В ландшафтной структуре планируемого ГПЛЗ «Спилия» преобладают урочища крутых и очень крутых склонов с фисташково-можжевеловыми, можжевеловыми и сосновыми фитоценозами. Показано, что ландшафты изучаемой территории отличаются биологическим разнообразием, реликтовым характером флоры, аттрактивностью, научной ценностью и средообразующей значимостью.

5. Определены угрозы природного и антропогенного происхождения, которые оказывают негативное воздействие на ландшафтное и биологическое разнообразие планируемой ООПТ.

6. Создание ГПЛЗ «Спилия» имеет важное природоохранное значение для юго-западного горного Крыма. Исследуемая территория является экологическим коридором регионального уровня, который связывает ландшафты предгорного, горного и южнобережного регионов Крымского полуострова, по которому осуществляется миграция флоры и фауны. Прибрежная низкогорная зона южнобережного комплекса ГПЛЗ «Спилия» представляет самый доступный и удобный путь обмена между Предгорьем и Южным берегом. Придание г. Спилия заповедного статуса будет способствовать формированию экосети ООПТ г. Севастополя и Республики Крым.

Список литературы

1. Багрикова Н. А. Структурный анализ адвентивной фракции флоры Крымского полуострова (Украина) // Украинский ботанический журнал. – 2013. – Т. 70, № 4. – С. 489–507. – <https://elibrary.ru/xxrfav>
2. Багрикова Н. А., Бондарева Л. В., Рыфф Л. Э. Особенности распространения *Opuntia humifusa* (Raf.) Raf. на территории г. Севастополя // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. – Ялта : ГНБС, 2014. – Т. 139. – С. 32–46. – <https://elibrary.ru/ucqznd>
3. Высокоможжевеловые леса Крыма и проблемы их охраны / Молчанов Е. Ф., Григоров А. Н., Голубева И. В. [и др.]. – Москва, 1992. – 296 с. – Деп. в ВИНТИ 30.12.1992, № 3706-B92.
4. Гришанков Г. Е. Парагенетическая система природных зон (на примере Крыма) // Вопросы географии / Рус. геогр. о-во. – Москва : Мысль, 1977. – Вып. 104. – С. 128–139.
5. Дидух Я. П. Растительный покров Горного Крыма (структура, динамика, эволюция и охрана). – Киев : Наук. думка, 1992. – 251 с.
6. Ена А. В. Природная флора Крымского полуострова. – Симферополь : Н. Оріанда, 2012. – 232 с.
7. Каширина Е. С., Панкеева Т. В. Воздействие рекреации на почвенно-растительный покров особо охраняемых природных территорий Севастополя (на примере Большой Севастопольской тропы) // Географическая среда и живые системы. – 2023. – № 4. – С. 91–107. – <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2023-4-91-107>
8. Климатический атлас Крыма / авт.-сост. И. П. Ведь. – Симферополь : Таврия-Плюс, 2000. – 118 с.
9. Кобечинская В. Г., Отурина И. П. Динамика реликтовых можжевеловых редколесий с учётом различных форм антропогенного воздействия // Учёные записки Симферопольского государственного университета. – 1998. – № 7. – С. 31–34.
10. Комплексная программа охраны окружающей природной среды, рационального использования природных ресурсов и экологической безопасности г. Севастополя на период до 2010 г. / Севастоп. гор. гос. администрация. – Севастополь, 2001. – 317 с.
11. Красная книга города Севастополя / Правительство Севастополя, Гл. упр. природ. ресурсов и экологии г. Севастополя ; отв. ред.: И. В. Довгаль, В. В. Корженевский. – Калининград ; Севастополь : РОСТ – ДООФК, 2018. – 431 с.

12. Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы / М-во природ. ресурсов и экологии РФ [и др.] ; отв. ред. Д. В. Гельтман. – 2-е офиц. изд. – Москва : ВНИИ экологии, 2024. – 944 с.
13. Лавров В. В., Блінкова О. І., Плугатарь Ю. В. Синфітоіндикація рекреагенних змін екологічних умов реліктових ялівцевих фітоценозів Південного берега Криму // Агроекологічний журнал. – 2011. – № 4. – С. 76–81. – <https://www.elibrary.ru/ruqxdz>
14. Материалы комплексного экологического обследования территорий, обосновывающие придание им статуса особо охраняемой природной территории регионального значения в городе Севастополе – Государственный природный ландшафтный заказник «Спилия» (биологическое разнообразие) : отчёт о НИР / Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского РАН ; рук. Л. В. Бондарева. – Севастополь, 2019 г. – 117 с.
15. Муратов М. В. Краткий очерк геологического строения Крымского полуострова. – Москва : Госгеолтехиздат, 1960. – 207 с.
16. Панкеева Т. В., Каширина Е. С., Миронова Н. В., Новиков А. А. Природный заказник «Спилия» как новый объект ООПТ Севастополя // Заповедники 2019: биологическое и ландшафтное разнообразие, охрана и управление : Материалы IX Всерос. науч.-практ. конф., Симферополь, 9–11 окт. 2019 г. / Крым. федер. ун-т им. В. И. Вернадского [и др.] – Симферополь : АРИАЛ, 2019. – С. 79–84. – <https://elibrary.ru/mrnosw>
17. Панкеева Т. В., Миронова Н. В., Горбунов Р. В. Пространственная организация ландшафтов прибрежной зоны г. Севастополя – Симферополь : АРИАЛ, 2025. – 144 с.
18. Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран : открытый онлайн-атлас и определитель растений. – 2007–2025. – URL: <http://www.plantarium.ru/> (дата обращения: 22.01.2026).
19. Плугатарь Ю. В. Леса Крыма : монография. – Симферополь : АРИАЛ, 2015. – 385 с.
20. Позаченюк Е. А., Панкеева Т. В. Геоэкологическая экспертиза административных территорий (Большой Севастополь). – Симферополь : Бизнес-Информ, 2008. – 298 с. – <https://elibrary.ru/wbqatb>
21. Программа и методика биогеоценологических исследований / АН СССР, Науч. совет по пробл. биогеоценологии и охраны природы ; отв. ред. Н. В. Дылис. – Москва : Наука, 1974. – 403 с.
22. Разработка схемы региональной экологической сети Автономной Республики Крым : науч.-техн. отчёт / Таврич. нац. ун-т им. В. И. Вернадского ; рук. С. А. Карпенко. – Симферополь, 2008. – 322 с.
23. Технич.-экономическое обоснование зонирования рекреационных территорий Большого Севастополя : отчёт о НИР / Крым. ин-т природоохран. и курорт. стр-ва. – Симферополь, 1994. – 250 с.
24. Фатерыга В. В. Состояние высокоможжевеловых лесов Южного берега Крыма при различной рекреационной нагрузке // Заповедники Крыма. Теория, практика и перспективы заповедного дела в Черноморском регионе : Материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Симферополь, 22–23 окт. 2009 г. / Таврич. нац. ун-т им. В. И. Вернадского [и др.]. – Симферополь : ТНУ, 2009. – С. 245–249. – <https://elibrary.ru/yjofhk>
25. Швидкий А. В. Геологическое строение окрестностей бухты Мегало-Яло (Юго-Западный Крым) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7, Геология. География. – 1999. – Вып. 1. – С. 81–84.

THE ENVIRONMENTAL VALUE AND PROSPECTS FOR THE CREATION OF «SPILIA» NATURAL RESERVE (SEVASTOPOL)

Pankeeva T. V., Kashirina E. S.

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: tatyanapankeeva@yandex.ru, e_katerina.05@mail.ru

Abstract: The results of a comprehensive ecological description of the territory of the city of Spilia are presented to determine the environmental value and the subsequent creation of a specially protected natural area — the state natural landscape reserve "Spilia". The planned reserve is located in the federal city of Sevastopol, with a total area of 119 hectares. Based on archival, literary data and field studies, it was determined that the territory of the planned natural reserve "Spilia" is characterized by biological and landscape diversity, the presence of plant species listed in the Red Book of the Russian Federation and the city of Sevastopol. Forest communities are of high conservation value, dominated by such protected species as *Juniperus excelsa* M. Bieb., *Juniperus deltoides* R. P. Adams, *Pinus brutia* Ten and *Pinus nigra* J. F. Arnold subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe. At least 250 plant species have been recorded in the species composition of phytocenoses, of which 22 species are protected in the Red Book of the Russian Federation, 41 in the Red Book of Sevastopol. The protected flora fraction is represented by 33 genera belonging to 19 families. The landscape structure of the planned Spilia State Nature Reserve is dominated by tracts of steep and very steep slopes with pistachio-juniper, juniper and pine phytocenoses. It is shown that the landscapes of the studied territory are distinguished by biological diversity, relict nature of flora, attractiveness, scientific value and environmental significance. It was revealed that the recreational load and unregulated movement of vehicles have a significant impact. The preservation of the protected status will contribute to the preservation of unique complexes and the formation of an ecological network in Sevastopol and the Republic of Crimea.

Keywords: specially protected natural areas, nature reserve, protected species, landscape structure, Red Book, Sevastopol, Spilia

Сведения об авторах

Панкеева Татьяна Викторовна	доктор географических наук, ведущий научный сотрудник отдела биотехнологий и фиторесурсов, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: tatyanapankeeva@yandex.ru
Каширина Екатерина Сергеевна	кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории ландшафтной экологии и геоматики, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: e_katerina.05@mail.ru

Поступила в редакцию 30.01.2026
Принята к публикации 10.05.2026

**ИХТИОФАУНА РЕКИ ДОНГНАЙ В ГРАНИЦАХ НАЦИОНАЛЬНОГО
ПАРКА КАТТЬЕН (ВЬЕТНАМ) С УЧЁТОМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ В СЕЗОН ДОЖДЕЙ***

**Тихонова Е. А.¹, Соловьёва О. В.¹, Сидоров И. Г.¹, Аблязов Э. Р.^{1,2}, Гусева Е. В.¹,
Нгуен Чонг Хиеп³, Ву Тхы Минь Чау³, Ле Дык Мань³, Май Куанг Туэн³,
Ле Минь Туан⁴**

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

²Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, г. Москва, Российская Федерация,

³Южное отделение Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского
и технологического центра, г. Хошимин, Вьетнам,

⁴Институт науки и технологий по энергетике и окружающей среде Вьетнамской академии наук
и технологий, г. Хошимин, Вьетнам

Аннотация: Определены основные физико-химические характеристики воды р. Донгнай на участке акватории национального парка Каттйен (Вьетнам), которые составляли: температура воды в поверхностном слое — от 26,4 до 27,5 °С, в придонном — 26 °С, pH воды — от 6 до 9, содержание кислорода более 4 мг/л, значения электропроводности ниже 50 мСм/см, солёность соответствовала пресной воде; концентрация взвешенного вещества в поверхностном слое воды в среднем была 46,3 ± 8,6 мг/л, в придонном 61,7 ± 13,1 мг/л. Все показатели находились в пределах нормативов и соответствовали воде уровня Б (среднее качество воды). Данные условия являются благополучными для существования и развития рыб. Отмечено 14 видов рыб, 11 из которых имеют коммерческое значение как объекты промысла и/или аквакультуры или используются как объект местного промысла. Один вид — храмуля герлаха *Onychostoma gerlachi* (Peters, 1881) включён в перечень видов, находящихся под угрозой исчезновения, однако его вылов разрешён при соблюдении ограничений по размеру и сезону.

Ключевые слова: физико-химические параметры воды, ихтиофауна, р. Донгнай, национальный парк Каттйен, Вьетнам

Введение

Национальный парк Каттйен находится на юге Вьетнама в 160 км к северу от г. Хошимина. Он располагается на территории двух провинций (Ламдонг и Донгнай), где протекает третья по величине во Вьетнаме река Донгнай; занимает площадь около 720 км² и охватывает одну из самых больших сохранившихся в стране областей низинных тропических лесов. Национальный парк включает в себя водосборный бассейн р. Донгнай с нетипичными ландшафтами: порогами, водопадами, затопленными и полузатопленными участками и т. д., служит резервуаром для удержания паводковых вод. Его экосистема принимает активное участие в борьбе с наводнениями, защищая расположенные ниже по течению поселения.

*Работа выполнена в рамках гос. заданий ФИЦ ИнБЮМ и Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра «Эколан Э–3.6 «Современное состояние экосистем и разнообразие гидробионтов бассейна реки Донгнай» (задача № 4 «Оценка загрязнения поллютантами ядерной и неядерной природы отдельных компонентов экосистемы бассейна реки Донгнай: распределение, накопление и вероятные источники поступления (участки реки в границах национального парка Каттйен и вблизи г. Бьенхоа)», по теме ФИЦ ИнБЮМ «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемозоологических процессов в экосистемах водоёмов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России» (№ гос. регистрации 124030100127-7).

В 2001 г. в рамках программы ЮНЕСКО парк Каттъян был объявлен особо охраняемой природной территорией и стал 441-м биосферным заповедником. В 2005 г. его включили в список Рамсарских водно-болотных угодий международного значения.

Биологическое разнообразие парка признано WWF (Всемирный фонд дикой природы): в парке произрастает 1610 видов растений и обитает 1568 видов животных. Из них 31 вид растений и 84 вида животных занесены в Красную книгу Вьетнама, 50 видов птиц находятся в приоритетном списке для защиты на глобальном уровне и внесены в Красную книгу МСОП [Cat Tien National ...]. В водоёмах парка обитает 99 видов рыб [Национальный парк (заповедник) ...].

Физико-химические свойства воды (прозрачность, температура, газовый режим, солёность и др.) являются важнейшими факторами среды, определяющими нормальную жизнедеятельность водных и околоводных животных, в первую очередь, рыб [Гигиена и санитария ... , 2013]. Прозрачность воды зависит от количества взвешенных частиц, концентрации растворённых веществ, фито- и зоопланктона и имеет большое значение как показатель мощности эвфотической зоны и кислородного режима водотока. Неблагоприятная температура воды приостанавливает или замедляет физиологические функции организма рыб, нарушает деятельность нервной системы, дыхание, кровообращение. Теплолюбивые рыбы питаются наиболее интенсивно при температуре 17–28 °С, при пониженной температуре пищевая активность ослабевает. [Канаев, 1985; Козлов, 1998; Иванов, 2003]. Недостаток растворённого кислорода вызывает заморы, с последующими неблагоприятными зоогигиеническими последствиями. Исследования показывают, что уровень рН воды существенно влияет на жизнедеятельность возбудителя аэромоноза *Aeromonas hydrophila* (инфекционная болезнь карповых): при низком рН у рыб наблюдается некроз жаберных лепестков, на отмерших участках которых поселяются различные сапрофитные микроорганизмы, развивается вторичная инфекция, приводящая к гибели рыб. Увеличение рН до 8,5–9,0, напротив, способствует замедлению развития и гибели возбудителя аэромоноза [Назаренко, 2015; Давыдов, Темниханов, 2003].

Целью работы было определение видового состава рыб реки Донгнай в пределах национального парка Каттъян (Вьетнам) при зафиксированных в период исследований физико-химических свойствах воды.

Материалы и методы

Пробы воды и гидробионтов отбирали в октябре 2025 г. в паводковый период в акватории р. Донгнай в границах национального парка Каттъян (ст. 1–4, рис. 1).

Отбор воды проводился батометром с поверхностного и придонного (4–6 м) горизонтов. Взвешенное вещество осаждали вакуумной фильтрацией на нитроцеллюлозные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм, с пересчётом концентрации взвеси на 1 л. Солёность (S, psu), растворённый в воде кислород (DO, мг/л), водородный показатель (рН), электропроводность (C, мСм/см), температуру (T, °C) определяли многопараметрическим зондом YSI Professional Digital Sampling System (ProDSS). Ихтиологическую съёмку проводили с использованием пассивных и активных орудий лова, арендованных у местных рыбаков: ставных сетей (ячея от 18 до 40 мм), донных ловушек различной конструкции и бимтрала (ширина рамы — 5 м, высота — 0,5 м, ячея тралового мешка — 10 мм). Таксономическая идентификация рыб проводилась по [Tran et al., 2013; Taki et al., 2021], названия видов приведены согласно [Fricke, Eschmeyer, Van der Laan, 2025; WoRMS]. Подробный анализ патолого-анатомических характеристик рыб для оценки заболеваемости и благополучия не проводился. При этом видимых морфологических изменений не отмечено.

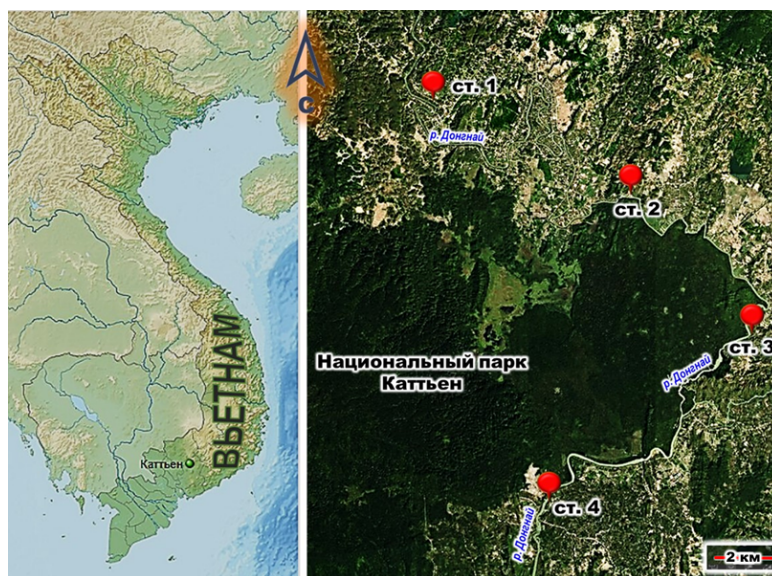


Рис. 1. Расположение станций отбора проб на р. Донгнай в национальном парке Каттьен (Вьетнам), октябрь 2025 г.

Результаты и обсуждение

Физико-химические параметры воды на обследованном участке р. Донгнай представлены в табл. 1. Температура воды соответствовала показателям, характерным для реки Донгнай [Tran et al., 2023]. Показатель pH воды на всех станциях изменялся от 6 до 9. Содержание кислорода в воде соответствовало санитарным нормам для рыбохозяйственных водоёмов (> 4 мг/л). Значения электропроводности были ниже предела электропроводности, характерной для природной речной воды ($50 \mu\text{См/см}$), что указывает на пониженное содержание в ней различных ионов. Солёность на всём протяжении участка соответствовала пресной воде (0 psu).

Таблица 1

Физико-химическая характеристика воды в местах отбора проб гидробионтов в акватории национального парка Каттьен (Вьетнам), октябрь 2025 г.

№ ст.	$T_{\text{пов.}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{дно}}, ^\circ\text{C}$	pH	S, psu	C, $\mu\text{См/см}$	DO, мг/л
1	26,4	26	9,0	0	39,9	7,7
2	27,3	26	8,2	0	38,6	7,3
3	27,5	26	6,4	0	35,0	6,3
4	26,8	26	6,6	0	35,5	7,2

Примечание: $T_{\text{пов.}}$ – температура в поверхностном слое воды; $T_{\text{дно}}$ – температура в придонном слое воды; S – солёность; C – электропроводность; DO – содержание кислорода в воде.

Концентрация взвешенного вещества на исследуемых участках р. Донгнай в поверхностном слое колебалась от 30,8 до 66,3 мг/л со средним показателем $46,3 \pm 8,6$ мг/л, в придонном — от 39,6 до 95,1 мг/л со средним показателем $61,7 \pm 13,1$ мг/л (рис. 2). Ввиду отсутствия нормативов для придонных вод, оценка показателей для них проводилась по нормативам, предусмотренным для поверхностных вод. На всех станциях как в поверхностном, так и придонном слоях данный показатель превышал ПДК (25 мг/л), установленный для поверхностных вод Вьетнама [QCVN 08:2023/BTNMT].

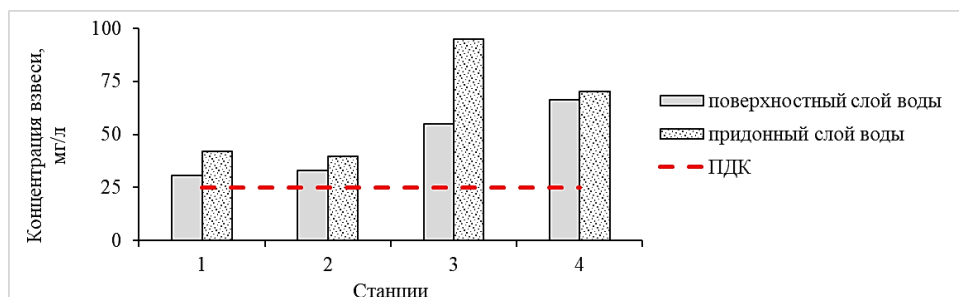


Рис. 2. Концентрация взвеси в поверхностном и придонном слое воды р. Донгнай на участке акватории национального парка Каттъян (Вьетнам), октябрь 2025 г.

Концентрация взвеси также сильно зависит от количества осадков. Ранее было отмечено, что в период с октября по декабрь концентрация взвеси в р. Донгнай колебалась в широком диапазоне от 9 до 66 мг/л [Le, 2023], зачастую превышая ПДК (25 мг/л). Таким образом, полученные показатели характерны для данного водотока, а превышение ПДК взвешенного вещества в воде преимущественно находилось в пределах величин, типичных для влажного сезона.

Согласно QCVN 08:2023/BTNMT, исследованные физико-химические показатели речной воды относятся к уровню Б: среднее качество воды. Указанная категория качества воды предполагает, что водная экосистема потребляет большое количество растворённого кислорода из-за большого количества загрязняющих веществ. В целом, физико-химические показатели воды в р. Донгнай, находящиеся в пределах нормативов или близкие к ним, создают благополучные условия для существования и развития рыб. При этом следует отметить возможное влияние рН воды на видовое разнообразие: на станциях 3 и 4 с пониженным водородным показателем было зафиксировано пониженное разнообразие рыб (4 и 2 вида соответственно).

По разным данным, здесь в общей сложности обитает от 107 до 130 видов рыб, а предполагаемое количество видов может достигать 200 [Freyhof, Serov, Nga, 2000]. Собственно, в акватории парка Каттъян, как указано выше, отмечено 99 видов рыб, однако многие из них могут являться редкими и не иметь промыслового значения.

В ходе исследования оценён видовой состав рыб, встреченных в рассмотренных условиях среды обитания, выделены массовые и экономически важные виды. Перечень видов и их основные экологические характеристики приведены в табл. 2.

По типу питания основу ихтиофауны (табл. 2) составляли всеядные рыбы (*B. schwanefeldii*, *C. apogon*, *L. leptochilus*, *O. waandersii*, *O. vittatus*, *P. proctozystron*). При этом вид *P. pleurotaenia* также можно отнести к всеядным, частично демонстрирующим присущее хищникам поведение. К растительноядным относятся *B. gonionotus*, *O. niloticus* и *H. siamensis*. Отмечен один вид хищной рыбы *C. striata*. Информация о питании трёх видов (*M. obtusirostris*, *O. gerlachi*, *O. microcephalus*) отсутствует.

В выборке присутствовал вид-интродуцент — нильская теляпия *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758), который широко используется в аквакультуре и для повышения рыбопродуктивности местных водоёмов. При этом вид одновременно рассматривается некоторыми исследователями как потенциально опасный инвазивный организм [Canonico et al., 2005]. Для остальных видов водоёмы юго-восточной Азии являются естественным ареалом.

Среди отмеченных видов рыб коммерческое значение как объекты промысла и/или аквакультуры (табл. 2) имеют *O. niloticus*, *B. gonionotus*, *B. schwanefeldii*, *H. siamensis*, *O. vittatus*, *Ch. striata*. Стоит отметить, что крайне важный компонент экономики и пищевой безопасности региона — аквакультура нильской теляпии *O. niloticus*, так как Вьетнам является крупным мировым экспортёром этой рыбы, особенно много её поставляют в США и Европу. Виды *C. apogon*, *L. leptochilus*, *M. obtusirostris*, *O. gerlachi*, *P. proctozystron* используются как объект местного промысла, при этом *O. gerlachi* обладает статусом «находящийся под угрозой» согласно МСОП.

Таблица 2

Ихтиофауна реки Донгнай в границах национального парка Каттьен (Вьетнам), октябрь 2025 г.

Дата отбора	№ ст.	Вид и его характеристика	Примечание
1	2	3	4
25.10.25	1	<i>Barbonymus gonionotus</i> (Bleeker, 1849). Бентопелагический вид, питается растительной пищей и беспозвоночными [Mohsin, Azmi Ambak, 1983; Taki et al., 2021]. Используется как объект аквакультуры, а также для улучшения качества воды и почвы в интегрированных системах «рис-рыба», что способствует повышению урожайности рисовых угодий [Jewel et al., 2023; Kaewpuangdee et al., 2024; Das, Mahanta, 2025].	
26.10.25	2		
25.10.25	1	<i>Mystacoleucus obtusirostris</i> (Valenciennes, 1842). Бентопелагический вид. Питается бентосом и планктоном. Является объектом местного промысла [Rainboth, 1996; Taki et al., 2021].	
25.10.25	1	<i>Onychostoma gerlachi</i> (Peters, 1881) Бентопелагический вид. Объект местного промысла. Внесён в список МСОП как находящийся под угрозой [Jenkins, Kullander, Tan, 2009]. Вылов запрещён с 1 апреля по 31 августа каждого года, а минимальный размер для вылова составляет ≥ 30 см (количество данных экземпляров $n=2$) согласно постановлению 37/2024/ND-CP от 4 апреля 2024 г. Правительства Вьетнама [Decree No. 37/2024/ND-CP].	
25.10.25	1	<i>Puntioplites proctozyston</i> (Bleeker, 1845) Бентопелагический вид [Kottelat, 2001]. Основу рациона составляют насекомые и зоопланктон, также питается водорослями [Rainboth, 1996]. Объект местного промысла.	

Продолжение таблицы № 2

1	2	3	4
25.10.25 27.10.25	1 3	<i>Osteochilus vittatus</i> (Valenciennes, 1842) Бентопелагический вид. Один из ключевых промысловых видов во внутренних водоёмах Индонезии, ценится за вкус мяса и икры и рассматривается как потенциальный экспортный ресурс [Irawan et al., 2023].	
25.10.25 27.10.25	1 3	<i>Labiobarbus leptocheilus</i> (Valenciennes, 1842). Бентопелагический вид. Питается фитопланктоном, перифитонном, бентосными водорослями, зоопланктоном, личинками насекомых, детритом. Является объектом местного промысла [Rainboth, 1996].	
25.10.25	1	<i>Henicorhynchus siamensis</i> (Sauvage, 1881). Бентопелагический вид. В питании доминирует фитопланктон, также водоросли и перифитон [Rainboth, 1996; Suvarnaraksha et al., 2011]. Один из важнейших промысловых видов.	
25.10.25	1	<i>Barbonymus schwanenfeldii</i> (Bleeker 1854). Бентопелагический вид. Всеядная рыба, в рационе которой преобладают фитопланктон, мхи, растительные остатки, а также черви и насекомые [Rainboth, 1996; Desrita et al., 2021]. Объект аквакультуры. Вылов запрещён в период с 1 апреля по 30 сентября каждого года, а минимальный размер для вылова составляет ≥ 20 см (количество данных экземпляров $n=9$) согласно (Decree No. 37/2024/ND-CP).	
26.10.25 27.10.25	2 3	<i>Channa striata</i> (Bloch, 1793). Бентопелагический вид. Хищник. Имеет коммерческую ценность и является перспективным объектом аквакультуры, объект местного промысла [Gustiano, Kurniawan, Kusmini, 2021 ; Setiawan et al., 2024].	
26.10.25	2	<i>Osteochilus waandersii</i> (Bleeker, 1853). Бентопелагический вид. Основу рациона составляют водоросли и беспозвоночные (черви) [Rainboth, 1996]. Промыслового значения не имеет.	

Продолжение таблицы № 2

1	2	3	4
26.10.25 28.10.25	2 4	<i>Cyclocheilichthys apogon</i> (Valenciennes, 1842). Бенто-пелагический вид. Всеядный (эврифаг). Является объектом местного промысла в Таиланде [Vidthayanon, 2002].	
26.10.25	2	<i>Oreochromis niloticus</i> (Linnaeus, 1758). Бентопелагический вид. Третий по значимости объект мировой аквакультуры [Geletu, Zhao, 2023; Munguti et al., 2022].	
27.10.25	3	<i>Osteochilus microcephalus</i> (Valenciennes, 1842). Пресноводный вид. Почти нет данных о питании, размножении, сезонной динамике и местообитаниях. Промыслового значения не имеет.	
28.10.25	4	<i>Pseudolais pleurotaenia</i> (Sauvage, 1878). Бентопелагический вид. Питается наземными и водными насекомыми, а также небольшим количеством растительной пищи [Taki et al., 2021; Rainboth, 1996]. Промыслового значения не имеет.	

Заключение

Проведённые исследования физико-химических параметров воды в акватории национального парка Каттьен в р. Донгнай показали, что температура поверхностного слоя изменялась от 26,4 до 27,5 °С, а в придонном была постоянной на всех станциях и составляла 26,0 °С. Водородный показатель изменялся от 6,4 до 9,0, что незначительно больше допустимого для питьевой воды высшей категории. Солёность на всех станциях составляла 0 рsu, показатели электропроводности были ниже допустимых 50 мСм/см (35,0–39,9 мСм/см), содержание кислорода (DO) в воде — в пределах рекомендуемой нормы (6,3–7,7 мг/л). Средняя концентрация взвешенного вещества в поверхностном слое составляла 46,3±8,6 мг/л, в придонном — 61,7±13,1 мг/л, что выше ПДК (25 мг/л). Все исследованные параметры указывают на соответствие воды р. Донгнай уровню Б (среднее качество воды).

По результатам ихтиологической съёмки отмечено 14 видов рыб, 11 из которых имеют коммерческое значение как объекты промысла и/или аквакультуры или используются как объект местного промысла. Один вид — *Onychostoma gerlachi* — имеет статус «находящийся под угрозой», но его вылов разрешён при определённых размерах и сезоне. Все отмеченные виды рыб относились к пресноводным тропическим бентопелагическим видам. В выборке присутствовал один вид-вселенец — *O. niloticus*. Наиболее встречаемыми в уловах настоящего исследования были виды: *B. gonionotus*, *O. vittatus*, *L. leptocheilus*, *C. apogon*, *C. striata*, зафиксированные на 50 % станций.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность младшему научному сотруднику Чуужиковой О. Д. за участие в отборе, обработке и получении данных по концентрациям взвешенных веществ в речной воде в рамках совместных экспедиционных работ.

Список литературы

1. Гигиена и санитария рыбного хозяйства / Саратов. гос. аграр. ун-т им. Н. И. Вавилова ; сост. М. Ю. Кузнецов. – Саратов : СГАУ, 2013. – 89 с.
2. Давыдов О. Н., Темниханов Ю. Д. Болезни пресноводных рыб. – Киев : Ветинформ, 2003. – 544 с.
3. Иванов А. А. Физиология рыб. – Москва : Мир, 2003. – 284 с.
4. Канаев А. И. Ветеринарная санитария в рыбоводстве. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 280 с.
5. Козлов В. И. Справочник фермера-рыбовода. – Москва : ВНИРО, 1998. – 447 с.
6. Назаренко С. Н. Гидрохимические исследования состояния рек как среды обитания рыб // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 6. – С. 49–51. – <https://cyberleninka.ru/article/n/gidrohimiicheskie-issledovaniya-sostoyaniya-rek-kak-sredy-obitaniya-ryb> (дата обращения: 12.02.2026).
7. Национальный парк (заповедник) Кат Тьен // Гид во Вьетнаме / Динь Чонг Хай. – URL: <https://gid-vietnam.ru/dostoprimechatelnosti-vietnama/park-kat-ten/> (дата обращения: 12.02.2026).
8. Canonico G. C., Arthington A., McCrary J. K., Thieme M. L. The effects of introduced tilapias on native biodiversity // Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems. – 2005. – Vol. 15, iss. 5. – P. 463–483. – <https://doi.org/10.1002/aqc.699>
9. Cat Tien National Park, Dong Nai // Nature and Biodiversity conservation Agency – Ministry of natural resources and environment. – URL: <https://en.nbca.gov.vn/vuon-quoc-gia-cat-tien/> (accessed: 22.02.2026).
10. Das S., Mahanta P. Short term polyculture of three cyprinid species under mid-hill conditions in Meghalaya, North-east India // Indian Journal of Fisheries. – 2025. – Vol. 72, no. 1. – P. 147–149. – <https://doi.org/10.21077/IJF.2025.72.1.156535-19>
11. Decree No. 37/2024/ND-CP. Amendments to some articles of government's decree no. 26/2019/nd-cp dated march 08, 2019 on guidelines for implementation of the law on fisheries // VASEP. Vietnam Association of Seafood Exporters and Producers : portal. – URL: <https://seafood.vasep.com.vn/regulations/decree-no-37-2024-nd-cp-amendments-to-some-articles-of-government-s-decree-no-26-2019-nd-cp-dated-march-08-2019-on-guidelines-for-implementation-of-the-law-on-fisheries-30941.html>. – Publ. 05.06.2024.
12. Desrita D., Hasugian F. K., Yusni E., Manurung V. R., Rambey R. Feeding habits of Tinfoil barb, *Barbonymus schwenenfeldii* in the Tasik River, South Labuhanbatu, North Sumatra, Indonesia // Biodiversitas. – 2021. – Vol. 22, iss. 4. – P. 2131–2135. – <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220462>
13. Freyhof J., Serov D. V., Nga N. T. A preliminary checklist of the freshwater fishes of the River Dong Nai, South Vietnam // Bonn Zoological Bulletin. – 2000. – Vol. 49, iss. 1/4. – P. 93–99.
14. Fricke R., Eschmeyer W. N., Van der Laan R. (eds). Eschmeyer's Catalog of Fishes: Genera, Species, References. – 2025. – URL: www.researcharchive.calacademy.org. – Electronic version 12/2025.
15. Geletu T., Zhao J. Genetic resources of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758) in its native range and aquaculture // Hydrobiologia. – 2023. – Vol. 850, iss. 10/11. – P. 2425–2445. – <https://doi.org/10.1007/s10750-022-04989-4>

16. Gustiano R., Kurniawan K., Kusmini I. Bioresources and diversity of snakehead, *Channa striata* (Bloch 1793): a proposed model for optimal and sustainable utilization of freshwater fish // The 7th International symposium of innovative bio-production Indonesia on biotechnology and bioengineering, 18–20 November 2020 : ISIBIO – 2020. – Cibinong, Indonesia : [s. n.], 2021. – Art. 012012. – (IOP Conference Series: Earth and Environmental Science ; vol. 762). – <https://doi.org/10.1088/1755-1315/762/1/012012>
17. Irawan R., Muslim M., Karolina A., Afriansyah A. Gonadosomatic index and hepatosomatic index of Bonylip Barb (*Osteichilus vittatus*) from Lebak Kalong Floodplain, Ogan Komering Ilir, South Sumatra, Indonesia // International Journal of Science and Research Archive. – 2023. – Vol. 10, iss. 2. – P. 174–180. – <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2023.10.2.0918>
18. Jenkins A., Kullander F. F., Tan H. H. *Onychostoma gerlachi* // The IUCN Red List of Threatened Species / Intern. Union for Conservation of Nature. – 2009. – <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2009-2.RLTS.T166884A6290492.en>
19. Jewel M., Haque M., Ali S., Pervin M., Ahmed M., Islam M., Hossain M., Albeshr M., Arai T. Integration of vegetables and fish with rice in rain-fed farmland: towards sustainable agriculture // Agriculture. – 2023. – Vol. 13, iss. 4 – Art. 755. – <https://doi.org/10.3390/agriculture13040755>
20. Kaewpuangdee P., Saowakoon S., Kasamawut K., Kruapukdee A., Jutagate A., Jutagate T. Changes in water quality and soil property in the rice – freshwater animal co-culturing system // Water. – 2024. – Vol. 16, iss. 20, – Art. 2890. – <https://doi.org/10.3390/w16202890>
21. Kottelat M. Fishes of Laos. – Colombo, Sri Lanka : WHT Publ., 2001. – 198 p.
22. Le T. P. Water quality assessment using water quality index: a case of the Dong Nai river, sections flow through Bien Hoa city // Thu Dau Mot University Journal of Science. – 2023. – Vol. 5, iss. 2. – P. 135–144. – <https://doi.org/10.37550/tdmu.EJS/2023.02.402>
23. Mohsin A. K. M., Azmi Ambak M. Freshwater fishes of peninsular Malaysia. – Malaysia : Penerbit Univ. Pertanian, 1983. – 284 p.
24. Munguti J., Nairuti R., Iteba J., Obiero K., Kyule D., Opiyo M., Abwao J., Kirimi J., Outa N., Muthoka M., Githukia C., Ogello E. Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758) culture in Kenya: Emerging production technologies and socio-economic impacts on local livelihoods // Aquaculture, Fish and Fisheries. – 2022. – Vol. 2, iss. 4. – P. 265–276. – <https://doi.org/10.1002/aff2.58>
25. QCVN 08:2023/BTNMT. National technical regulation on Surface water quality. – Hà Nội : [s. n.], 2023. – 16 p. [in Vietnamese].
26. Rainboth W. J. Fishes of the Cambodian Mekong. – Rome : Food and Agriculture Organization of the UN, 1996. – 265 p.
27. Setiawan H., Intanon M., Chummitri P., Sringarm K., Sathanawongs A. Snakehead Fish, *Channa striata* (Bloch, 1973), protein concentrate: excellent recovery of fish-based albumin source and its possible application for sperm capacitation // Asian Fisheries Science. – 2024. – Vol. 37, iss. 2. – P. 125–137. – <https://doi.org/10.33997/j.afs.2024.37.2.005>
28. Suvarnaraksha A., Lek S., Lek-Ang S., Jutagate T. Life history of the riverine cyprinid *Henicorhynchus siamensis* (Sauvage, 1881) in a small reservoir // Journal of Applied Ichthyology. – 2011. – Vol. 27. – P. 995–1000. – <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2010.01619.x>
29. Taki Y., Ohtsuka R., Komoda M. [et al.] Fishes of the Indochinese Mekong. – Tokyo : Nagao Natural Environment Found., 2021. – 562 p.
30. Tran D. D., Shibukawa K., Nguyen P. T., Ha H. P., Tran L. X., Mai H. V. [et al.] Fishes of the Mekong Delta, Vietnam. – Can Tho, Vietnam : Can Tho Univ. Publ. House, 2013. – 174 p.

31. Tran Thi Thu Huong, Tran Anh Quan, Nguyen Thi Hong Hanh, Nguyen Xuan Tong. Assessing water quality in the Dong Nai River (Vietnam): implications for sustainable management and pollution control // Water Science and Technology. – 2023. – Vol. 87, iss. 11. – P. 2917–2929. – <https://doi.org/10.2166/wst.2023.151>
32. Vidthayanon C. Peat swamp fishes of Thailand. – Bangkok, Thailand : Office of Environmental Policy and Planning, 2002. – 136 p.
33. WoRMS. World Register of Marine Species. – URL: <http://www.marinespecies.org>. (accessed 10.12.2025).

ICHTHYOFAUNA OF THE DONG NAI RIVER AQUATORY IN THE CAT TIEN NATIONAL PARK (VIETNAM) TAKING INTO ACCOUNT THE PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS OF THEIR HABITAT DURING THE RAINY SEASON

Tikhonova E. A.¹, Soloveva O. V.¹, Sidorov I. G.¹, Abliazov E. R.^{1,2}, Guseva E. V.¹,
Nguyen Trong Hiep³, Vu Thi Minh Chau³, Le Duc Manh³, Mai Quang Tuyen³, Le Minh Tuan⁴

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

²A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation,

³Southern Branch of the Joint Russian-Vietnamese Tropical Research and Technological Center,
Ho Chi Minh, Vietnam,

⁴Institute of Science and Technology for Energy and Environment Vietnam Academy of Science
and Technology (VAST), Ho Chi Minh, Vietnam

Abstract: The main physicochemical characteristics of the Dong Nai River water in the Cat Tien National Park (Vietnam) were determined. They were as follows: water temperature in the surface layer ranged from 26,4 to 27,5 °C, in the bottom layer — 26 °C, water pH fluctuated from 6 to 9, oxygen content exceeded 4 mg/L, electrical conductivity values were below 50 µS/cm, salinity corresponded to the fresh water; the suspended matter concentration in the surface layer of water averaged 46,3±8,6 mg/L, and in the bottom layer 61,7±13,1 mg/L. All parameters were within the standard limits and corresponded the quality of water to level B (average water quality). These conditions were favorable for the existence and development of fish. The 14 species of fish have been recorded, 11 species are commercially important as commercial fisheries and/or aquaculture species, or are used in local fisheries. One of the species *Onychostoma gerlachi* (Peters, 1881) was classified as endangered, but its catch under present sizes and seasons is permitted.

Keywords: physicochemical parameters of water, ichthyofauna, Cat Tien National Park, Dong Nai River, Vietnam

Сведения об авторах

Тихонова
Елена
Андреевна кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник,
ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН»,
просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail:
tikhonova_ea@ibss-ras.ru

Соловьёва
Ольга
Викторовна кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник,
ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН»,
просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail:
soloviova@ibss-ras.ru

Сидоров Илья Геннадиевич	научный сотрудник отдела радиационной и химической биологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: sidorov@ibss-ras.ru
Аблязов Эрнес Рустемович	инженер лаборатории тропической экологии, ФГБУН «Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН»; научный сотрудник отдела ихтиологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: abliazov@ibss-ras.ru
Гусева Елена Владимировна	младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: guseva_ev@ibss-ras.ru
Нгуен Чонг Хиеп	кандидат технических наук, заведующий, лаборатория анализа окружающей среды, Южное отделение Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра, г. Хошимин, Вьетнам, 3, ул. 3/2, район Вуон Лай, 740300; e-mail: hiepnguyen@vrtc.org.vn
Ву Тхи Минь Чау	магистр, научный сотрудник, лаборатория анализа окружающей среды, Южное отделение Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра, г. Хошимин, Вьетнам, 3, ул. 3/2, район Вуон Лай, 740300; e-mail: chauvu.vrtc@gmail.com
Ле Дык Мань	кандидат химических наук, заместитель заведующего, лаборатория анализа окружающей среды, Южное отделение Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра, г. Хошимин, Вьетнам, 3, ул. 3/2, район Вуон Лай, 740300; e-mail: ducmanh89@gmail.com
Май Куанг Туэн	магистр, научный сотрудник, лаборатория анализа окружающей среды, Южное отделение Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра, г. Хошимин, Вьетнам, 3, ул. 3/2, район Вуон Лай, 740300; e-mail: maitruclan@gmail.com
Ле Минь Туан	магистр, научный сотрудник, заведующий, центр экологических технологий, Институт науки и технологий по энергетике и окружающей среде, Вьетнамская академия наук и технологий, 1, ул. Мак Динь Чи, район Сайгон, г. Хошимин, Вьетнам, 710228; e-mail: tuangb@gmail.com

Поступила в редакцию 01.03.2026

Принята к публикации 22.04.2026

СТРУКТУРА, ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ

УДК 582.263-023.824(262.5)

DOI: [10.21072/eco.2026.11.2.04](https://doi.org/10.21072/eco.2026.11.2.04)

О МАССОВЫХ СКОПЛЕНИЯХ ШАРОВ ИЗ ЗЕЛЁНОЙ ВОДОРОСЛИ *CLADOPHORA LINIFORMIS* KÜTZING В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ КЕРЧЕНСКОГО ПОЛУОСТРОВА (КРЫМ, ЧЁРНОЕ МОРЕ) *

Мильчакова Н. А., Кандаурова Д. А., Чернышева Е. Б.

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

г. Севастополь, Российская Федерация,

e-mail: nmilchakova@ibss-ras.ru

Аннотация: В работе впервые для Чёрного моря приведена эколого-биоморфологическая характеристика массовых скоплений шаров из зелёной водоросли *Cladophora liniformis* Kützinger, обнаруженных в пляжной зоне пос. Жуковка (Крым, Керченский полуостров) в сентябре 2025 г. Показано, что общая площадь распространения шаров составляла 255 м², их наибольшее количество зафиксировано вблизи береговой линии, на песчано-ракушечном субстрате. Определение плотности и размерно-массовых параметров шаров проводили на трёх трансектах, заложенных перпендикулярно к берегу в границах их распространения; на каждой из трансект количественные пробы шаров отбирали учётной рамкой 25 × 25 см в четырёхкратной повторности. Установлено, что шары *C. liniformis* встречались в трёх формах — сферической, овальной (яйцевидной) и палочковидной, на долю которых приходилось 86,8; 4,4 и 8,8 % их общего количества соответственно. Плотность скоплений шаров варьировала от 14 до 223 экз. (на учётную рамку S = 625 см²), их диаметр — от 3 до 35 мм (20,29 ± 0,21) мм, средняя величина воздушно-сухой массы шара составляла (380,0 ± 0,013) мг. Сравнительный анализ распространения шаров из различных видов водорослей в других районах Мирового океана показал, что показатели плотности их скоплений значительно отличаются, тогда как размерные параметры сходны или сопоставимы. Обсуждаются причины формирования шаров и других массовых скоплений водорослей у берегов Крымского полуострова и других районов Азово-Черноморского бассейна.

Ключевые слова: макроводоросли, *Cladophora liniformis*, шарообразная форма, морфоструктурные параметры, плотность, береговая зона, Керченский пролив

Введение

Массовые скопления шарообразных неприкреплённых форм макроводорослей относят к уникальным природным явлениям, редким для береговой зоны морских и пресноводных водоёмов [Mathieson, Dawes, 2002]. Их формирование связывают с морфологическими особенностями видов (обильное ветвление, быстрый рост, фрагментация талломов и т. д.) и биотопическими условиями, такими как вдольбереговые течения, волновая активность, рельеф и структура донных отложений [Vadas, Beal, 1987]. Наиболее изученными являются так называемые шары маримо, описанные для пресноводных водоёмов Японии и России (озёра Акан и Байкал) и состоящие в основном из зелёных водорослей *Aegagropila brownii* (Dillwyn) Kützinger и *Aegagropilopsis clavuligera* (Grunow) Boedeker [Tuji, Niiyama, 2022]. Во многих регионах шары «маримо» имеют охранный статус, в Европе их относят к исчезающим [Kurogi, 1980; Boedeker, 2010; Boedeker et al., 2010; Volkova, 2022; Guiry, Frödén, 2023].

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Биоразнообразие как основа устойчивого функционирования морских экосистем, критерии и научные принципы его сохранения» (№ гос. регистрации 124022400148-4).

До настоящего времени шары из морских макроводорослей относительно мало изучены, хотя первые сведения о них относятся к началу прошлого века [Бабич, Заика, 2011]. Известно, что их могут образовывать 54 вида, в том числе 25 красных (Rhodophyta), 18 зелёных (Chlorophyta) и 11 бурых (Ochrophyta) видов водорослей [Norton, Mathieson, 1983; Mathieson, Dawes, 2002]. Шары представляют собой одновидовые (реже — многовидовые) образования, чаще всего они формируются из зелёных водорослей порядка Cladophorales; в их составе обнаружены многие виды беспозвоночных животных, раковины моллюсков, листья и корневища морских трав [Бабич, Заика, 2011; Ballantine, Aponte, Holmquist, 1994; Battelli, Leliaert, 2021].

В последние десятилетия в условиях возросшего эвтрофирования и глобальных климатических изменений вспышки развития неприкреплённых форм зелёных водорослей, преимущественно родов *Cladophora*, *Chaetomorpha* (Cladophorales) и *Ulva* (Ulvales), наблюдались во многих районах Мирового океана, а также в пресноводных водоёмах. Впервые крупнейшее скопление неприкреплённой формы *Cladophora* описано из прибрежных вод Бермудских островов в конце 1960-х годов, где его толщина достигала 10 см [Bach, Josselyn, 1978]. В Жёлтом море зелёные приливы из *Ulva prolifera* O.F. Müller наблюдались непрерывно с 2007 по 2018 г. [Zhao et al., 2019]. В Чёрном море постоянные вспышки развития неприкреплённых форм *Cladophora albida* (Nees) Kützinger, *C. glomerata* (Linnaeus) Kützinger и *C. vagabunda* (Linnaeus) C. Ноек регистрировались в прибрежной зоне Кавказа с 1980-х годов, где их биомасса на обширных площадях достигала 400–800 г·м⁻² [Vershinin, Kamnev, 2001], а у берегов Румынии скопления видов *Cladophora* и *Ulva* — с 1970-х, но особенно в 2010 г. и с 2019 по 2021 г. при аномально высокой температуре воды и высоких концентрациях биогенных элементов [Marin, 2022]. В Западном Крыму, на пляжах Каламитского залива, летом 1988 г. было зафиксировано до 75 т штормовых выбросов видов кладофоры на 1 км береговой зоны [Болтачева, Мильчакова, Миронова, 1999]. В северо-западной части Чёрного моря обильные нитевидные скопления *Cladophora sericea* (Hudson) Kützinger, ранее неизвестные для других районов Мирового океана, впервые были зарегистрированы в толще воды на глубине до 40 м в 2003 г., наличие этих скоплений привело к прекращению рыбного промысла и изменению трофической структуры донных биоценозов [Болтачев, Мильчакова, 2004].

Чрезмерное развитие в эвтрофированных акваториях массовых видов из родов *Cladophora*, *Chaetomorpha* и *Ulva* является причиной образования зелёных приливов и представляет собой значительную экологическую проблему [Merceron et al., 2007]. Большинство исследователей связывают эти вспышки развития с эврибионтностью и эвригалинностью видов, вариабельностью их морфометрических параметров, способностью к интенсивному росту и размножению в условиях хронического загрязнения [Морозова-Водяницкая, 1959; Зинова, 1967; Виноградова, 1974; Афанасьев, Сушкова, Камнев, 2020; Prazukin et al., 2021].

В последние годы в прибрежной зоне многих регионов Мирового океана стали чаще наблюдаться плавающие или выброшенные на берег шарообразные формы видов *Cladophora* и *Chaetomorpha* [Mathieson, Dawes, 2002; Cooke et al., 2015; Battelli, Leliaert, 2021], а также их придонные маты [Prazukin et al., 2025]. Несмотря на накопленные данные о развитии макроводорослей, в том числе зелёных, в прибрежной зоне Азово-Черноморского бассейна, до настоящего времени были известны лишь единичные случаи массовых скоплений шаров из них на берегу. В незначительном количестве они были отмечены на берегу Тендровского залива в 2010 г. (устное сообщение Д. Д. Королесовой), в том же районе массово у пос. Потиевка летом 2013 г. (данные Н. А. Мильчаковой) и на пляже пос. Кирилловка в Северном Приазовье в ноябре 2021 г. [Вдоль побережья ... , 2021]. В районе Керченского пролива шары из *Cladophora siwaschensis* K.I. Meyer встречались на косе Чушка, однако сведения о коллекторе и дате сбора отсутствуют [Афанасьев, Сушкова, Камнев, 2020].

Первое массовое скопление шаров из водорослей было зафиксировано в береговой зоне Крымского полуострова в районе г. Керчи, на пляже пос. Жуковка, 17 сентября 2025 г. [Алдина, 2025]. С учётом редкости этого явления в Азово-Черноморском бассейне цель настоящей работы заключалась в эколого-биоморфологической характеристике скоплений шаров из водорослей у берегов Крымского полуострова, определении их плотности и морфометрических параметров, особенностей распространения и выявлении факторов, влияющих на их формирование и выброс, а также в их сопоставлении с данными из других районов Мирового океана.

Материалы и методы

Характеристика района исследований. Береговая зона Керченского пролива сформирована Керченским и Таманским полуостровами, отличается высоким биологическим и биотопическим разнообразием, в прибрежной зоне в составе донной растительности доминируют сообщества морских трав [Морские охраняемые ... , 2015]. Ширина пролива изменяется на разных участках от 4,5 до 15 км, максимальная глубина составляет 18 м, донные отложения представлены в основном илистыми песками и алевритами с высоким содержанием детрита, реже встречается ракушечник, галька, выходы известковых каменистых гряд. Температура водных масс зимой — от 0 до 4 °С, летом — от 22 до 26 °С [Ломакин, Панов, Спиридонова, 2010], солёность варьирует от 14,4 ‰ на севере до 18 ‰ на юге, скорость течений — до 20 см/с [Завьялов и др., 2022]. Воды пролива относятся к трансформированным азово-черноморским, характеризуются значительным загрязнением тяжёлыми металлами и пестицидами [Ломакин и др., 2020], в основном из-за стока рек и антропогенного влияния (перевалка грузов, судоходство, дноуглубительные работы, дампинг). Концентрация большинства загрязнителей значительно превышает ПДК, а насыщенность поверхностных вод метаном больше равновесных с атмосферным воздухом значений в среднем в 6–13 раз [Завьялов и др., 2022].

Отбор и обработка проб. Пробы шаров из кладофоры собраны в зоне их массового выброса на пляже пос. Жуковка (N45.373063°, E36.628435°), на участке площадью 255 м², 19 сентября и 4 октября 2025 г. В центральной, южной и северной частях участка закладывали три перпендикулярные к береговой линии трансекты протяжённостью 25 м, на каждой из которых отбирали по четыре учётные площадки размером 25 × 25 см. Всего было собрано и обработано 12 количественных проб и 684 экз. шаров. В лабораторных условиях проводили анализ их видового состава, определяли форму, морфометрические параметры (диаметр, длина, ширина (мм)) и воздушно-сухую массу (мг).

Для выявления других участков, на которые могли быть выброшены шары, еженедельно с 26 сентября до 30 октября 2025 г. проводили маршрутно-полевые обследования береговой зоны Керченского полуострова от мыса Хрони на севере до мыса Камыш-Бурун на юге.

Для идентификации макроводорослей использовали методы световой микроскопии (увеличение ×40; ×400), определители и монографические работы [Зинова, 1967; Hoek, 1963], названия видов указаны с учётом номенклатурных изменений [Guiry M., Guiry G.]. Микрофотографии шаров выполнены на СЭМ Hitachi SU 3500 (Япония) в лаборатории микроскопии ФИЦ ИнБЮМ (руководитель В. Н. Лишаев).

Результаты и обсуждение

Массовое скопление шаров на западном берегу Керченского пролива, у пос. Жуковка, относится к редкому природному явлению для Азово-Черноморского бассейна и впервые зафиксировано у Крымского полуострова. Основным видом, формирующим шары (рис. 1), являлась зелёная водоросль *Cladophora liniformis* Kützinger, линейные размеры клеток и структура таллома которой оказались сопоставимыми с диагностическими признаками, описанными для прикреплённой и неприкреплённой форм этого вида [Зинова, 1967; Афанасьев, Сушкова, Камнев, 2020].

Диаметр основных ветвей *C. liniformis* варьировал от 40 до 130 ($73,78 \pm 18,54$) мкм, апикальных — от 20 до 40 ($30,47 \pm 5,92$) мкм, ширина стенки клеток в средней части таллома — от 2,5 до 12,5 ($5,77 \pm 2,18$) мкм.

Шары *C. liniformis* встречались в трёх формах — сферической, овальной (или яйцевидной) и палочковидной, их доля составляла 86,8; 4,4 и 8,8 % общего количества соответственно. Все формы имели полость внутри (рис. 2А, 2Б), в их составе обнаружены части талломов некоторых видов макроводорослей, беспозвоночных животных, раковины моллюсков. На поверхности талломов *C. liniformis* зафиксировано обилие диатомовых водорослей рода *Cocconeis* (рис. 2В, 2Г).

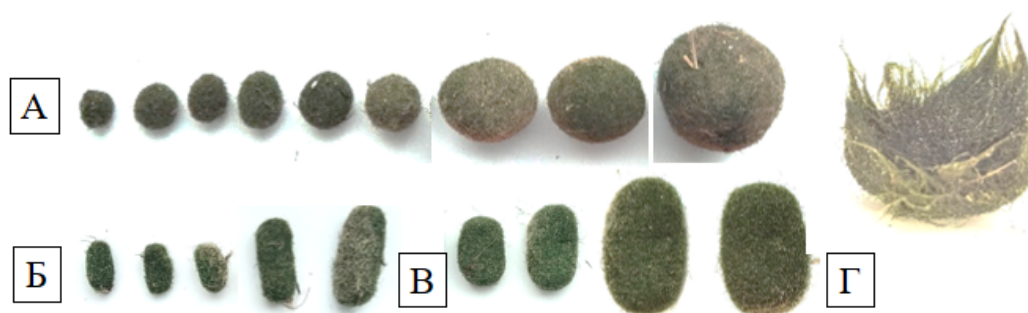


Рис. 1. Формы шаров зелёной водоросли *Cladophora liniformis* в береговой зоне Керченского п-ова (пос. Жуковка, 19.09.2025 г.): А — сферическая, Б — палочковидная, В — овальная, Г — полость внутри шара

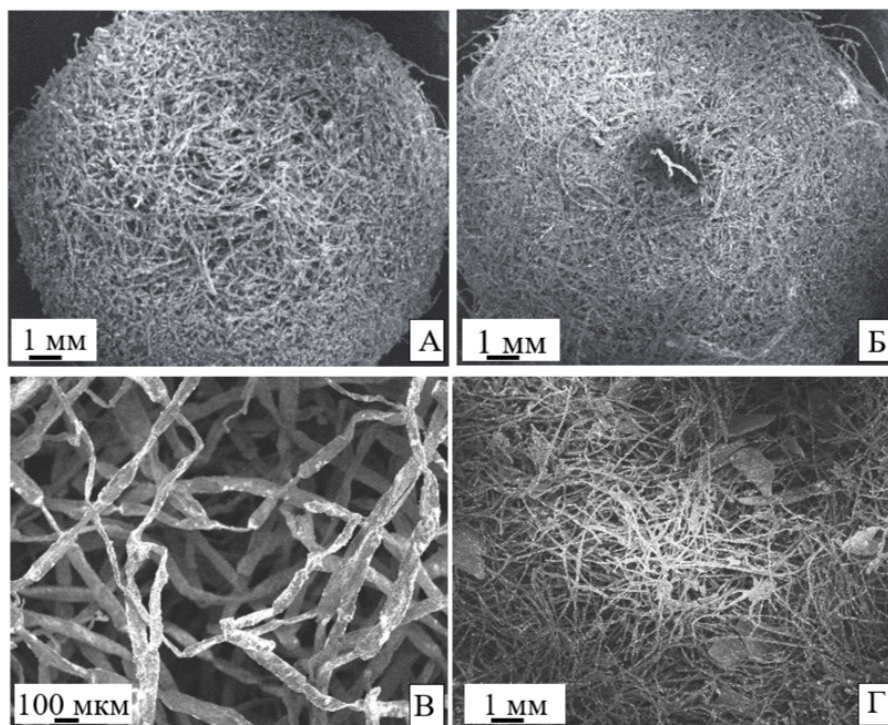


Рис. 2. Структура шаров *Cladophora liniformis* (пос. Жуковка, 19.09.2025 г.): А — шаровидная форма, Б — полость шара, В — ветвление таллома, Г — вкрапления раковин моллюсков и других гидробионтов

Количество шаров на трансектах варьировало от 14 до 223 ($53,8 \pm 17,8$) экз. на учётную площадку $S = 625 \text{ см}^2$. На центральном участке, в зоне массового скопления, среднее количество шаров достигало ($112,5 \pm 74,9$) экз., по мере удаления от этой зоны оно снижалось до ($86,7 \pm 11,1$) и ($20,5 \pm 9,2$) экз. К октябрю 2025 г. большинство шаров было смыто в акваторию пролива после штормов, в начале ноября они встречались единично, в основном под слоем ракушечника и штормовых выбросов морских трав. За весь период наблюдений, с сентября по ноябрь 2025 г., шары из кладофоры не обнаружены на других участках западного берега Керченского пролива.

Линейные размеры и масса шаров значительно варьировали, диаметр осей у сферической формы составлял 3,0–35,16 ($21,68 \pm 4,001$) и 5,53–33,56 ($17,2 \pm 3,51$) мм, у овальной колебался от 12,15 до 30,45 ($22,17 \pm 4,51$) мм, у палочковидной — от 11,63 до 26,08 ($17,51 \pm 3,92$) мм. Воздушно-сухая масса шаров существенно различалась: у сферической формы она составляла 50–1340 ($390,0 \pm 0,32$) мг, у овальной — от 230 до 1150 ($610,0 \pm 0,26$) мг и у палочковидной — 40–1080 ($240,0 \pm 0,22$) мг. Максимальные значения массы у всех форм шаров были сопоставимыми.

Анализ данных о находках шаров кладофоры в других районах Азово-Черноморского бассейна показал, что они встречались только на аккумулятивных берегах и песчаных пляжах и в основном имели сферическую форму (рис. 3). Овальная и палочковидная формы, обнаруженные, помимо сферической формы, у пос. Жуковка, ранее отмечались у шаров из других видов макроводорослей в береговой зоне Средиземного моря и других районов Мирового океана [Ballantine, Aponte, Holmquist, 1994; Davis, Hein, Millgate, 1996; Petrocelli, Portacci, Cecere, 2009; Cooke et al., 2015; Rindi, 2014]. До настоящего времени факторы, влияющие на формирование различных форм шаров из морских макроводорослей, в том числе видов *Cladophora*, достоверно не известны. Можно предположить, что их образование зависит от морфоструктурных особенностей вида и абиотических факторов (скорость течения, турбулентность, рельеф, структура донных отложений и др.), при этом овальная и палочковидная формы являются переходными к сферической.



Рис. 3. Массовые скопления шаров *Cladophora* в береговой зоне Азово-Черноморского бассейна (2010–2025 гг.): А, Б — пос. Жуковка, шары *C. liniformis*; В, Г — Тендровская коса, шары *Cladophora* sp.; Д, Е — пос. Кирилловка, шары *Cladophora* sp.

Хотя скопления шаров из различных видов макроводорослей, преимущественно зелёных (реже — бурых и красных), в береговой зоне относятся к довольно редким природным явлениям, в последние десятилетия они фиксируются в разных районах Мирового океана. Так, на пляжах Испании и Австралии встречались шары из *Chaetomorpha linum* (O.F. Müller) Kützinger, на побережье США — из *Chaetomorpha picquotiana* Montagne ex Kützinger и *Pylaiella littoralis* (Linnaeus) Kjellman [Mathieson, Dawes, 2002; Cooke et al., 2015]. Показательно, что независимо от района линейные размеры шаров из макроводорослей и морских трав оказались сходными. Средний диаметр шаров *C. liniformis* у пос. Жуковка ($2,2 \pm 0,4$) см был сопоставим с экземплярами из *P. littoralis* у берегов Америки (около 2,8 см), так же как у *Ch. linum* и *Ch. picquotiana* — ($6,6 \pm 0,7$) и ($5,9 \pm 0,3$) см соответственно [Mathieson, Dawes, 2002; Cooke et al., 2015]. У плавающих шаров, обнаруженных в основном в прибрежной зоне, диапазон линейных размеров также сопоставим: в лагуне Струнян (Средиземное море) диаметр шаров *C. prolifera* варьировал от 1,9 до 4,8 см [Battelli, Leliaert, 2021], а в озере Сиваш у видов *Chaetomorpha* достигал 5 см [Бабич, Заика, 2011]. Более крупные шары диаметром свыше 10 см формировались из листьев, корней и корневищ морской травы *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile, массовые скопления которых описаны для береговой зоны многих районов Средиземного моря [Petrounias et al., 2023; Restaino et al., 2023].

Хотя данные о плотности скоплений шаров на 1 м^2 практически отсутствуют [Cooke et al., 2015], сравнительный анализ некоторых из них показал, что она существенно различается. Максимальная величина определена для шаров *C. liniformis* на берегу Керченского пролива — достигает 3568 экз., для шаров из *Ch. picquotiana* на побережье США она не превышала 223 экз. [Mathieson, Dawes, 2002], а из *C. prolifera* в лагуне Струнян — 975 экз. [Battelli, Leliaert, 2021]. Почти все находки шаров из однолетних видов зелёных водорослей приходились на летний и раннеосенний периоды, когда их фитомасса в прибрежных акваториях достигала максимальных значений. Однако данные о периодичности выбросов и длительности нахождения шаров в береговой зоне практически отсутствуют. Отмечалось, что после штормов большинство шаров смывается в прибрежные акватории, где их массовые скопления впоследствии не были обнаружены ни на дне, ни в толще воды [Bergeron, 2002]. Некоторые исследователи отмечали, что шары могут встречаться спорадически и в значительном количестве либо в течение длительного периода вообще отсутствовать [Mathieson, Dawes, 2002; Boedeker et al., 2010].

Помимо скоплений шаров *Cladophora* spp. и других макроводорослей в береговой зоне, они редко наблюдались в толще воды. Так, плавающие шары обнаружены у зелёных водорослей *Ch. linum*, *Valonia aegagropila* C. Agardh и *Lychaete echinus* (Biaioletto) M.J. Wynne, реже — из красных водорослей *Alsidium corallinum* C. Agardh и *Gracilaria bursa-pastoris* (S.G. Gmelin) P.C. Silva [Petrocelli, Portacci, Cecere, 2009]. В Чёрном море впервые плавающие шары из *Cladophora* sp. были зафиксированы в незначительном количестве в регионе Севастополя, в бухтах Песочная и Карантинная, на глубине до 2 м в августе 2025 г. (устное сообщение Т. В. Ревковой). Возможно, эти шары выносятся в прибрежные акватории регулярного опада «ветвей» многолетних бурых водорослей *Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze и *Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry, на которых они эпифитируют [Калугина-Гутник, 1975]. По данным Н. В. Морозовой-Водяницкой [Морозова-Водяницкая, 1959], впервые описавшей шаровидную форму у эпифитирующих видов кладофоры в Чёрном море, её диаметр может варьировать от 0,5 до 6 см, что сопоставимо с линейными размерами шаров из многих видов макроводорослей в разных районах Мирового океана [Mathieson, Dawes, 2002; Cooke et al., 2015]. Следует отметить, что кроме шаров неприкрепленная форма видов *Cladophora* может встречаться в толще воды в виде длинных вытянутых тяжей [Болтачев, Милячкова, 2004; Vadas, Beal, 1987], а у дна формировать придонные маты [Salovius, Kraufvelin, 2004; Prazukin et al., 2021; Prazukin et al., 2025].

Факторы, причины и условия, при которых образуются шары из морских и пресноводных макрофитов, недостаточно изучены [Hoek, 1963]. Считается, что они обусловлены в основном сочетанием видоспецифических особенностей растений, гидродинамических условий и структуры донных отложений [Boedeker, Immers, 2009]. У водорослей такими особенностями являются жёсткость таллома, обильное ветвление, быстрый рост в различных экологических условиях, ломкость ветвей и способность к фрагментации, что способствует их переплетению и скручиванию [Mathieson, Dawes, 2002]. К факторам среды, влияющим на формирование и выброс шаров на берег, большинство исследователей относят повышенную гидродинамику прибрежных акваторий, особенности берегового рельефа, в частности наличие узких ущелий или каньонов, где повышенная турбулентность способствует перекачиванию и уплотнению шаров [Hoek, 1984; Mathieson, Dawes, 2002; Togashi, Sasaki, Yoshimura, 2014; Cooke et al., 2015]. У пресноводных и морских видов *Cladophora* образование шаров правильной сферической формы связывают с наличием твёрдого субстрата [Chapman V., Chapman D., 1973; Mathieson, Dawes, 2002].

Влияние шаров из зелёных водорослей на биоценозы и прибрежные экосистемы Азово-Черноморского бассейна, как и вспышки развития видов *Cladophora* и *Ulva*, ещё предстоит изучить, поскольку вероятность последних в условиях повышенного загрязнения вод, эвтрофирования и глобальных климатических изменений будет возрастать. При ухудшении качества среды значительно повышается также риск появления новых и чужеродных видов во флоре макроводорослей Чёрного моря, что зафиксировано нами в последние десятилетия, когда количество видов *Cladophora* увеличилось вдвое (с 10 до 19), а доля порядков Cladophorales, Ulvales и Ulotrichales, к которым они относятся, достигла 82,6 % общего разнообразия зелёных водорослей [Мильчакова, 2003]. Известно, что многие представители этих порядков встречаются как в прикрепленной, так и неприкрепленной форме, могут формировать обширные придонные скопления или свободноплавающие в толще воды, оказывать негативное влияние на гидробионты и водные биологические ресурсы. Следует отметить, что увеличение количества видов Chlorophyta и вспышки их развития, обусловленные эврибионтностью и высоким адаптивным потенциалом, наблюдаются во многих районах Мирового океана, это представляет значительную экологическую угрозу для прибрежных экосистем [Short, Neckles, 1999; Merceron et al., 2007; Zulkifly et al., 2013; Zhao et al., 2019].

Заключение

Впервые для прибрежной зоны Крымского полуострова описано массовое скопление шаров из зелёной водоросли *Cladophora liniformis*, обнаруженное на западном берегу Керченского пролива в сентябре 2025 г. Показано, что линейные размеры шаров кладофоры сопоставимы с таковыми у шаров других видов зелёных водорослей, а плотность скоплений значительно выше. Факторы и причины массового образования шаров кладофоры и их выброса на берег пока неизвестны, вероятно, они связаны со вспышками развития зелёных водорослей в разных районах Азово-Черноморского бассейна, особенно на участках с высоким эвтрофированием.

Для изучения влияния массовых скоплений шаров и других форм неприкрепленных водорослей на состояние популяций и биоценозов ключевых и охраняемых видов приморской зоны необходимо ведение их регулярного мониторинга, особенно в акваториях заповедных объектов российского сектора Азово-Черноморского бассейна, что позволит выработать меры по сохранению биоразнообразия и устойчивому функционированию всех звеньев прибрежных экосистем.

Благодарности. Приносим благодарность за предоставленную информацию коллегам — А. С. Терентьеву (отдел «Керченский» Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АЗНИИРХ»)), Д. Д. Королесовой и Т. Н. Ревковой (ФИЦ ИнБЮМ).

Список литературы

1. Алдина М. На берег Керчи шторм вынес загадочные зелёные шары // Аргументы и факты. Крым. – 2025. – URL: <https://krym.aif.ru/society/na-bereg-kerchi-shtorm-vynes-zagadochnye-zelenye-shary>. – Дата публ.: 17.09.2025.
2. Афанасьев Д. Ф., Суикова Е. Г., Камнев А. Н. Морские и солоноватоводные виды водорослей семейства *Cladophoraceae* и рода *Aegagropila* Понто-Каспийского бассейна : полевой определитель. – Москва [и др.] : Перо, 2020. – 76 с.
3. Бабич Е. И., Заика В. Е. Фауна водорослевых шаров юго-восточного Сиваша // Гидробиологический журнал. – 2011. – Т. 47, № 5. – С. 111–114. – URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/9948>
4. Болтачев А. Р., Мильчакова Н. А. О причинах и возможных последствиях вспышки обилия зелёной водоросли кладофоры (*Cladophora sericea*) на шельфе юго-западного Крыма весной 2004 г. // Рыбное хозяйство Украины. – 2004. – № 5. – С. 4–7. – <https://elibrary.ru/znjrqt>
5. Болтачева Н. А., Мильчакова Н. А., Миронова Н. В. Изменения бентоса в районе Каламитского залива под влиянием эвтрофирования // Экология моря / НАН Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. – Севастополь : ЭКОСИ – Гидрофизика, 1999. – Т. 49. – С. 5–10. – URL: <https://repository.marine-research.ru/handle/299011/4222>
6. Вдоль побережья Азовского моря заметили необычную шаровидную водоросль // Рубрика. – 2021. – URL: <https://rubryka.com/ru/2021/11/11/kladofora-azovskoe-more/>. – Дата публ.: 11.11.2021.
7. Виноградова К. Л. Ульвовые водоросли (Chlorophyta) морей СССР. – Ленинград : Наука, 1974. – 165 с.
8. Завьялов П. О., Завьялов И. Б., Ижицкий А. С., Ижицкая Е. С., Коновалов Б. В., Кременецкий В. В., Немировская И. А., Часовников В. К. Оценка загрязнения Керченского пролива и прилегающей акватории Чёрного моря по данным натурных измерений 2019–2020 гг. // Океанология. – 2022. – Т. 62, № 2. – С. 194–203. – <https://doi.org/10.31857/S0030157422020174>
9. Зинова А. Д. Определитель зелёных, бурых и красных водорослей южных морей СССР. – Москва ; Ленинград : Наука, 1967. – 400 с.
10. Калугина-Гутник А. А. Фитобентос Чёрного моря. – Киев : Наук. думка, 1975. – 246 с.
11. Ломакин П. Д., Жукайло С. С., Панов Б. Н., Чепыженко А. И., Чепыженко А. А. Основные объекты антропогенного воздействия на водную среду Керченского пролива по данным многолетних гидрооптических и гидрохимических исследований // Системы контроля окружающей среды. – 2020. – № 4. – С. 75–85. – <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2020-4-75-85>
12. Ломакин П. Д., Панов Д. Б., Спиридонова Е. О. Особенности межгодовых и сезонных вариаций гидрометеорологических условий в районе Керченского пролива за два последних десятилетия // Морской гидрофизический журнал. – 2010. – № 2. – С. 36–48. – <https://elibrary.ru/tmjwkr>
13. Мильчакова Н. А. Систематический состав и распространение зелёных водорослей-макрофитов (Chlorophyceae Wille s.l.) Чёрного моря // Альгология. – 2003. – Т. 13, № 1. – С. 70–82. – <https://elibrary.ru/znoohv>
14. Морозова-Водяницкая Н. В. Шаровидная кладофора в Чёрном море // Ботанические материалы Отдела споровых растений / АН СССР, Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова. – Ленинград : Изд-во АН СССР, 1959. – Т. 12. – С. 132–134.
15. Морские охраняемые акватории Крыма / Рос. акад. наук, Ин-т мор. биол. исслед. им. А. О. Ковалевского ; под ред. Н. А. Мильчаковой. – Симферополь : Н. Оріанда, 2015. – 312 с.

16. Bach S. D., Josselyn M. N. Mass blooms of the alga *Cladophora* in Bermuda // Marine Pollution Bulletin. – 1978. – Vol. 9, iss. 2. – P. 34–37. – [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(78\)90529-5](https://doi.org/10.1016/0025-326X(78)90529-5)
17. Ballantine D. L., Aponte N. E., Holmquist J. G. Multi-species algal balls and potentially imprisoned fauna: an unusual benthic assemblage // Aquatic Botany. – 1994. – Vol. 48, iss. 2. – P. 167–174. – [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(94\)90083-3](https://doi.org/10.1016/0304-3770(94)90083-3)
18. Battelli C., Leliaert F. First report of an aegagropilous form of *Cladophora prolifera* (Cladophorales, Chlorophyta) from the lagoon of Strunjan (Gulf of Trieste, northern Adriatic) // Mediterranean Marine Science. – 2021. – Vol. 22, iss. 3. – P. 496–504. – <https://doi.org/10.12681/mms.26997>
19. Bergeron E. The green globes. They came from the bottom of the sea // Popular Science. – 2002. – Vol. 261, iss. 3. – P. 31.
20. Boedeker C. The attached form of the endangered freshwater alga *Aegagropila linnaei* Kützinger (Chlorophyta) is found in the Zuideindigerwiede, The Netherlands // Aquatic Botany. – 2010. – Vol. 92, iss. 1. – P. 75–77. – <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2009.10.006>
21. Boedeker C., Eggert A., Immers A., Wakana I. Biogeography of *Aegagropila linnaei* (Cladophorophyceae, Chlorophyta): a widespread freshwater alga with low effective dispersal potential shows a glacial imprint in its distribution // Journal of Biogeography. – 2010. – Vol. 37, iss. 8. – P. 1491–1503. – <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02309.x>
22. Boedeker C., Immers A. No more lake balls (*Aegagropila linnaei* Kützinger, Cladophorophyceae, Chlorophyta) in the Netherlands? // Aquatic Ecology. – 2009. – Vol. 43, iss. 4. – P. 891–902. – <https://doi.org/10.1007/s10452-009-9231-1>
23. Chapman V. J., Chapman D. J. The Algae. – 2nd ed. – London : Palgrave Macmillan, 1973. – 511 p.
24. Cooke J., Lanfear R., Downing A., Gillings M. R., Poore A. G., Goodwin I. D., Waldron L. S., Philips A., Metti Y., Bulbert M. W. The unusual occurrence of green algal balls of *Chaetomorpha linum* on a beach in Sydney, Australia // Botanica Marina. – 2015. – Vol. 58, iss. 5. – P. 401–407. – <https://doi.org/10.1515/bot-2015-0061>
25. Davis J. S., Hein M. K., Millgate J. E. *Cladophora* (green algae) balls and *Phormidium* (blue-green algae) mounds from permanently hypersaline water // Florida Scientist. – 1996. – Vol. 59. – P. 169–173.
26. Guiry M. D., Frödén P. *Aegagropila brownii* (Dillwyn) Kützinger is the correct name for *Aegagropila linnaei* Kützinger, the type of *Aegagropila* Kützinger (Pithophoraceae, Chlorophyta), widely known as «Marimo» or «Cladophora Balls» // Notulae Algarum. – 2023. – No. 293.
27. Guiry M. D., Guiry G. M. 2026. AlgaeBase. World-wide electronic publication, University of Galway. – URL: <https://www.algaebase.org> (accessed: 19.05.2026).
28. Hoek C. van den. Revision of the European species of *Cladophora*. – Leiden, Netherland : Brill Acad. Publ., 1963. – 248 p.
29. Hoek C. van den. World-wide latitudinal and longitudinal seaweed distribution patterns and their possible causes, as illustrated by the distribution of *Rhodophytan genera* // Helgoländer Meeresuntersuchungen. – 1984. – Vol. 38, iss. 2. – P. 227–257. – <https://doi.org/10.1007/bf01997483>
30. Kurogi M. E. Lake ball «marimo» in Lake Akan // Japanese Journal of Phycology. – 1980. – Vol. 28. – P. 168–169.
31. Marin O. Long term quantitative variation of the main opportunistic macroalgae species along the Romanian Black Sea coast // Cercetări Marine – Recherches Marines. – 2022. – Vol. 52, iss. 1. – P. 78–90. – <https://doi.org/10.55268/CM.2022.52.78>
32. Mathieson A. C., Dawes C. J. *Chaetomorpha* balls foul New Hampshire, USA beaches // Algae. – 2002. – Vol. 17, iss. 4. – P. 283–292. – <https://doi.org/10.4490/ALGAE.2002.17.4.283>

33. Merceron M., Antoine V., Auby I., Morand P. In situ growth potential of the subtidal part of green tide forming *Ulva* spp. stocks // Science of the Total Environment. – 2007. – Vol. 384, iss. 1/3. – P. 293–305. – <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.05.007>
34. Norton T. A., Mathieson A. C. The biology of unattached seaweeds // Progress in phycological research / eds: F. E. Round, D. J. Chapman. – Amsterdam [et al.] : Elsevier Biomed. Press, 1983. – P. 333–386. – (Progress in phycological research ; vol. 2).
35. Petrocelli A., Portacci G., Cecere E. Ball-like forms new for some macroalgae common in coastal basins // Biologia Marina Mediterranea. – 2009. – Vol. 16, iss. 1. – P. 290–291.
36. Petrounias P., Giannakopoulou P. P., Rogkala A., Antoniou N., Koutsovitis P., Zygouri E., Krassakis P., Islam I., Koukouzas N. *Posidonia oceanica* balls (Egagropili) from Kefalonia Island evaluated as alternative biomass source for green energy // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11, iss. 4. – P. 749. – <https://doi.org/10.3390/jmse11040749>
37. Prazukin A., Shadrin N., Balycheva D., Firsov Yu., Lee R., Anufrieva E. *Cladophora* spp. (Chlorophyta) modulate environment and create a habitat for microalgae in hypersaline waters // European Journal of Phycology. – 2021. – Vol. 56, iss. 3. – P. 231–243. – <https://doi.org/10.1080/09670262.2020.1814423>
38. Prazukin A., Shadrin N., Latushkin A., Anufrieva E. Mats of green filamentous alga *Cladophora* in the hypersaline Bay Sivash: distribution, structure, environment-forming role and resource potential // Regional Studies in Marine Science. – 2025. – Vol. 82. – Art. 104031. – <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104031>
39. Restaino O. F., Giosafatto C. V. L., Mirpoor S. F., Cammarota M., Hejazi S., Mariniello L., Schiraldi C., Porta R. Sustainable exploitation of *Posidonia oceanica* sea balls (egagropili): a Review // International Journal of Molecular Sciences. – 2023. – Vol. 24, iss. 8. – Art. 7301. – <https://doi.org/10.3390/ijms24087301>
40. Rindi F. Bringing order to little green balls: new insights from the Chlorophycean order Sphaeropleales // Journal of Phycology. – 2014. – Vol. 50, iss. 1. – P. 11–13. – <https://doi.org/10.1111/jpy.12143>
41. Salovius S., Kraufvelin P. The filamentous green alga *Cladophora glomerata* as a habitat for littoral macrofauna in the northern Baltic Sea // Ophelia. – 2004. – Vol. 58, iss. 2. – P. 65–78. – <https://doi.org/10.1080/00785326.2004.10410214>
42. Short F. T., Neckles H. A. The effects of global climate change on seagrasses // Aquatic Botany. – 1999. – Vol. 63, iss. 3/4. – P. 169–196. – [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(98\)00117-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(98)00117-X)
43. Togashi T., Sasaki H., Yoshimura J. A geometrical approach explains Lake Ball (Marimo) formations in the green alga, *Aegagropila linnaei* // Scientific Reports. – 2014. – Vol. 4. – Art. 3761. – <https://doi.org/10.1038/srep03761>
44. Tuji A., Niiyama Y. First record of algal ball-forming *Aegagropilopsis clavuligera* (Cladophorales, Ulvophyceae) from Japan // Bulletin of the National Museum of Nature and Science. Series B, Botany. – 2022. – Vol. 48, iss. 4. – P. 109–116. – https://doi.org/10.50826/bnmnsbot.48.4_109
45. Vadas R. L., Beal B. Green algal ropes: a novel estuarine phenomenon in the Gulf of Maine // Estuaries. – 1987. – Vol. 10, iss. 2. – P. 171–176.
46. Vershinin A., Kamnev A. Biogeography and impact of harmful algae in russian european coastal waters. Harmful algae blooms 2000 // Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. – Paris : UNESCO, 2001. – P. 112–115.
47. Volkova E. A. The first finding of aegagropilious, or algal balls, in the oldest freshwater Lake Baikal // Limnology and Freshwater Biology. – 2022. – № 1. – P. 1205–1208. – <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-1-1205>

48. Zhao X., Zhong Yi, Zhang H., Qu T., Jiang Y., Tang X., Wang Y. Cooperation between photosynthetic and antioxidant systems: an important factor in the adaptation of *Ulva prolifera* to abiotic factors on the sea surface // *Frontiers in Plant Science*. – 2019. – Vol. 10. – Art. 648. – <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00648>
49. Zulkifly S. B., Graham J. M., Young E. B., Mayer R. J., Piotrowski M. J., Smith I., Graham L. E. The genus *Cladophora* Kützting (Ulvophyceae) as a globally distributed ecological engineer // *Journal of Phycology*. – 2013. – Vol. 49, iss. 1. – P. 1–17. – <https://doi.org/10.1111/jpy.12025>

ON MASS FINDINGS OF GREEN ALGA *CLADOPHORA LINIFORMIS* KÜTZING BALLS IN THE COASTAL ZONE OF THE KERCH PENINSULA (CRIMEA, BLACK SEA)

Milchakova N. A., Kandaurova D. A., Chernysheva E. B.

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

e-mail: nmilchakova@ibss-ras.ru

Abstract: For the first time for the Black Sea, the ecological and biomorphological characteristics of mass aggregations of balls from the green algae *Cladophora liniformis* Kützting, found in the beach area of the village, are presented Zhukovka (Crimea, Kerch Peninsula) in September 2025, it was shown that the total area of distribution of balloons was 255 m², their largest number was recorded near the coastline on the sandy-shell biotope. The density and size-mass parameters of the balls were determined on three transects laid perpendicular to the shore from the water's edge to the boundaries of their distribution. On each transect, quantitative samples of the balls were taken using a 25 × 25 cm counting frame in four replicates. It was found that *C. liniformis* balls occurred in three forms — spherical, oval (egg-shaped), and rod-shaped, which accounted for 86.8; 4.4, and 8.8 % of their total number, respectively. The density of balls varied from 14 to 223 specimens. (per account frame S = 625 cm²), their diameter ranged from 3 to 35 mm (20.29 ± 0.21) mm, and the average air-dry mass of the ball was (380.0 ± 0.013) mg. A comparative analysis of the distribution of balls made from different types of algae in other areas of the world's oceans revealed significant differences in density, while the size parameters were similar or comparable. The article discusses the causes of the formation of balls and other mass accumulations of algae near the coast of the Crimean Peninsula and other areas of the Azov-Black Sea basin, as well as their possible impact on biocenoses and coastal ecosystems.

Keywords: macroalgae, *Cladophora liniformis*, spherical shape, biomorphological parameters, density, coastal zone, Kerch Strait

Сведения об авторах

Мильчакова Наталия Афанасьевна	руководитель лаборатории фиторесурсов ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: nmilchakova@ibss-ras.ru
Кандаурова Дарья Андреевна	младший научный сотрудник лаборатории фиторесурсов ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: dkandaurova@ibss-ras.ru
Чернышева Елена Борисовна	младший научный сотрудник лаборатории фиторесурсов ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: chernysheva_e@ibss-ras.ru

Поступила в редакцию 11.05.2026

Принята к публикации 11.06.2026

**THE ROLE OF SPATIAL RESOLUTION IN VEGETATION INFORMATION
EXTRACTION: A COMPARISON OF JILIN-1 AND SENTINEL-2 SATELLITE DATA
IN THE GRODNENSKAYA PUSHCHA BIOSPHERE RESERVE (BELARUS)**

Zhao B.¹, Jiang C.²

¹*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus,
e-mail: geozhao@outlook.com*

²*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus,
e-mail: sweeneilj@gmail.com*

Abstract: High-resolution satellite remote sensing data provide new opportunities for analysing vegetation structure in forest ecosystems with complex spatial organization. This study examines the role of spatial resolution in vegetation information extraction using multispectral satellite imagery. The research was conducted in the potential biosphere reserve «Grodnenskaya Pushcha» in the Republic of Belarus, a protected area characterized by high forest cover and pronounced spatial heterogeneity of vegetation. Multispectral satellite images from Jilin-1 with a spatial resolution of 5 m and Sentinel-2 with spatial resolutions of 10–20 m were used for the analysis and were acquired during the peak vegetation growth period. Vegetation condition was assessed using the red-edge vegetation index NDVI705. The analysis included a comparison of spectral profiles, statistical characteristics of the NDVI705 index, and results of unsupervised clustering (K-means) obtained for identical regions of interest. The results showed that both satellite datasets exhibit similar spectral patterns in the red-edge and near-infrared regions of the spectrum, while differing in the level of spatial detail. The higher spatial resolution of Jilin-1 imagery enables the detection of internal heterogeneity of forest cover, including small forest openings, narrow riparian zones and fragmented vegetation patches. Sentinel-2 data provide a more generalized representation of landscape structure but remain effective for analysis at the regional scale. The results indicate that spatial resolution is an important factor in vegetation analysis within forest natural complexes and that the combined use of satellite data with different spatial characteristics can improve ecological monitoring in protected areas.

Keywords: NDVI705, red-edge spectral region, multispectral satellite imagery, forest ecosystems, remote sensing

Introduction

Vegetation plays a fundamental role in terrestrial ecosystems by regulating energy exchange, biogeochemical cycles and habitat diversity, particularly within protected natural areas where vegetation structure directly influences biodiversity conservation and ecosystem stability. Quantitative assessment of vegetation cover and condition is therefore an essential task in ecological monitoring and environmental management. Satellite remote sensing has become one of the most effective approaches for large-scale vegetation assessment due to its ability to provide spatially consistent observations over extensive areas.

Among the various remote sensing indicators, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and its modified forms have been widely applied for estimating vegetation cover and canopy characteristics because of their sensitivity to chlorophyll content and vegetation structure. Early studies demonstrated that NDVI-based indices provide reliable estimations of vegetation fraction across different land-cover types and therefore form the methodological basis for large-scale vegetation monitoring using satellite imagery [Jiang et al., 2006].

In forest ecosystems characterized by dense canopy cover, however, conventional broadband NDVI often suffers from saturation effects that limit its ability to detect subtle variations in vegetation condition. To address this limitation, vegetation indices based on the red-edge spectral region have been proposed. One of the most widely used indices is NDVI705, which utilizes spectral bands located near the red-edge region that are highly sensitive to chlorophyll concentration and canopy structure. Previous studies have shown that NDVI705 improves the detection of vegetation variability in dense forest canopies and provides enhanced sensitivity to physiological changes in forest ecosystems [Gitelson, Merzlyak, 1996; Sims, Gamon, 2002; Delegido et al., 2011].

The increasing availability of multispectral satellite data has significantly expanded the possibilities for vegetation monitoring. Medium-resolution imagery from the Sentinel-2 satellite mission has become a widely used data source for ecological studies due to its frequent revisit cycle and the availability of red-edge spectral bands. Sentinel-2 data have been successfully applied to vegetation mapping and ecosystem monitoring in forests, wetlands and heterogeneous landscapes [Korhonen et al., 2017; Lastovicka et al., 2020; Bhatnagar et al., 2020; Mohammadpour, Viegas D., Viegas C., 2022].

However, the effectiveness of vegetation indices derived from satellite imagery is strongly influenced by spatial resolution, particularly in landscapes characterized by complex spatial patterns. In forest-dominated ecosystems, medium-resolution pixels often integrate multiple surface components such as tree canopy, understory vegetation, forest roads and canopy gaps within a single pixel. This mixed-pixel effect may lead to smoothing of spectral information, reduced sensitivity to forest edges and riparian zones, and suppression of small-scale spatial heterogeneity within forest landscapes. Previous comparative studies using sensors with different spatial resolutions have demonstrated that higher-resolution imagery improves the detection of fragmented vegetation patches and fine-scale ecological structures [Zhu et al., 2016; Zhao et al., 2020].

In recent years, the Jilin-1 satellite constellation has provided high-resolution multispectral imagery with spatial resolutions of approximately 5 m, offering new opportunities for detailed ecological analysis. Compared with medium-resolution satellite data, the higher spatial resolution of Jilin-1 imagery may improve the detection of internal forest structure and fine-scale spatial heterogeneity. Technical documentation and regional datasets available for Belarus describe the spectral characteristics and acquisition conditions of Jilin-1 imagery and confirm its applicability for environmental studies in Eastern Europe [Jilin-1 ... Belarus (2020), 2023; Jilin-1 ... Belarus (2021–2023), 2023].

Despite these developments, systematic comparisons between Jilin-1 and Sentinel-2 imagery for vegetation monitoring in protected forest ecosystems remain limited. In particular, it remains insufficiently understood how differences in spatial resolution influence vegetation information extraction when red-edge vegetation indices are applied in structurally complex forest landscapes.

Against this background, the present study investigates how spatial resolution influences vegetation information extraction from multispectral satellite imagery in forest-dominated protected landscapes. The research is conducted in the Grodnenskaya Pushcha potential biosphere reserve [Respublikanskij zakaznik ...], a protected area of high ecological value in Belarus. By comparing NDVI705-based vegetation metrics derived from Jilin-1 and Sentinel-2 imagery acquired under different observation conditions, the study analyses differences in spectral characteristics, statistical properties of vegetation indices and spatial classification patterns. The results provide methodological insights into the use of multi-resolution satellite imagery for vegetation monitoring in protected forest ecosystems.

Materials and methods

The study was conducted within the Grodnenskaya Pushcha potential biosphere reserve located in the north-western part of the Grodno region of Belarus (Fig. 1). This protected area represents an important component of the regional ecological network and is characterized by high biodiversity and well-preserved natural landscapes. The reserve includes extensive forested territories dominated by pine, spruce, birch and mixed broadleaf stands, as well as wetlands, river valleys and small open areas. According to the functional concept of biosphere reserves, the territory is divided into core conservation zones, buffer zones and areas of regulated economic activity. Such zoning reflects different levels of environmental protection and land-use intensity and serves as a basis for biodiversity conservation, ecological monitoring and sustainable development of surrounding territories [Chervan', Dzhaio, Chen', 2024]. The spatial heterogeneity of forest ecosystems and the presence of transitional ecological zones make the Grodnenskaya Pushcha reserve a representative area for evaluating vegetation indices derived from satellite remote sensing.

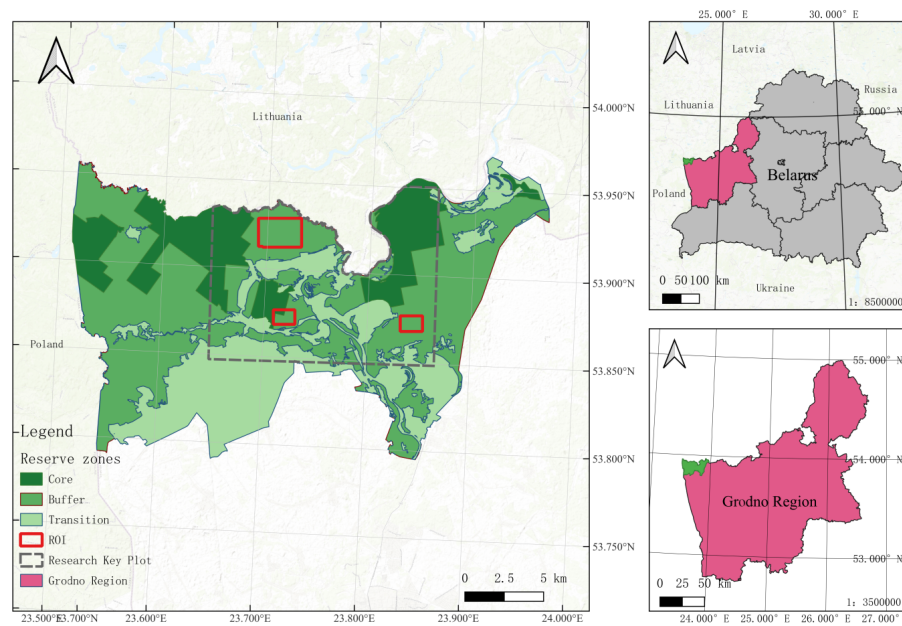


Fig. 1. Location of the study area and the selected regions of interest (ROI1–ROI3) within the Grodnenskaya Pushcha potential biosphere reserve, Republic of Belarus

The spatial distribution of the study area and the selected regions of interest are shown in Fig. 1.

Three regions of interest (ROI1–ROI3) were selected within forested parts of the study area for spectral comparison of satellite imagery. The selection was performed within the main functional zones of the biosphere reserve (core zone, buffer zone and transition zone) in order to represent different levels of ecological protection and landscape structure. Within each zone, representative forest patches were randomly selected while ensuring that the selected areas were dominated by forest vegetation and not influenced by large open areas or settlements. ROI1 and ROI2 are located within the buffer zone of the biosphere reserve and represent relatively homogeneous forest stands, while ROI3 is situated in a transition area between the core and buffer zones.

Spectral reflectance profiles derived from the selected regions of interest are presented in Fig. 2. The figure compares the spectral behaviour of Jilin-1 and Sentinel-2 imagery across comparable spectral regions using representative bands from the visible, red-edge and near-infrared parts of the spectrum. The curves represent mean spectral values extracted from the same regions of interest (ROI1–ROI3), allowing a direct comparison of spectral responses between the two satellite datasets. To ensure comparability between sensors, the spectral curves are plotted using the central wavelength of each band, while the corresponding spectral bandwidths were considered when selecting comparable spectral regions.

Multispectral satellite imagery from the Jilin-1 and Sentinel-2 platforms was used for the analysis. Sentinel-2 imagery was obtained from the European Space Agency (ESA) Copernicus Open Access Hub as Level-2A products providing bottom-of-atmosphere (BOA) surface reflectance values after atmospheric correction using the Sen2Cor processor. Jilin-1 multispectral data were accessed through the National Earth System Science Data Center of China (National Integrated Earth Observation Data Sharing Platform, <https://www.noda.ac.cn/>).

Jilin-1 multispectral imagery with a spatial resolution of 5 m was acquired over the study area on 21 July 2022 under near cloud-free conditions. Sentinel-2 multispectral imagery with spatial resolutions ranging from 10 to 20 m was obtained for 5 July 2022. In order to assess the influence of cloud cover on vegetation index performance, additional Sentinel-2 imagery from August 2020 was also analysed, representing both cloudy and cloud-free observation conditions.

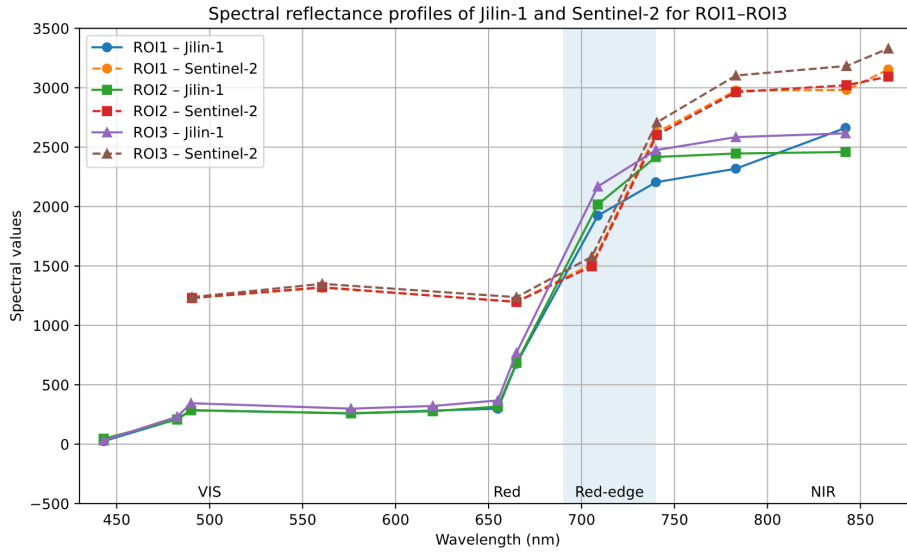


Fig. 2. Spectral reflectance profiles of Jilin-1 and Sentinel-2 imagery for three regions of interest (ROI1–ROI3). Curves are plotted using the central wavelength of each spectral band. The shaded area indicates the red-edge spectral region (690–740 nm), which is used for NDVI705 calculation. Comparable spectral regions were selected to allow cross-sensor comparison

To ensure spatial comparability between the two satellite datasets, all images were projected to a common coordinate reference system and aligned to a common spatial grid. Sentinel-2 bands with 20 m spatial resolution were resampled to the spatial grid used for the analysis using bilinear interpolation in QGIS. Image preprocessing, visualization and spatial analysis were performed using ArcGIS Pro 3.0, ENVI 5.6 and QGIS 3.42 software environments.

Vegetation condition was assessed using the red-edge Normalized Difference Vegetation Index (NDVI705), which has been shown to provide higher sensitivity to chlorophyll content and canopy structure in dense vegetation compared with the conventional broadband NDVI. The index was calculated according to the following equation:

$$NDVI_{705} = \frac{R_{750} - R_{705}}{R_{750} + R_{705}}, \quad (1)$$

where R_{750} represents reflectance values in the near-infrared red-edge band centred at approximately 750 nm, and R_{705} represents reflectance values in the red-edge band centred at approximately 705 nm.

For Jilin-1 imagery these wavelengths correspond to bands B11 and B10 respectively, while for Sentinel-2 imagery they correspond to bands B6 and B5. Although the conventional NDVI derived from Sentinel-2 bands B4 and B8 provides a spatial resolution of 10 m, the present study focuses on vegetation indices based on red-edge spectral bands. Red-edge indices such as NDVI705 reduce saturation effects in dense forest canopies and provide improved sensitivity to chlorophyll concentration. Therefore, spectrally comparable red-edge bands were selected for both satellite datasets in order to ensure consistent vegetation index calculation.

Prior to vegetation index calculation, satellite images were preprocessed to remove invalid pixels and anomalous reflectance values. NDVI705 values were constrained to the 1st–99th percentile range of the data distribution in order to reduce the influence of noise and outliers associated with atmospheric effects or residual cloud contamination.

Statistical analysis of NDVI705 values was subsequently performed to compare vegetation index distributions derived from the two satellite datasets. Mean values, standard deviations and range statistics were calculated for the analysed scenes. In addition, a two-sample t-test was applied to evaluate whether the differences in mean NDVI705 values between the two satellite datasets were statistically significant.

In addition to pixel-based statistical analysis, unsupervised classification was performed using the K-means clustering algorithm implemented in ENVI 5.6. Prior to classification, all images were spatially masked to the study area using a vector boundary (Research Key Plot) in order to exclude external background and NoData pixels from the analysis. This step ensured that only valid pixels within the study area were included in the clustering process. To ensure comparability between datasets, a consistent spectral subset was defined. For Sentinel-2 imagery, four surface reflectance bands (B2, B3, B4 and B8), representing the visible and near-infrared regions, were selected. For Jilin-1 imagery, six multispectral bands with a spatial resolution of 5 m were used to provide comparable spectral coverage. The K-means algorithm was applied with 10 clusters, a maximum of 20 iterations and a convergence threshold of 5 %. These parameters were chosen to ensure stable clustering results while maintaining a comparable level of classification detail between datasets. Due to the unsupervised nature of the K-means algorithm, the resulting clusters represent spectral groupings rather than predefined land-cover classes. The classification results were therefore used to analyse spatial clustering patterns and structural differences between Jilin-1 and Sentinel-2 imagery, with particular attention to fragmentation, spatial continuity and the representation of heterogeneous landscape elements.

The overall research workflow applied in this study is summarized in Fig. 3. The workflow includes satellite data acquisition, image preprocessing, vegetation index calculation, statistical analysis and unsupervised classification for comparative evaluation of vegetation patterns derived from the two satellite datasets.

Results and discussion

The NDVI705 values derived from Jilin-1 and Sentinel-2 imagery demonstrated generally consistent spatial patterns of vegetation distribution across the Grodnenskaya Pushcha potential biosphere reserve. In forest-dominated areas, both datasets captured similar spectral trends, indicating that the red-edge vegetation index effectively reflects the overall structure and condition of forest vegetation. At the same time, certain differences between the two datasets were observed, particularly in the visible spectral range, whereas discrepancies in the red-edge and near-infrared regions were comparatively small. This pattern suggests that the observed differences in vegetation index values may be partially associated with differences in spatial resolution and pixel composition rather than fundamental differences in spectral sensitivity between the two satellite sensors.

The similarity and divergence of spectral characteristics for representative areas are illustrated in Fig. 2, which presents spectral profiles of Jilin-1 and Sentinel-2 imagery across comparable wavelength ranges for the selected regions of interest (ROI1–ROI3). In all analysed areas, both datasets demonstrate a typical vegetation spectral response characterized by relatively low reflectance in the visible region and a pronounced increase toward the near-infrared wavelengths. However, the Jilin-1 data show slightly greater variability in reflectance values within the visible spectral bands. This variability may be associated with the higher spatial resolution of the Jilin-1 sensor (5 m), which allows the detection of fine-scale heterogeneity within forest canopies, forest edges and small landscape elements that may be averaged within the larger pixels of medium-resolution imagery.

Under near cloud-free conditions, the statistical characteristics of NDVI705 derived from the two satellite datasets were generally comparable. The calculated statistical parameters for the analysed scenes are presented in Table 1.

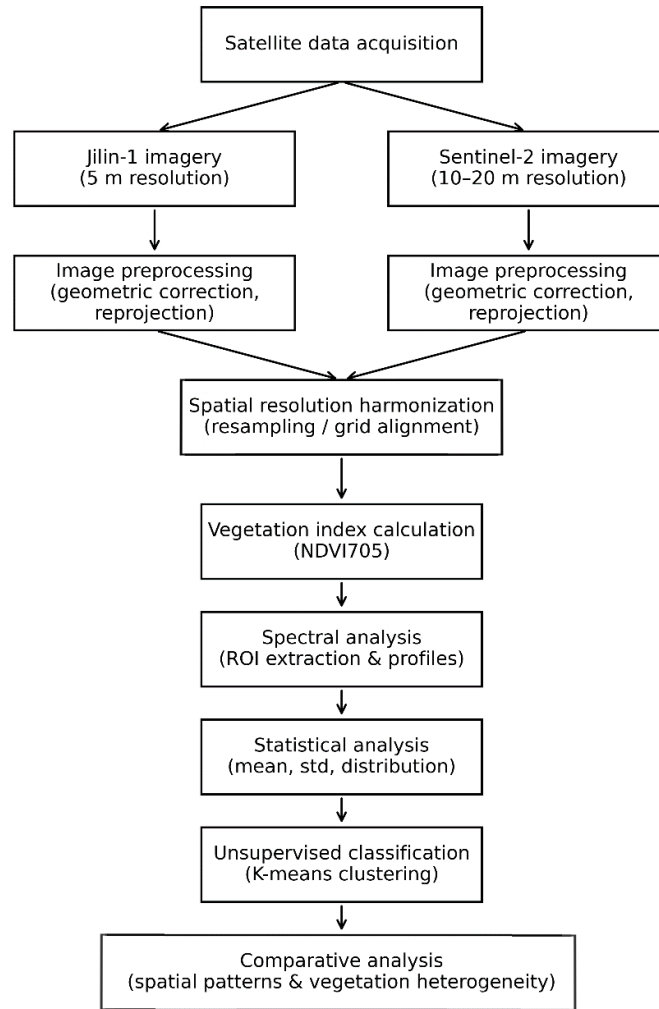


Fig. 3. Workflow of vegetation information extraction and comparative analysis between Jilin-1 and Sentinel-2 datasets

Both datasets exhibited relatively low standard deviation values, indicating stable extraction of vegetation signals across the study area. At the same time, the mean NDVI705 values derived from Jilin-1 imagery were consistently higher than those obtained from Sentinel-2. A statistical comparison using a two-sample t-test confirmed that the differences in mean NDVI705 values between the two satellite datasets were statistically significant. These differences may be related to variations in spatial resolution and the resulting pixel composition in dense forest environments.

In medium-resolution imagery such as Sentinel-2 (10–20 m), individual pixels frequently contain mixtures of several surface components, including forest canopy, understory vegetation, small canopy gaps, forest roads and other landscape elements. This mixed-pixel effect reduces the dominance of the vegetation signal within each pixel and can lead to lower average NDVI705 values. In contrast, the higher spatial resolution of Jilin-1 imagery (5 m) reduces the degree of pixel mixing and allows individual pixels to more accurately represent dense forest canopy areas. As a result, vegetation signals may be less diluted by non-vegetated components, which can lead to higher NDVI705 values in forest-dominated landscapes.

Table 1

Statistical characteristics of NDVI705 values derived from Jilin-1 and Sentinel-2 imagery under different cloud conditions

No.	Data	Mean	Std.	Max.	Min.	Range
1	Jilin-1	0.773	0.094	0.921	0.122	0.799
2	Sentinel-2	0.469	0.095	0.712	-0.023	0.735
3	Sentinel-2 (Aug.)	0.448	0.098	0.706	-0.056	0.762
4	Jilin-1 (Cloud)	0.727	0.208	1.000	-0.295	1.295
5	Sentinel-2 (Cloud)	0.717	0.216	0.998	-0.248	1.246
6	Sentinel-2 (No cloud)	0.437	0.107	0.711	-0.059	0.771

When cloud cover was present, the variability of NDVI705 values increased for both satellite datasets, as reflected by higher standard deviation values (Table 1). This increase was more noticeable for Sentinel-2 imagery, suggesting that medium-resolution pixels may be more sensitive to partial cloud contamination and atmospheric disturbances. In contrast, higher spatial resolution imagery may preserve more localized spectral information because contaminated pixels are less likely to dominate larger spatial units. This characteristic may be particularly important for ecological monitoring in temperate forest regions where completely cloud-free satellite observations are relatively limited.

Additional insight into spatial differences between the datasets was obtained using unsupervised K-means clustering (Fig. 4). Ten clusters were generated for each dataset using comparable visible and near-infrared bands to ensure a consistent level of detail. The resulting maps reveal clear differences in the spatial organization and fragmentation of clusters between the two satellite systems.

In the Sentinel-2 results, clusters tend to form relatively large and spatially homogeneous patches, reflecting a more generalized representation of the landscape. In contrast, the clustering derived from Jilin-1 imagery exhibits a more fragmented and spatially detailed pattern, with finer delineation of narrow linear features and small heterogeneous patches. These differences are consistent with the influence of spatial resolution on the representation of heterogeneous forest landscapes.

In medium-resolution imagery such as Sentinel-2 (10–20 m), individual pixels often represent mixtures of multiple surface components. This mixed-pixel effect reduces spectral contrast and leads to smoother transitions between adjacent clusters. As a result, small-scale spatial structures may be generalized or partially suppressed. In contrast, higher-resolution imagery (5 m) captures more localized variability, resulting in a more complex and internally differentiated cluster pattern.

Consequently, fine-scale spatial heterogeneity appears less pronounced in Sentinel-2 imagery compared with Jilin-1 data. This difference highlights the importance of spatial resolution in representing heterogeneous landscapes, particularly in protected forest ecosystems where small-scale variability is ecologically relevant.

In protected forest ecosystems such as the Grodnensskaya Pushcha biosphere reserve, small-scale spatial variability often reflects differences in forest age structure, species composition and local habitat conditions. High-resolution satellite imagery can therefore provide additional ecological information that may remain undetected in medium-resolution datasets. These findings are consistent with previous studies emphasizing the importance of spatial resolution for vegetation analysis in heterogeneous landscapes [Zhu et al., 2016; Zhao et al., 2020; Immitzer, Vuolo, Atzberger, 2016]. At the same time, the relatively strong performance of Sentinel-2 in representing large homogeneous landscape units confirms its suitability for regional-scale ecological assessments where fine spatial detail is not the primary requirement.

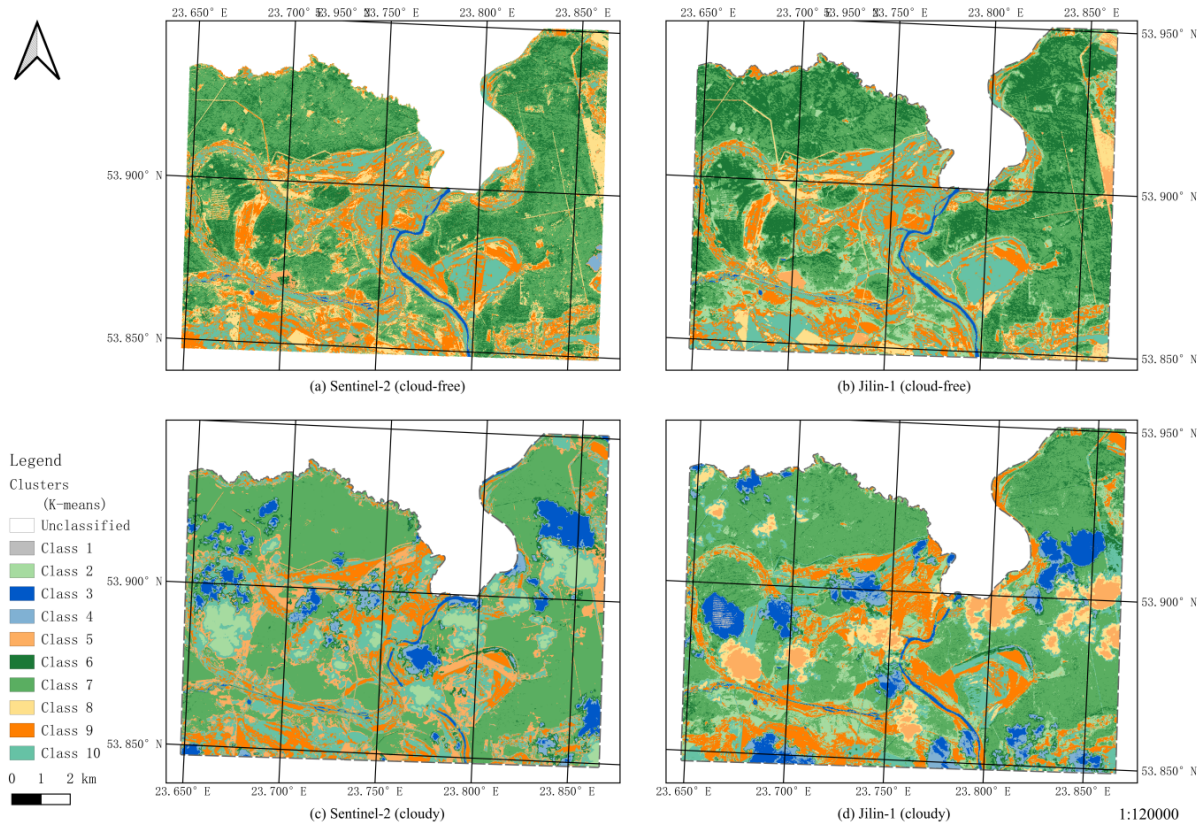


Fig. 4. Comparison of spatial clustering patterns derived from K-means classification of Jilin-1 and Sentinel-2 imagery under different cloud conditions. Ten clusters were generated for each dataset using comparable visible and near-infrared bands. Colors represent cluster labels and are used consistently across panels for visualization purposes only; they do not correspond to specific land-cover classes

The combined analysis of NDVI705 statistical characteristics and unsupervised classification results demonstrates that both Jilin-1 and Sentinel-2 imagery can support vegetation monitoring in protected forest landscapes. However, their effectiveness differs depending on the spatial scale of analysis. The higher spatial resolution of Jilin-1 imagery (5 m) enables a more detailed representation of internal forest structure and fine-scale spatial heterogeneity, including narrow riparian corridors and small forest openings that are not clearly detected in medium-resolution imagery. In contrast, Sentinel-2 imagery, with spatial resolutions of 10–20 m and a high temporal revisit frequency, remains well suited for regional-scale ecological assessments and the identification of large homogeneous landscape units. These results indicate that the selection of satellite data for vegetation analysis in heterogeneous forest ecosystems should consider both spatial resolution and the intended scale of ecological interpretation.

Conclusions

The present study evaluated the applicability of multispectral satellite imagery from the Jilin-1 and Sentinel-2 platforms for vegetation monitoring within the Grodnenskaya Pushcha potential biosphere reserve, a forest-dominated protected area characterized by complex spatial structure and high ecological value. The analysis of spectral characteristics, NDVI705 statistics and unsupervised classification results demonstrated that both satellite datasets provide consistent information on the general spatial distribution of forest vegetation.

At the same time, the results indicate that spatial resolution plays an important role in the representation of vegetation patterns in heterogeneous forest landscapes. The higher spatial resolution of Jilin-1 imagery (5 m) allows a more detailed depiction of internal forest heterogeneity, including narrow riparian zones, small forest openings and fragmented vegetation patches. Such spatial detail may provide additional ecological information relevant for analysing structural variability within protected forest ecosystems.

Sentinel-2 imagery with spatial resolutions of 10–20 m remains well suited for regional-scale vegetation monitoring and the identification of large homogeneous landscape units. Its high temporal revisit frequency and stable radiometric characteristics make it an effective data source for long-term environmental observation.

The results suggest that the combined use of satellite datasets with different spatial resolutions can improve the interpretation of vegetation patterns in structurally complex forest landscapes. High-resolution imagery contributes to the identification of fine-scale spatial heterogeneity, while medium-resolution data support broader regional assessments. This complementary use of multi-resolution satellite imagery may enhance ecological monitoring and environmental management within protected natural areas.

References

1. Bhatnagar S., Gill L., Regan S., Naughton O., Johnston P., Waldren S., Ghosh B. Mapping vegetation communities inside wetlands using Sentinel-2 imagery in Ireland // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2020. – Vol. 88. – Art. 102083. – <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102083>
2. Chervan' A. N., Dzhaio B., Chen' Ts. Geoinformatsionnaya otsenka turisticheskogo potentsiala Avgustovskogo kanala v aspekte razvitiya biosfernogo rezervata «Grodnenskaya Pushcha» s ispol'zovaniem DDZ // *Avgustovskij kanal: problemy izucheniya, sokhraneniya i populyarizatsii* : sb. nauch. st. / Grodn. gos. un-t im. Yanki Kupaly [i dr.] ; redkol.: N. B. Zhuravleva [i dr.]. – Grodno : GrGU, 2024. – S. 192–199. – URL: <https://elib.grsu.by/doc/113070> (accessed: 12.01.2026).
3. Delegido J., Verrelst J., Alonso L., Moreno J. Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content // *Sensors*. – 2011. – Vol. 11, iss. 7. – P. 7063–7081. – <https://doi.org/10.3390/s110707063>
4. Gitelson A. A., Merzlyak M. N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll // *Journal of Plant Physiology*. – 1996. – Vol. 148, iss. 3/4. – P. 494–500. – [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80284-7](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80284-7)
5. Immitzer M., Vuolo F., Atzberger C. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe // *Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 8, iss. 3. – Art. 166. – <https://doi.org/10.3390/rs8030166>
6. Jiang Z., Huete A. R., Chen J., Chen Y., Li J., Yan G., Zhang X. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction // *Remote Sensing of Environment*. – 2006. – Vol. 101, iss. 3. – P. 366–378. – <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.02.002>
7. Jilin-1 spectral satellite (JL1GP02-5M) – Belarus (2020): technical documentation / Chang Guang Satellite Technology Co ; [ed.?] X. Zhong. – Changchun : CGSTL, 2023.
8. Jilin-1 spectral satellite (JL1GP02-5M) – Belarus (2021–2023): technical documentation / Chang Guang Satellite Technology Co ; [ed.?] X. Zhong. – Changchun : CGSTL, 2023.
9. Korhonen L., Ha D., Packalen P., Rautiainen M. Comparison of Sentinel-2 and Landsat-8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index // *Remote Sensing of Environment*. – 2017. – Vol. 195. – P. 259–274. – <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.021>
10. Lastovicka J., Svec P., Paluba D., Kobliuk N., Svoboda J., Hladky R., Strych P. Sentinel-2 data in an evaluation of the impact of the disturbances on forest vegetation // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, iss. 12. – Art. 1914. – <https://doi.org/10.3390/rs12121914>

11. Mohammadpour P., Viegas D. X., Viegas C. Vegetation mapping with random forest using Sentinel-2 and GLCM texture feature: a case study for the Lousã region, Portugal // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14, iss. 18. – Art. 4585. – <https://doi.org/10.3390/rs144585>
12. Respublikanskij zakaznik «Grodnenskaya Pushcha» // *Zapovednye territorii Belarusi. Virtual'nyj tur*. – URL: <https://zapovednytur.by/oop/zakazniki-respublikanskogo-znacheniya/grodnenskaya-pushha.html> (accessed: 12.01.2026).
13. Sims D. A., Gamon J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // *Remote Sensing of Environment*. – 2002. – Vol. 81, iss. 2/3. – P. 337–354. – [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
14. Zhao L., Zhang R., Liu Y., Zhu X. The differences between extracting vegetation information from GF1-WFV and Landsat-8 OLI // *Acta Ecologica Sinica*. – 2020. – Vol. 40, iss. 10. – P. 3495–3506. – <https://doi.org/10.5846/stxb201903040405> (in Chinese).
15. Zhu D.-Y., Xiong K.-N., Xiao H., Lan J.-C. Comparison of rocky desertification detection ability of GF-1 and Landsat OLI based on vegetation index // *Journal of Natural Resources*. – 2016. – Vol. 31, iss. 11. – P. 1949–1957. – <https://doi.org/10.11849/zrzyxb.20151393> (in Chinese).

**РОЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ
ИНФОРМАЦИИ О РАСТИТЕЛЬНОСТИ: СРАВНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ
JILIN-1 И SENTINEL-2 В БИОСФЕРНОМ РЕЗЕРВАТЕ «ГРОДНЕНСКАЯ ПУЩА»
(БЕЛАРУСЬ)**

Чжао Б.¹, Цзян Ч.²

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь,
e-mail: geozhao@outlook.com

²Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь,
e-mail: sweeneilj@gmail.com

Аннотация: Высокодетальные спутниковые данные дистанционного зондирования предоставляют новые возможности для анализа структуры растительности в лесных экосистемах со сложной пространственной организацией. В данной работе рассматривается роль пространственного разрешения спутниковых изображений при извлечении информации о растительности на основе мультиспектральных данных дистанционного зондирования. Исследование выполнено для территории потенциального биосферного резервата «Гродненская Пуща» в Республике Беларусь — природоохранной территории, характеризующейся высокой лесистостью и значительной пространственной неоднородностью растительного покрова. Для анализа использованы мультиспектральные спутниковые изображения Jilin-1 с пространственным разрешением 5 м и Sentinel-2 с пространственным разрешением 10–20 м, полученные в период максимального развития растительности. Состояние растительности оценивалось с использованием краснокраевого вегетационного индекса NDVI705. Анализ включал сравнение спектральных профилей, статистических характеристик индекса NDVI705 и результатов неконтролируемой кластеризации (K-means), полученных для одинаковых областей интереса. Результаты показали, что оба спутниковых набора данных демонстрируют сходные спектральные закономерности в краснокраевой и ближней инфракрасной областях спектра, однако различаются по степени пространственной детализации. Более высокое пространственное разрешение изображений Jilin-1 позволяет выявлять внутреннюю неоднородность лесного покрова, включая небольшие лесные окна, узкие прибрежные зоны и фрагментированные участки растительности, тогда как данные Sentinel-2 обеспечивают более обобщённое представление о структуре ландшафта и остаются эффективными для анализа

на региональном уровне. Полученные результаты показывают, что пространственное разрешение является важным фактором при анализе растительности в лесных природных комплексах и что совместное использование спутниковых данных с различными пространственными характеристиками может повысить эффективность экологического мониторинга на природоохранных территориях.

Ключевые слова: NDVI705, краснокраевой спектральный диапазон, мультиспектральные спутниковые данные, лесные экосистемы, дистанционное зондирование

Сведения об авторах

- | | |
|-----------------------------|---|
| Zhao Bochao
(Чжао Бочао) | аспирант, без учёной степени, Белорусский государственный университет, факультет географии и геоинформатики, просп. Независимости, 4, г. Минск, 220030, Республика Беларусь, e-mail: geozhao@outlook.com |
| Jiang Chen
(Цзян Чэнь) | аспирант, без учёной степени, Белорусский государственный университет, факультет географии и геоинформатики, просп. Независимости, 4, г. Минск, 220030, Республика Беларусь, e-mail: sweenei1j@gmail.com |

*Поступила в редакцию 14.01.2026
Принята к публикации 01.05.2026*

SNOW COVER CHEMISTRY IN CRIMEAN FOREST ECOSYSTEMS: A CASE STUDY OF THE KARADAG NATURE RESERVE *

Pham C. N.^{1*}, Gorbunov R. V.¹, Lapchenko V. A.², Gorbunova T. Yu.¹, Tabunshchik V. A.¹

¹A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,

²T. I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of RAS – Branch of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Feodosia, Russian Federation,

e-mail: famkn@ibss-ras.ru

Abstract: The aim of the study is to analyze the chemical composition of snow and the distribution of macroelements in the Karadag Nature Reserve in Crimea, where snowfall is rare. Snow samples were collected during the winter period from 2021 to 2024 at a background environmental monitoring station and analyzed for ion content and acidity. The results show that acidity varies from 6.00 to 7.46, with a predominance of sulfates, indicating anthropogenic influences. The chemical composition is determined by both natural and anthropogenic factors. The high ratio of cations to anions indicates buffering processes that reduce acidity, which may positively affect the ecosystem. The results emphasize the need for monitoring atmospheric precipitation to assess anthropogenic impacts.

Keywords: chemical composition, snow cover, forest ecosystems, Crimea, Karadag Nature Reserve

Introduction

Atmospheric deposition is a key driver of biogeochemical cycles, serving as a major transport mechanism for both natural and anthropogenic substances across terrestrial and aquatic ecosystems. Snow cover acts as a highly efficient natural archive of these inputs, integrating chemical signals from wet and dry deposition over time. Its composition provides critical insights into regional air pollution levels, making it a powerful tool for environmental monitoring [Vasilevich, Beznosikov, Kondratenok, 2011; Pristova, Vasilevich, 2011; Krnavek et al., 2012]. Unlike rainfall, which leads to immediate runoff, snow accumulates contaminants (including trace metals, sea salts, acids, and industrial emissions) and releases them abruptly during melt events, posing significant ecological risks [Krnavek et al., 2012].

The study of snow chemistry in Crimea offers a rare and scientifically valuable opportunity due to the region's unique climatic and geographical setting. While extensive research has been conducted in high-latitude, alpine, and heavily industrialized areas with persistent snow cover [Hunova et al., 2023; Kotova, Topchaya, Novikova, 2023; Makarov, Torgovkin, 2021; Aristarain, Delmas, 2002; Xue et al., 2020; Toom-Sauntry, Barrie, 2002; Domine et al., 2004; Nickus, 2003; de Caritat et al., 2005; Benassai et al., 2005; Yalcin et al., 2006; Dibb et al., 2010], Crimea's Southern Coast experiences snowfall only sporadically, for a few days per year. This infrequency results in highly concentrated deposition events, effectively capturing discrete “snapshots” of atmospheric chemistry.

Furthermore, Crimea's location exposes it to diverse pollution sources: marine aerosols from the Black Sea, long-range transport of industrial emissions from Europe, and localized anthropogenic activity. The combination of these factors makes Crimean snow a distinctive and understudied environmental record, offering insights into pollution dynamics in a Mediterranean coastal climate.

A key focus of this study is sulfate (SO_4^{2-}), a major component of snow chemistry with ambiguous origins. While natural sources such as sea spray and volcanic emissions contribute sulfates, elevated concentrations are often a definitive marker of anthropogenic pollution, particularly from fossil fuel combustion (e.g., power plants, industrial processes, and vehicle emissions) [Glazovsky, Zlobina, Uchvatov, 1983; Kurosaki et al., 2025; Karpachevskiy et al., 1998; Kulikova,

*This work was carried out within the framework of the IBSS state research assignment, registration number: 124030100030-0, and of KSS – NR RAS – Branch of IBSS, registration number: 124030100098-0.

1968; Hunova et al., 2023; Kotova, Topchaya, Novikova, 2023; Makarov, Torgovkin, 2021; Aristarain, Delmas, 2002; Xue et al., 2020; Toom-Sauntry, Barrie, 2002; Domine et al., 2004; Nickus, 2003; de Caritat et al., 2005; Benassai et al., 2005; Yalcin et al., 2006; Dibb et al., 2010; Pham et al., 2024]. Given sulfate's role in acid deposition and ecosystem degradation, accurately distinguishing natural from anthropogenic inputs is essential for assessing air quality and implementing effective pollution control measures.

Additionally, forest ecosystems can alter deposition patterns through canopy interception and chemical transformations [Karpachevskiy et al., 1998; Kulikova, 1968]. To minimize these confounding effects, this study centers on the Karadag Nature Reserve, a protected area where local vegetative interference is reduced, allowing for a clearer assessment of regional atmospheric deposition. By analyzing the chemical composition of Crimea's rare snow cover, this research aims to: (1) quantify the deposition of major ions (including sulfates) and trace elements, (2) rigorously evaluate the relative contributions of natural (marine, crustal) versus anthropogenic sources, and (3) leverage the unique context of Crimean snow to assess regional atmospheric pollution burdens impacting this sensitive coastal ecosystem. This study not only fills a critical gap in understanding pollution dynamics in a warming, low-snow region but also establishes a baseline for future environmental monitoring in the Black Sea basin.

Study Area

The study was conducted at the Background Environmental Monitoring Station (BEMS) within the State Nature Reserve "Karadag" (44°54'N, 35°12'E), a protected coastal steppe ecosystem in south-eastern Crimea (Fig. 1).

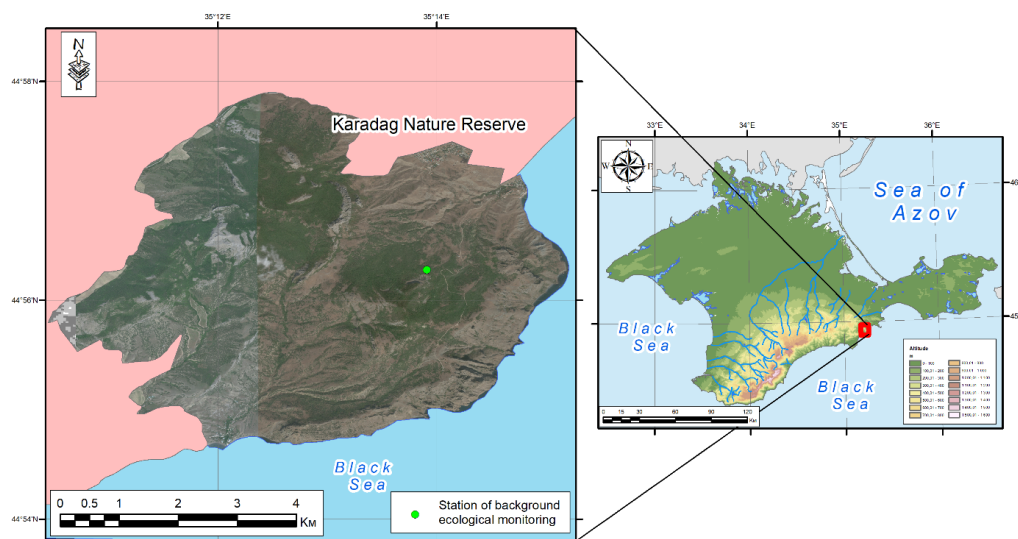


Fig. 1. Study area within the State Nature Reserve "Karadag"

Рис. 1. Исследуемая территория в Государственном природном заповеднике «Кардаг»

The site lies on the northeastern slope of Mount Svyataya, 1.5 km from the nearest settlement (Koktebel) and is shielded from direct marine influence by the Kok-Kaya Ridge (320 m elevation). The vegetation consists of steppe grasses with sparse tree undergrowth (canopy closure $\leq 60\%$) [Pham et al., 2024].

The area receives an average annual rainfall of 450 mm (± 55 mm), with about 30 % of this precipitation occurring during winter months (December to February). Snowfall is episodic, featuring 3–5 significant snow events each season. Snow cover typically lasts between 5 and 15 days, supported by mean winter temperatures of 1.2 °C (± 2.1 °C).

Materials and methods

Snow samples were collected during three winter seasons: January 15–20, 2021; February 1–5, 2023; and January 25–30, 2024. These periods represent peak snow accumulation events in Crimea, with each sampling campaign conducted 24–48 hours after snowfall cessation. The specific timing was selected to avoid melt periods, thus minimizing the impact on sample integrity and ensuring the capture of both wet and dry deposition. Surface snow from the top 0–5 cm was gathered using acid-washed Teflon tools into pre-cleaned HDPE containers, carefully avoiding ground contamination. Field blanks ($n = 3$ per season) and NIST 1640a reference materials were used for quality control, with recoveries ranging from 92 % to 107 %. Samples were immediately frozen at -20 °C and analyzed within 72 hours following RD 52.04.186-89 standards [RD 52.04.186-89]. All analyses were conducted at the A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas (IBSS).

Nitrate (NO_3^-) and ammonium (NH_4^+) concentrations were measured via spectrophotometry using a KFK–ZOMZ photometer, with NH_4^+ determined by the Seji-Solorzano method. The nitrite ion was determined by the Bendschneider and Robinson method. Chloride (Cl^-) and sulfate (SO_4^{2-}) were analyzed using ion chromatography on the “STAYER A” system. The limits of the relative total error of the measurement result for the concentration of Cl^- and SO_4^{2-} at a confidence level of $P = 0.95$ did not exceed ± 13 % at mass concentrations from 0.10 mg/dm³ to 1000 mg/dm³. The detection limits for Cl^- and SO_4^{2-} were 0.001 and 0.002 mg/l, respectively. Major cations (Ca, Mg, Na, K) and trace metals (Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Sr, I, Ba) [Lipatnikova et al., 2024] were quantified by ICP-MS (PlasmaQuant MS Elite). Detection limits for trace metals ranged from 0.01 to 0.1 $\mu\text{g L}^{-1}$. Results from quintuple analyses were averaged and reanalyzed when the relative standard deviation exceeded 10 %. Elemental recoveries and relative standard deviations (RSDs) for standardized reference standards were 96–105 % and < 10 %, respectively. Measured with a calibrated digital pH meter equipped with a KCl reference electrode and standardized using pH 4.0 and 9.2 buffer solutions.

To determine potential sources of dissolved ions in atmospheric precipitation and quantify their contributions, an enrichment factor (EF) analysis was performed. The EF was calculated for each ion relative to seawater and for each element relative to the Earth’s crust, assessing the influence of marine and terrestrial sources on precipitation composition. The EF was calculated as follows [Katanayeva, Selyanin, 2011]:

$$EF_{sea} = [X/Na]_{samples} / [X/Na]_{sea}. \quad (1)$$

The enrichment factor (EF) relative to the average composition of the Earth’s crust is calculated using the formula [Katanayeva, Selyanin, 2011; Vinogradov, 1967]:

$$EF_{crust} = [X/Al]_{samples} / [X/Al]_{crust}, \quad (2)$$

where X is the content of the element ($\mu\text{g L}^{-1}$) in both the sample and the upper part of the continental crust.

The clark values of elements in seawater were taken from the data provided by Vinogradov [Vinogradov, 1967].

While all potentially toxic elements (PTEs) were analyzed, cadmium and zinc received particular attention due to: (1) their exceptionally high enrichment factors ($EF > 10\,000$ for Cd) indicating strong anthropogenic influence; (2) known ecological risks associated with Cd bioaccumulation in Crimean ecosystems while Zn reflects widespread urban and industrial emissions; (3) their regulatory significance, as both exceed MPCs in regional environmental quality standards [GN 2.1.5.1315-03]. This prioritization aligns with recent Black Sea pollution studies [Gurov, Kotelyanets, 2022] highlighting these metals as key tracers of anthropogenic impact in coastal reserves.

Dominant winds during sampling periods come from the northeast, occurring 60 % of the time, according to hourly data from an OTT HydroMet WS 600 station.

Pearson correlation analyses were performed to explore relationships between ion and metal concentrations and meteorological factors such as wind direction. Data processing was conducted in R version 4.3.0, with statistical significance set at $p < 0.05$.

Results

The acidity of meltwater is crucial for understanding the chemical processes occurring during snowmelt. Acidic precipitation entering the soil enhances the migration and leaching of various elements from soil horizons. It is known that at an average atmospheric carbon dioxide (CO_2) concentration of 400 ppm (current global average) and a temperature of 20 °C, the pH of pure water in equilibrium with atmospheric CO_2 is approximately 5.6. If the pH of precipitation is above 5.6, it is considered alkalized, whereas a pH below 5.6 indicates acidification.

The snowmelt water exhibited consistent alkaline conditions, with pH values ranging from 6.00 to 7.46 (mean: 6.49 ± 0.42), which were significantly higher than the expected atmospheric equilibrium pH of 5.6. The lowest pH recorded was 6.00 on 17 January 2021, while the highest reached 7.46 on 14 January 2021. In comparison, the natural pH of precipitation in equilibrium with atmospheric CO_2 is 5.6–5.7 [Trushkina, Trushkin, Demyanova, 2006], meaning values below this range suggest acidification, while higher values (as observed here) reflect alkalization.

Figure 2 presents the average concentrations of major components in snowmelt water, representing the chemical composition of the snow cover, along with the mean deposition fluxes of these components onto the underlying surface (expressed per unit area).

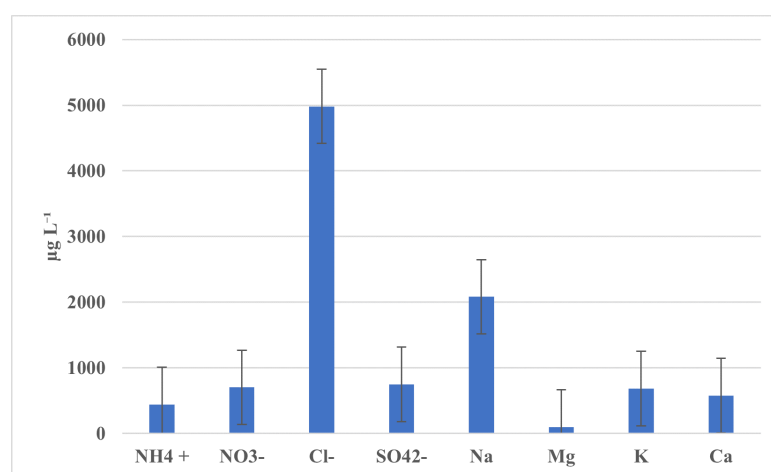


Fig. 2. Deposition of major chemical compounds in the study area ($\mu\text{g L}^{-1}$)

Рис. 2. Содержание основных химических соединений в исследуемой зоне ($\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$)

Based on the molar concentration ratios of ions in snowmelt water during the study period (2021–2024), the following geochemical dominance series was established: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+$. This ranking reflects the relative abundance of major ions, with calcium (Ca^{2+}) and sodium (Na^+) being the most dominant cations, followed by chloride (Cl^-) as the primary anion.

Chloride (Cl^-) was the predominant anion, with an average concentration of $4981.96 \mu\text{g L}^{-1}$ and a maximum of $8549.88 \mu\text{g L}^{-1}$. Sulfate (SO_4^{2-}) averaged $749.33 \mu\text{g L}^{-1}$, peaking at $1074.87 \mu\text{g L}^{-1}$. Nitrate (NO_3^-) exhibited considerable variability, ranging from 290.00 to $1030.00 \mu\text{g L}^{-1}$, with a mean value of $704.41 \mu\text{g L}^{-1}$. Sodium (Na) averaged $2083.66 \mu\text{g L}^{-1}$ but showed a sharp decline during 2023–2024, dropping to values between 5.65 and $18.59 \mu\text{g L}^{-1}$. Calcium (Ca) averaged $577.50 \mu\text{g L}^{-1}$, reaching a peak of $1145.15 \mu\text{g L}^{-1}$. Potassium (K) and magnesium (Mg) had mean concentrations of $684.72 \mu\text{g L}^{-1}$ and $99.61 \mu\text{g L}^{-1}$, respectively. Ammonium concentrations varied widely, from $17.77 \mu\text{g L}^{-1}$ (21 January 2021) up to $1252.80 \mu\text{g L}^{-1}$. Elevated NH_4^+ levels suggest contributions from anthropogenic sources such as agriculture and transportation. The dominance of chloride and sodium suggests combined influences from marine aerosols and human activities. Elevated sulfate and nitrate levels point to contributions from industrial and vehicular emissions. Observed fluctuations in pH and ionic composition correlate with meteorological changes and shifting pollution sources over the study period. Overall, the pronounced spatial and temporal variability in snow chemistry highlights the need for continued source apportionment research and ongoing monitoring. These findings underscore the complex interplay between natural environmental processes and anthropogenic factors in determining the chemical characteristics of the snowpack.

The acid-neutralizing capacity of the snow cover was evaluated using the ratio of total anions ($A = [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-]$) to total cations ($K = [\text{NH}_4^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+]$) [Vasilevich, Beznosikov, Kondratenok, 2011; Zverev, Varvanina, Putilina, 1997]. This approach is well-founded, as cations in snowmelt water primarily originate from windborne mineral dust (e.g., carbonates, phosphates, and silicates) derived from soil and rock erosion. Upon dissolution, these minerals undergo hydrolysis, releasing hydroxide ions (OH^-) in quantities stoichiometrically linked to their cationic content. From the presented data (Table 1), it can be seen that the snowmelt water has K/A values > 1 (average value = 3.94). The high cation/anion ratio ($K/A = 3.94 \pm 1.2$), ranging from 2.8 to 5.1 , indicates a strong carbonate buffering capacity, reflecting a significant influence of crustal cations on the alkalinity of the snowmelt water. Ratios > 1 confirm that all samples exhibited net alkaline conditions. This indicates a predominance of cations over anions in the snowmelt water, which may suggest the presence of sufficient neutralizing compounds that contribute to reducing acidity.

Table 1. Ratios of molar concentrations of the equivalent of major ions in snowmelt waters

Таблица 1. Соотношения молярных концентраций эквивалента основных ионов в талых водах

Indicator	Value
pH	6.49
$[\text{SO}_4^{2-}] / [\text{NO}_3^-]$	1.29
$[\text{NH}_4^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] / [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-]$	3.94
$[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] / [\text{SO}_4^{2-}]$	16.36
$[\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] / [\text{Ca}^{2+}] + [\text{K}^+]$	3.63
$[\text{Na}^+] / [\text{Cl}^-]$	1.59
$[\text{Cl}^-] / [\text{Na}^+]$	4.32
$[\text{SO}_4^{2-}] / [\text{Cl}^-]$	0.17

An excess of cations over anions may indicate the presence of compounds capable of neutralizing acids, which is associated with the hydrolysis processes of carbonate, phosphate, and silicate minerals. This may indicate a positive influence of natural processes on the acid-base state of the snow cover. If K/A values > 1 are recorded in conditions with a high level of anthropogenic impact (for example, near industrial zones), it may indicate the effectiveness of natural neutralization processes, despite potential pollution. High K/A values may also suggest that the snow cover in this area is less susceptible to acid precipitation, which can have positive consequences for the ecosystem, especially in conditions where acid rains can negatively affect flora and fauna. This highlights that, in this case, the snowmelt water is more balanced in terms of acid-base status, which may be related to differences in pollution sources and natural conditions. Thus, a K/A value > 1 may serve as an indicator of a more favorable acid-base state of the snow cover, which is important for assessing its impact on the environment.

The elements magnesium and sodium generally have a marine origin, while potassium is terrigenous. The ratio $([Mg^{2+}] + [Na^+]) / ([Ca^{2+}] + [K^+])$ reflects the predominance of marine (> 1) or terrigenous (< 1) components. In the studied area, sodium and magnesium ions dominate over potassium and calcium ions, which is attributed to anthropogenic factors rather than the influence of marine aerosol. This assumption is supported by the $[Na^+]/[Cl^-]$, which is 1.59 indicates mixed sources. The ratio $([Mg^{2+}] + [Na^+]) / ([Ca^{2+}] + [K^+])$ averages 3.63, indicating marine dominance in bulk cation balance. However, this alone is misleading: both Mg^{2+} and Na^+ are also emitted from carbonate dust and anthropogenic sources (e.g., traffic, industry), so their abundance does not equate to marine origin. Crucially, the $[Na^+] / [Cl^-]$ ratio (1.59) is markedly higher than the seawater value (0.86), indicating excess Na^+ , which is likely from terrigenous dust or anthropogenic inputs. Conversely, the $[Cl^-] / [Na^+]$ ratio averages 4.32 (range: 0.12–15.13), far exceeding seawater (1.16), signaling strong Cl^- enrichment. Thus, the elevated Cl^- is not marine in origin but anthropogenic. While Na^+ and Mg^{2+} are present in marine proportions, their relative enrichment compared to Cl^- and K^+ , combined with deviations in key ratios ($[Na^+] / [Cl^-]$, $[Cl^-] / [Na^+]$, $[Mg^{2+}] / [Cl^-]$) and co-variance with SO_4^{2-} and Cd, confirms that anthropogenic emissions have substantially altered the natural background.

The ratio of molar concentrations of the equivalent $[SO_4^{2-}] / [Cl^-]$ was used to determine the origin of the composition of atmospheric precipitation, as well as to assess atmospheric pollution from industrial emissions. The sulfate-to-chloride ratio ($[SO_4^{2-}] / [Cl^-]$) of 0.17 suggests a predominantly non-marine sulfate source. To evaluate the contribution of pollution sources to the atmosphere, the following ratios were calculated: $[SO_4^{2-}] / [NO_3^-]$, $([Mg^{2+}] + [Na^+]) / ([Ca^{2+}] + [K^+])$, $[Na^+] / [Cl^-]$.

Table 1 demonstrates the relationship between NO_3^- , SO_4^{2-} и NH_4^+ . The ratio of NH_4^+ to NO_3^- in all samples is approximately 0.63. Nitrate and ammonium (NO_3^- and NH_4^+) are virtually absent in seawater and, therefore, do not correlate with sea salt, although there may be weak correlations between different classes of samples ($r(NO_3^- / Na^+) = 0.39$).

The content of macro and microelements in the filtrate of snowmelt water is presented in Fig.3. When compared to the maximum permissible concentrations (MPC) for water, only cadmium (Cd) was found to exceed the MPC. Thus, there are cadmium (Cd) pollutants in the snowmelt water in the studied area [GN 2.1.5.1315-03].

There is notable variability in element concentrations across different sampling dates, which may be attributed to seasonal changes, meteorological conditions, and pollution sources. In particular, the sample from 21 January 2021 stands out, with cobalt (27.79 $\mu g/L$), nickel (31.49 $\mu g/L$), and zinc (629.44 $\mu g/L$) concentrations significantly exceeding average levels, suggesting a possible short-term anthropogenic impact. Overall, the data indicate generally low levels of microelement and heavy metal contamination in the snowmelt water, with the exception of cadmium.

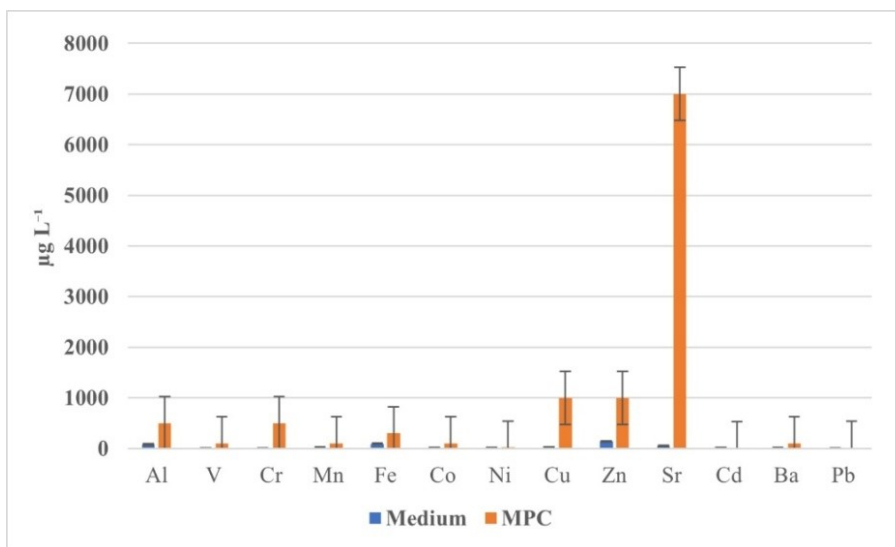


Fig. 3. Concentrations of microelements and heavy metals in snowmelt water ($\mu\text{g L}^{-1}$)

Рис. 3. Концентрации микроэлементов и тяжёлых металлов в талой воде ($\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$)

The enrichment factor (EF) serves as a useful tool for estimating the relative abundance or deficiency of elements in atmospheric precipitation, distinguishing between marine and continental sources. This parameter also helps differentiate between anthropogenic and naturally occurring elements [Aničić et al., 2009]. To assess their origins, we calculated enrichment factors (EF) for selected elements (Table 2). Given the minor contribution of marine sources to overall elemental concentrations, only Na, mg, K, Ca, Sr, and Ba were considered in the analysis.

Table 2. Enrichment Factors (EF) in relation to sources of origin: Lithogenic and Marine

Таблица 2. Коэффициенты обогащения (EF) в зависимости от источников: литогенные и морские

Elements	Lithogenic	Marine
Na	86.62	1.00
Mg	5.54	0.40
Al	1.00	
K	28.46	8.85
Ca	20.28	7.25
V	4.39	
Cr	7.26	
Mn	18.70	
Fe	2.03	
Co	266.74	
Ni	157.14	
Cu	358.43	
Zn	1729.66	
Sr	152.40	32.32
Cd	32 696.28	
Ba	14.71	2617.28
Pb	96.13	

Metals with an EF_{crust} value close to 1 are typically derived from the natural weathering of the Earth's crust, whereas EF_{crust} values between 1 and 10 may reflect the influence of the local soil's chemical composition [Poissant, Schmit, Béron, 1994; Al-Momani, 2003]. Values ranging from 10 to 500 indicate moderate enrichment, while values exceeding 500 signify extreme enrichment, strongly suggesting significant pollution from anthropogenic sources [Poissant, Schmit, Béron, 1994].

According to Table 2, nearly all analyzed elements exhibit EF_{crust} values well above 10. Notably, Zn and Cd have EF_{crust} values greater than 500, classifying them as highly enriched ($EF_{\text{crust}} > 500$). Elements with moderate enrichment ($10 < EF_{\text{crust}} < 500$) include Na, K, Ca, Mn, Co, Ni, Cu, Sr, Ba, and Pb, with EF_{crust} values of 86.62, 28.46, 20.48, 18.70, 266.74, 157.14, 358.43, 152.40, 14.71, and 96.13, respectively. These values suggest enrichment from both lithogenic and anthropogenic sources, such as atmospheric pollution from industrial emissions and transportation, which are transported over long distances.

Trace metal contamination was particularly pronounced for cadmium: its concentration reached 1.8 $\mu\text{g/L}$, which was 4.2 times higher than the maximum permissible concentration (MPC), and the crustal enrichment factor (EF_{crust}) was exceptionally high at 32 696. Zinc (Zn) also showed significant enrichment ($EF_{\text{crust}} = 1730$), indicating industrial sources. Copper (Cu) presented a moderate enrichment ($EF_{\text{crust}} = 358$), suggesting mixed anthropogenic origins, while lead (Pb) exhibited enrichment ($EF_{\text{crust}} = 96$) primarily attributed to traffic emissions.

The EF_{sea} value for Sr is 32.32, indicating other natural sources in addition to the sea. Additionally, Ba has EF_{sea} value of 2617.28, significantly greater than 500, reflecting a strong enrichment in snowmelt water and pointing to an anthropogenic origin. K and Ca have EF_{sea} values of 8.85 and 7.25, respectively, suggesting the influence of the chemical composition of local seawater. The EF_{sea} value for mg is 0.40, indicating dilution of this element in snowmelt water.

Wind data from 2021–2024 reveal dominant NW winds (37–86 % frequency in winter) averaging 1.8 m/s (gusts to 5.3 m/s). This pattern facilitates transport of industrial pollutants (e.g., Cd, SO_4^{2-}) from Sevastopol (85 km NW) and transboundary sources, while low speeds enhance local dust input (Ca^{2+} , Mg^{2+}).

Discussion

Snow in Crimea is characterized by a slightly alkaline pH range (6.00–7.46), indicating a neutral to moderately alkaline deposition environment. This has several ecological implications. As such snow melts, it can gradually increase soil pH, affecting the availability of nutrients. Although calcareous soils, which are widespread in Crimea, can partially buffer this effect, sensitive plant species may face certain challenges, such as: Reduced solubility of iron (Fe) and manganese (Mn), potentially leading to chlorosis in some species; Increased phosphorus (P) fixation, which may limit its availability to plants. Many tree species typical of Crimea (e.g., oak, beech, juniper) are generally tolerant of mildly alkaline conditions. However, prolonged exposure to such conditions may favor the spread of drought-resistant and calciphilous species at the expense of acid-sensitive vegetation. Snowmelt also influences the composition of streams and groundwater, where pH plays a key role in determining metal toxicity. Alkaline conditions reduce the bioavailability of toxic metals such as aluminum (Al) and lead (Pb), which benefits aquatic flora and fauna. While neutral pH is generally considered safe, fluctuations can cause stress in acid-sensitive species, including certain crustaceans and mollusks. In addition, alkaline conditions can alter soil microbial communities, slowing the decomposition of organic matter and affecting nutrient cycling. Unlike industrial regions, where snow pH often drops below 5.0 due to acid precipitation, Crimean snow is less acidic. This is likely due to the buffering effect of carbonate rich dust from local limestone and the neutralizing influence of marine sea salt aerosols. However, pH values above 7.0 may indicate the presence of anthropogenic dust (e.g., from construction or agricultural activities) or ammonia (NH_3) emissions from fertilizers or livestock operations.

The slightly alkaline pH of Crimean snow (6.00–7.46) is strongly influenced by the region's calcareous soils, which are rich in carbonates (CaCO_3 , MgCO_3). These soils act as a natural buffer, neutralizing acidic deposition through the following mechanisms: (1) Carbonate Dissolution: Ca^{2+} and Mg^{2+} from limestone and dolomite dust dissolve in snowmelt, releasing bicarbonate (HCO_3^-) and hydroxyl (OH^-) ions that counteract acidity [Hunova et al., 2023]. (2) Cation Exchange: The high correlation between pH and Mg^{2+} ($r = 0.55$) confirms their dominant role in buffering, consistent with Crimea's widespread rendzina soils (shallow, carbonate-rich soils on limestone [Kotova, Topchaya, Novikova, 2023]). (3) Dust Input: Aeolian transport of alkaline dust from exposed limestone bedrock and agricultural areas further elevates snow pH, as seen in other arid/semi-arid regions (e.g., the Mediterranean, Central Asia). Unlike forested boreal zones (e.g., Siberia, Scandinavia), where soils lack carbonates and snow pH often falls below 5.0, Crimea's geology provides robust acid-neutralizing capacity. Compared to industrialized temperate regions (e.g., NE China, Eastern Europe), where anthropogenic SO_2 / NO_3 emissions dominate snow chemistry, Crimea's alkaline dust offsets acidity, yielding higher pH despite sulfate inputs.

A preliminary evaluation of natural water quality can be derived from key chemical parameters of atmospheric precipitation, specifically pH and total ion content (Σ_i). Our analysis reveals a significant positive correlation between these variables ($r = 0.67$), indicating that higher ion concentrations correspond to increased pH levels in precipitation.

The observed increase in snowmelt water acidity in the study area is principally attributed to sulfuric acid dissociation, as evidenced by the elevated sulfate-to-nitrate ratio ($[\text{SO}_4^{2-}] / [\text{NO}_3^-] = 1.29$). This sulfate predominance reflects more efficient atmospheric scavenging of sulfur dioxide compared to nitrogen oxides [Moody, Samson, 1989], consistent with established patterns of wet deposition chemistry.

The average monthly concentrations of sulfates in precipitation correlate well with their pH values ($r(\text{pH}/\text{SO}_4^{2-}) = 0.70$). The simultaneous occurrence of high sulfate concentrations and alkaline pH suggests a more complex mixed process rather than the mere presence of "sulfur compounds". Data from this study indicate that this correlation is most likely mediated by the co-deposition of aerosols and dust particles containing both sulfate anions and alkaline cations (particularly Ca^{2+} and Mg^{2+}). This hypothesis is strongly supported by the high correlation coefficients observed between pH and Ca^{2+} ($r = 0.65$) and Mg^{2+} ($r = 0.64$), as well as the extremely strong correlation between Ca^{2+} and Mg^{2+} themselves ($r = 0.99$). This points to a common erosional source for these cations, specifically carbonate dust particles from local soils. Therefore, the high pH is not a result of sulfate, but rather a consequence of the fact that both acidic and alkaline components are released simultaneously into the snow, with the predominance of the alkaline component (due to the abundance of carbonate dust) determining the neutral and alkaline pH values. This mechanism is consistent with studies from other regions with strong continental influence: for example, in industrial cities in Northeast China [Cao et al., 2013] and in Moscow [Eremina, Grigoriev, 2010], it was shown that suspended particles from construction sites and soil dust rich in calcium and magnesium bicarbonates effectively neutralize acidic components. Consequently, the mere interpretation of the $\text{pH}-\text{SO}_4^{2-}$ correlation reflects the coexistence of industrial pollution sources (sulfur) and natural/anthropogenic buffers (dust). In contrast, nitrates did not have a significant impact on the acidity of the snow cover ($r(\text{pH}/\text{NO}_3^-) = 0.33$).

In studies conducted in northeastern China, it was shown that the calculated potential for acidification of atmospheric precipitation did not correspond to the values obtained during observations due to significant contributions from major cations (especially Ca^{2+}) present in soil dust and suspended substances of both anthropogenic and natural origin [Cao et al., 2013]. Eremina and co-authors explained the alkalinization of the snow cover in Moscow by the presence of aerosols and suspended particles from numerous construction sites in the urban agglomeration, which have an alkaline reaction (calcium and magnesium salts, bicarbonates), leading to the neutralization of acidic components in the snow [Eremina, Grigoriev, 2010]. Thus, the pH value of snowmelt water in the studied area was likely influenced by the buffering of snow cover acidity due to the increasing concentration of suspended substances in the atmospheric air, originating from both natural and anthropogenic sources.

There is a relationship between the acidity of meltwater and the concentration of calcium and magnesium ions: $r(\text{pH}/\text{Ca}^{2+}) = 0.65$, $r(\text{pH}/\text{Mg}^{2+}) = 0.64$. There is a relationship between the acidity of meltwater and the concentration of calcium and magnesium ions: $r(\text{pH}/\text{Ca}^{2+}) = 0.65$, $r(\text{pH}/\text{Mg}^{2+}) = 0.64$. The high correlation coefficients between the ions of alkali and alkaline earth metals: K^+ and Na^+ ($r = 0.95$), K^+ and Mg^{2+} ($r = 0.99$) and Ca^{2+} and Mg^{2+} ($r = 0.99$) indicate a common erosional source for the input of these components into the atmosphere.

Several studies attribute the increase in chloride (Cl^-) content in snow cover to its release into the atmosphere during coal combustion, as chlorine is a characteristic element of coal [Yudovich, Ketris, 2005]. In such cases, chloride concentrations would significantly exceed those of sodium, resulting in a $[\text{Cl}^-] / [\text{Na}^+]$ ratio much greater than 1. However, across most of the studied area, the $[\text{Cl}^-] / [\text{Na}^+]$ ratio ranges from 0.12 to 15.13, suggesting that chlorine is often not of marine origin.

Additionally, paired correlation analysis reveals a modest but notable relationship between chloride concentrations in snow water and magnesium (Mg^{2+}) ($r = 0.26$) and sodium (Na^+) ($r = 0.31$), both elements typically associated with marine sources, which likely reflects a shared anthropogenic origin for these ions. Further supporting this, the average correlation coefficient between chloride and sulfate (SO_4^{2-}) concentrations is relatively strong ($r = 0.58$), indicating a common pollution source, such as coal burning during the winter season.

The molar ratio of sulfate to chloride ions ($[\text{SO}_4^{2-}] / [\text{Cl}^-]$) is commonly used to determine the origin of atmospheric precipitation composition and to assess atmospheric pollution from industrial emissions [Chudaeva, Chudaev, Yurchenko, 2008]. Most sulfate in the atmosphere is of non-marine origin. For example, in the background area of the Baikal Biosphere Reserve, the $[\text{SO}_4^{2-}] / [\text{Cl}^-]$ ratio does not exceed 3 [Sanina, Sklyarova, Kostin, 2003].

In the present study, the $[\text{SO}_4^{2-}] / [\text{Cl}^-]$ values in snow water range from 0.09 to 0.32, with an average of 0.17. These low ratios support the conclusion that the chloride ions observed in the study area primarily originate from fuel combustion emissions at thermal power plants during the winter season, rather than from marine sources.

The acidity of snow water, as described in the work, is due to the high content of sulfates, which is confirmed by the $[\text{SO}_4^{2-}] / [\text{NO}_3^-]$ ratio equal to 22.1 [Gladun, Shelganova, Mayorova, 2024]. The effectiveness of acidity neutralization at the “Khabarovsk” station showed an excess of neutralizing compounds (K/A ranging from 2 to 5), with the main components being the cations Ca^{2+} and Mg^{2+} . The change in the ratio of $[\text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+] / [\text{Ca}^{2+} + \text{K}^+]$ from 1.8 to 0.8 indicates an increase in the emission of cations Ca^{2+} and K^+ into the atmosphere. The low value of $[\text{Cl}^-] / [\text{Na}^+]$ (from 0.1 to 0.4) suggests a marine origin for the Cl^- ions, which is supported by the change in the $[\text{SO}_4^{2-}] / [\text{Cl}^-]$ ratio from 4 to 6. For Blagoveshchensk, the average value of this ratio was 10.64 [Radomskaya, Yusupov, Pavlova, 2014].

The study [Vasilevich, Beznosikov, Kondratenok, 2011] showed that meltwater in the taiga zone has a K/A ratio of less than 1, increasing from south to north from 0.42 to 0.83 (with an average of 0.58). This indicates a deficiency of neutralizing compounds and a predominance of hydrogen ions, which corresponds to the overall situation in Russia, where cations account for about 30 % of the total ion content, excluding hydroxide ions and hydrogen ions.

In the study [Surkova, Eremina, Zorina, 2005], the authors showed that in the area of the Northeast coast of the Black Sea, the most evident sign of the predominance of continental influence on the chemical composition of precipitation is the high concentrations of SO_4^{2-} and NH_4^+ . Calcium, on the other hand, is present in similar ratios in both marine and continental precipitation.

The presented ratios of major ions indicate a trend in the changing chemical composition of the snow cover across all meteorological stations, with Ca^{2+} becoming the dominant ion. It is known that the main sources of cations Ca^{2+} and Mg^{2+} entering the atmospheric air are aerosols from sea salt, dust

from aeolian deposits, industrial emissions, and suspended particles related to transportation. Sources of NO_x and SO_x emissions include energy and heating facilities, motor vehicles, industry, and municipal solid waste landfills. Sources of NH_3 emissions include agriculture, municipal solid waste landfills, the aftermath of forest fires, and industry [Duan et al., 2016; Vet et al., 2014]. Anions such as sulfates and nitrates typically form in the atmospheric air as a result of the oxidation of SO_2 and NO_2 .

Mg^{2+} and K^+ are correlated with seawater and can enter snowmelt water either through dust deposition or precipitation, as well as via substitution in other minerals such as mirabilite. The low enrichment factor for Mg^{2+} ($\text{EF} = 0.83$) suggests minimal fractionation among its sources, indicating relatively uniform contributions. In contrast, the moderate enrichment of K^+ ($\text{EF} = 13.41$) points to an additional minor source unrelated to sea salt, likely dust. Fractionation of Mg^{2+} and K^+ sources may occur during precipitation processes, which become thermodynamically favorable at low temperatures [Weeks, Ackley, 1986]. While minerals formed from freezing seawater are typically pure stoichiometric phases, natural solid solutions and ionic substitutions can significantly alter the composition of precipitated minerals. For example, Mg^{2+} and K^+ can substitute for other ions in sea salt minerals, such as calcium (Ca^{2+}) in ikaite and sodium (Na^+) in mirabilite.

In seawater, the concentration of Mg^{2+} is roughly five times higher than that of Ca^{2+} , making it easier to detect Ca^{2+} enrichment against the relatively low sea salt baseline. Conversely, mineral dust typically contains more Ca^{2+} than Mg^{2+} . The observed enrichment of Ca^{2+} ($\text{EF} = 28.95$) from atmospheric deposition is attributed to the input of atmospheric dust, where the $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ ratio is substantially greater than 1.

The sources of NO_3^- and NH_4^+ in the snowpack exhibit greater stability compared to sea salt, and their transport patterns are consistent across all studied environments. Both nitrate and ammonium undergo biological transformations within the snowpack, leading to a more uniform distribution and weaker correlation with sea salt. Given that NO_3^- and SO_4^{2-} are primarily anthropogenic pollutants, a correlation between them is expected, as demonstrated in prior studies on aerosols and snow [Toom-Sauntry, Barrie, 2002]. However, the observed correlation in this dataset spans a wide range, reflecting high variability and distinct transport pathways across different environments.

For terrestrial snow, which is most comparable to the coastal/inland studies by Toom-Sauntry and Barrie [Toom-Sauntry, Barrie, 2002] and Yalcin et al. [Yalcin et al., 2006], the $\text{NO}_3^- / \text{SO}_4^{2-}$ ratio ranges from 0.31 to 2.09. This range differs slightly but overlaps with Toom-Sauntry & Barrie's reported values (0.2–0.6) and aligns closely with Yalcin et al.'s ratio of 1.09, which is similar to our average (0.94). Nitrate levels in Barrow are higher than those in Alarte, likely due to the older snow sampled in Barrow compared to the freshly fallen snow analyzed in Alarte. Additionally, the elevated sea salt content in Barrow may promote a more alkaline snowpack pH, enhancing nitric acid absorption and further contributing to the observed nitrate enrichment.

The chemistry of snow nitrates, extensively examined in the literature [Yalcin et al., 2006; Honrath et al., 1999; Honrath et al., 2000], indicates that their relationships with other ions in snow are generally more complex than those of sulfates. This complexity arises because sulfuric acid and sulfate salts are non-volatile, whereas nitric acid is semi-volatile, although nitrate salts themselves are not volatile. As a result, older atmospheric particles can convert nitric acid into less volatile salt forms (e.g., NaNO_3) that become retained within the snowpack. Nitrate behavior is further complicated by the fact that their sources extend beyond sea salt aerosols and chemical losses, potentially involving in-snowpack processes as well. Therefore, the lack of correlation between nitrates and sea salt tracers observed in this study is not unexpected. To fully understand nitrate dynamics, more detailed analyses or additional research are needed, accounting for the temporal evolution of snow samples and variations in photochemical conditions.

Given the influence of snowmelt pH on trace element distribution, we evaluated Pearson correlation coefficients between snow water pH and elemental concentrations (Table 23). Mn, Co, Ni, Cd, and Pb showed negligible dependence on pH, with weak negative correlations ($r = -0.14$, -0.16 , -0.13 , -0.10 , and -0.14 , respectively). Several elements demonstrated moderate positive correlations with pH. Aluminum showed the most pronounced relationship ($r = 0.61$). Mg and Na had moderate associations Mg ($r = 0.55$), Na ($r = 0.43$). K, Fe and Ba showed weaker but significant relationships K ($r = 0.31$), Fe ($r = 0.29$), Ba ($r = 0.22$). This differential behavior suggests varying solubility controls and chemical interactions between these elements and the snow matrix as pH changes. The stronger positive correlations for Na, Mg, and Al may reflect their preferential release under less acidic conditions, while the pH-independent elements likely have solubility controlled by other factors.

We analyzed the relationship between pH and the alkali metals Na, Mg, and K separately. The results indicate a clear positive correlation between pH and these elements, whereas pH appears largely independent of Ca concentrations. This suggests that Na, Mg, and K contribute to neutralizing rainwater in the study area.

Variations in the pH of atmospheric precipitation significantly impact element solubility. According to [Grannas et al., 2007], the solubility of Cr, Ni, and Pb increases twofold or more at pH levels below 5.0. In contrast, highly soluble elements such as K, Ca, Cd, and V show no pH-dependent solubility changes. Given that trace element distribution is influenced by snow water pH, we calculated Pearson correlation coefficients between pH and the concentrations of the studied elements. The most significant positive correlation is observed with SO_4^{2-} ($r = 0.70$). As discussed in detail above, this coefficient should not be interpreted as a direct acidifying effect, but rather as an indication of the co-deposition of industrial pollutants (sulfates) and alkaline dust (rich in Ca^{2+} , Mg^{2+}) from both anthropogenic (e.g., construction) and natural (carbonate soils) sources, in which the cations effectively neutralize sulfuric acid. The correlation with Al ($r = 0.61$) and Mg ($r = 0.55$) also suggests that these elements may contribute to pH neutralization, making them important for assessing the acid-base balance. Na ($r = 0.43$) and Cl^- ($r = 0.52$) also show a positive relationship, which may indicate the influence of marine aerosols and other sources related to atmospheric precipitation. K ($r = 0.31$) and NO_3^- ($r = 0.31$) have moderate positive correlations, which may point to their relationship with changes in pH, possibly due to agricultural activities or other sources. Fe ($r = 0.29$) and Ba ($r = 0.22$) also exhibit weak positive correlations, which may indicate their presence in precipitation, possibly due to soil weathering or anthropogenic sources. The most pronounced negative correlation is observed with Cr ($r = -0.34$), which may indicate differences in sources and deposition processes. Other elements, such as Co ($r = -0.16$), Ni ($r = -0.13$), and Cd ($r = -0.10$), also show weak negative correlations with pH, suggesting that their concentrations are only slightly dependent on the acidity of snow water. For elements such as V ($r = 0.07$), Zn ($r = 0.03$), and Sr ($r = -0.30$), the correlation with pH is virtually absent, indicating their concentrations may be independent of acidity levels.

The correlation coefficients for major ions calculated for all snow samples indicate that Cl and Na are independent of each other, reflecting their different origins. Table 23 shows that Na has a positive correlation with Mg and K ($r = 0.95$ and 0.97 , respectively), and Mg shows a positive correlation with Ca and Fe with Mn ($r = 0.94$ and 0.87 , respectively). This may be related to common sources such as marine aerosol dust or geological processes. At the same time, Cd has a moderate negative correlation with Na and Ca ($r = -0.66$ and -0.80 , respectively), indicating differences in sources or deposition processes. Other elements, including Co, Ni, Cu and Zn, exhibit weak correlations both among themselves and with other elements, suggesting a variety of sources or the influence of multiple factors such as anthropogenic activities or local geological conditions. It is also important to highlight that the primary sources of sodium (Na) are sea salt and atmospheric aerosols, particularly in coastal regions. Mg and Ca originate from mineral sources and dust and may also be related to agricultural activities. Meanwhile, Fe and Mn may come from soil and rocks as well as from industrial emissions. Heavy metals (Cd, Pb, Cu) often have anthropogenic origins related to industrial pollution, vehicular traffic, and other sources.

Table 3. Pearson correlation matrix of element concentrations and ions in atmospheric precipitation ($p < 0.05$)
Таблица 3. Матрица корреляции Пирсона концентраций элементов и ионов в атмосферных осадках ($p < 0,05$)

	Na	Mg	Al	K	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Cd	Ba	Pb	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	pH
Na	1.00																					
Mg		1.00																				
Al			1.00																			
K				1.00																		
Ca					1.00																	
V						1.00																
Cr							1.00															
Mn								1.00														
Fe									1.00													
Co										1.00												
Ni											1.00											
Cu												1.00										
Zn													1.00									
Sr														1.00								
Cd															1.00							
Ba																1.00						
Pb																	1.00					
NH ₄ ⁺																		1.00				
NO ₃ ⁻																			1.00			
Cl ⁻																				1.00		
SO ₄ ²⁻																					1.00	
pH																						1.00

Due to the lack of data on the chemical composition of the snow cover in Crimea, we compared our findings with those from a study on elemental content in rainwater [Grannas et al., 2007], conducted on the Crimean Peninsula over a decade ago. Our enrichment values were found to be an order of magnitude higher. This discrepancy may be attributed to various factors, including increased anthropogenic activities such as rapid urbanization, population growth, and higher vehicle usage, as well as changing meteorological conditions, climate change, and shifts in biogeochemical processes within the ecosystem. Additionally, trace elements can be transported by winds. Studies [Kaya, Tuncel, 1997; Kayukova, 2011] have shown that winds originating from industrial regions play a primary role in carrying dust containing trace elements.

The EF analysis revealed the following element enrichment sequence: $\text{Fe} < \text{V} < \text{Mg} < \text{Cr} < \text{Ba} < \text{Mn} < \text{Ca} < \text{K} < \text{Na} < \text{Pb} < \text{Sr} < \text{Ni} < \text{Co} < \text{Cu} < \text{Zn} < \text{Cd}$. All macroelements, except Mg showed higher soil concentrations than Earth's crustal reference values. The decreasing order of enrichment coefficients for macroelements is: $\text{Na} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$. Discrepancies arise because atmospheric aerosols do not perfectly mirror soil composition. Dust is enriched in Fe/Mn oxides and contains variable proportions of Si, Al_2O_3 , carbonates, and calcite [Topchaya et al., 2020; Stachurski, Zimka, 2000].

As for trace elements, most exhibited $\text{EF} > 500$, with the sequence: $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Co} > \text{Ni} > \text{Sr} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Cr} > \text{Ba} > \text{V} > \text{Fe}$. Notably, Cd has a very high EF of 32 696.28. The striking enrichment factor (EF) of cadmium (Cd) suggests significant anthropogenic contamination, as natural sources alone cannot account for such elevated levels. Several potential local and regional sources may contribute to this enrichment: Past industrial operations in Crimea, such as iron ore processing and coal combustion residues, may have left behind cadmium pollution in the environment; Vehicle-related emissions: Cadmium is released through tire wear, brake pad abrasion, and the combustion of lubricants, making road traffic a notable source of Cd in urban and roadside environments; Agricultural practices: Widely used in Crimean agriculture, phosphate fertilizers often contain cadmium as an impurity. Additionally, the use of sewage sludge and certain older pesticide formulations may introduce Cd into the environment; Industrial emissions from Eastern Europe: Air masses originating from heavily industrialized regions of Ukraine and Russia can transport cadmium-rich particles over long distances, contributing to atmospheric deposition in Crimea; Black Sea shipping: Marine traffic, including fuel combustion and cargo emissions, may also be a source of cadmium pollution in coastal areas.

Other heavy metals, including Zn, Co, Cu and Ni, also display high enrichment factors (EF), pointing to their anthropogenic origins. The EF values of the remaining elements indicate contributions from both natural and anthropogenic sources.

To evaluate how wind conditions affect the chemical composition of snow, we conducted a Pearson correlation analysis between wind speed (both average and gusts) and concentrations of major ions and trace metals in snowmelt water collected between 2021 and 2024. Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} showed strong positive correlations ($r > 0.6$) with both average wind speed and gusts. This suggests that higher wind velocities enhance the atmospheric transport of sea salt aerosols (Cl^- , Na^+) and mineral dust particles (Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+}) from local soils. The particularly strong association with chloride ($r = 0.71$) confirms the marine influence on snow chemistry in coastal Crimea. NH_4^+ , NO_3^- exhibited weak negative correlations ($r \approx -0.4$). This inverse relationship likely reflects their origin from local non-wind-dependent sources such as agricultural activities, vehicle emissions, and industrial processes. The lack of significant correlation of sulfate (SO_4^{2-}) ($r = -0.25$) indicates that sulfate deposition is primarily governed by stationary emission sources (e.g., fossil fuel combustion) rather than wind-driven transport mechanisms. Al, Fe, Mn, Sr, Ba displayed moderate to strong positive correlations ($r = 0.51-0.64$), consistent with their derivation from wind-eroded soil particles. Aluminum ($r = 0.62$) and strontium ($r = 0.64$) showed particularly strong associations, highlighting the importance of local limestone dust in metal transport. Cd, Pb exhibited negative correlations ($r \approx -0.4$), implying that their deposition

patterns are dominated by nearby emission sources (e.g., industrial facilities, urban traffic) rather than atmospheric circulation. V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn showed no significant wind dependence ($|r| < 0.4$), suggesting complex deposition pathways involving both natural weathering and anthropogenic inputs. The robust correlations between wind speed and marine-derived elements (Na^+ , Cl^- , Mg^{2+}) confirm that sea spray is a major source of ions in Crimean snow, particularly during high-wind periods. Strong associations between wind velocity and crustal elements (Al, Ca^{2+} , Fe, Sr) reflect the importance of local soil erosion, especially from carbonate-rich landscapes characteristic of Crimea. The lack of wind correlation for Cd, Pb, and nitrogen compounds suggests these pollutants originate from fixed emission sources with limited atmospheric dispersion.

This study demonstrates that wind speed plays a crucial role in governing the deposition of marine and terrestrial components in Crimean snow, while anthropogenic contaminants follow distinct deposition patterns. The carbonate geology of Crimea strongly influences snow chemistry through dust emissions.

Crimea's snow, though rare, provides a sensitive indicator of rising anthropogenic pressures (urbanization, agriculture, transport). The stark Cd EF increase compared to decade-old rainwater data [Yalcin et al., 2006] underscores accelerating contamination. Alkaline snowmelt may enhance soil carbon sequestration (via Ca^{2+} -organic matter binding), but Cd/Pb accumulation could disrupt microbial communities. Source apportionment (e.g., Pb isotopes for Cd tracing) is critical to mitigate emissions from coal combustion, fertilizers, and traffic.

Snow chemistry data from the Karadag Nature Reserve reveal two critical, synergistic threats to its unique biodiversity: alkaline snowmelt and extreme cadmium (Cd) contamination. Wind-blown carbonate dust from Crimea's limestone geology elevates snow pH, favoring calciphilous plants while suppressing calcifugous species and reducing bioavailability of Fe and Mn, thereby impairing growth of sensitive vegetation on nutrient-poor soils. More alarming is Cd enrichment ($\text{EF} > 32\,000$), among the highest recorded globally. Despite low annual deposition, chronic Cd input leads to bioaccumulation in plants, entering food chains and biomagnifying in predators (insects $\rightarrow$ rodents $\rightarrow$ birds, reptiles, mammals), causing toxicity, reduced reproduction, and population declines. Alkaline conditions may stabilize Cd in organic matter, creating a long-term reservoir and potentially enhancing plant uptake, which represents a dangerous synergy. Though protected from direct land use, Karadag cannot escape atmospheric pollution. Snow, though rare, acts as a sensitive integrator of airborne contaminants, with Cd levels rising sharply since 2006 due to urbanization, phosphate fertilizers, and traffic emissions. While alkaline snowmelt may enhance soil carbon storage, Cd and Pb accumulation disrupt microbial function and nutrient cycling. Urgent action is needed: integrate long-term atmospheric monitoring into conservation planning and conduct isotopic source apportionment (e.g., Pb isotopes) to target emissions from coal, fertilizers, and vehicles. Without intervention, Karadag's biodiversity faces silent erosion, not from habitat loss, but from invisible, accumulating toxins.

Conclusions

The acidity of snowmelt in the studied area is buffered by sulfates and cations, which maintains a weakly alkaline reaction. This is influenced by both natural and anthropogenic sources. High values of the cation to anion ratio ($\text{K/A} > 1$) indicate a positive effect of natural processes on reducing acidity, which is beneficial for the ecosystem. However, anthropogenic factors, such as emissions from coal combustion, significantly impact the chemical composition of snowmelt, as evidenced by the high content of sulfates and chlorides. Comparisons with other regions show that the acid-base status of snowmelt depends on pollution sources and natural conditions, high-lighting the importance of regional studies. The concentration of Mg^{2+} in seawater exceeds that of Ca^{2+} , which explains the enrichment of the latter in snow,

likely from atmospheric dust. The ratio of NH_4^+ to NO_3^- is approximately 0.63, indicating constant sources of these ions in the snow cover. Contrary to expectations, the correlation between nitrates and sulfates shows high variability and different transport pathways. Further research is needed for a better understanding of the interactions affecting the chemical composition of snow.

The results showed that the only element exceeding the maximum allowable concentrations is Cd, indicating contamination. Correlation analysis revealed that the pH of snowmelt is almost uncorrelated with trace elements such as Mn and Pb, while a positive correlation is observed with Na, Mg, and Al, indicating their role in neutralizing rainwater. Changes in the pH of atmospheric precipitation affect the solubility of elements, increasing the bioavailability of elements such as Cr, Ni, and Pb at pH levels below 5.0. Anthropogenic sources of pollution, including industrial impacts, significantly influence the distribution of elements, as evidenced by high EF for Cd and Zn.

This study highlights the value of episodic snowfall as a critical archive of atmospheric pollution in the Mediterranean climates. Key findings include: (1) the first evidence of industrial cadmium contamination ($\text{EF} > 32\,000$) within protected areas of Crimea; (2) identification of coal combustion and fertilizer use as priority targets for pollution control; (3) validation of snow-based monitoring as an effective tool in regions with infrequent precipitation. For future research we recommend: (1) implementing year-round aerosol sampling combined with on-site anemometry to track pollutant transport; (2) using Pb/Cd isotope ratios to differentiate between local and transboundary pollution sources; (3) assessing the role of forest canopy interception and quantify pollutant transfer from snow to soil.

Although constrained by the region's limited snowfall, this research shows that even rare snow events can provide disproportionately valuable insights into anthropogenic impacts on sensitive coastal ecosystems. Addressing these climatic limitations will help refine future monitoring efforts and inform effective pollution mitigation strategies.

Consequently, these findings underscore the importance of monitoring atmospheric precipitation quality and evaluating the effects of human activities on the ecosystem. This will be crucial for developing effective strategies to minimize pollution and safeguard the environment.

References

1. Al-Momani I. F. Trace elements in atmospheric precipitation at Northern Jordan measured by ICP-MS: acidity and possible sources // *Atmospheric Environment*. – 2003. – Vol. 37, iss. 32. – P. 4507–4515. – [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00562-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00562-4)
2. Aničić M., Tasić M., Frontasyeva M. V., Tomašević M., Rajšić S., Mijić Z., Popović A. Active moss biomonitoring of trace elements with *Sphagnum girgensohnii* moss bags in relation to atmospheric bulk deposition in Belgrade, Serbia // *Environmental Pollution*. – 2009. – Vol. 157, iss. 2. – P. 673–679. – <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.08.003>
3. Aristarain A. J., Delmas R. J. Snow chemistry measurements on James Ross Island (Antarctic Peninsula) showing sea salt aerosol modifications // *Atmospheric Environment*. – 2002. – Vol. 36, iss. 4. – P. 765–772. – [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00362-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00362-4)
4. Benassai S., Becagli S., Gragnani R., Magand O., Proposito M., Fattori I., Traversi R., Udisti R. Sea-spray deposition in Antarctic coastal and plateau areas from ITASE traverses // *Annals of Glaciology*. – 2005. – Vol. 41. – P. 32–40. – <https://doi.org/10.3189/172756405781813285>
5. Cao J., Tie X., Dabberdt W. F., Jie T., Zhao Z., An Z., Shen Z., Feng Y. On the potential high acid deposition in northeastern China // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2013. – Vol. 118, iss. 10. – P. 4834–4846. – <https://doi.org/10.1002/jgrd.50381>

6. Chudaeva V. A., Chudaev O. V., Yurchenko S. G. Chemical composition of precipitation in the southern part of the Russian Far East // *Water Resources*. – 2008. – Vol. 35. – P. 58–70. – <https://doi.org/10.1134/s0097807808010077>
7. de Caritat P., Hall G., Gislason S., Belsey W., Braun M., Goloubeva N. I., Olsen H. K., Scheie J. O., Vaive J. E. Chemical composition of Arctic snow: concentration levels and regional distribution of major elements // *Science of The Total Environment*. – 2005. – Vol. 336, iss. 1/3. – P. 183–199. – <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.05.031>
8. Dibb J. E., Ziemba L. D., Luxford J., Beckman P. Bromide and other ions in the snow, firn air, and atmospheric boundary layer at Summit during GSHOX // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2010. – Vol. 10, iss. 20. – P. 9931–9942. – <https://doi.org/10.5194/acp-10-9931-2010>
9. Domine F., Sparapani R., Ianniello A., Beine H. J. The origin of sea salt in snow on Arctic sea ice and in coastal regions // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2004. – Vol. 4, iss. 9/10. – P. 2259–2271. – <https://doi.org/10.5194/acp-4-2259-2004>
10. Duan L., Yu Q., Zhang Q., Wang Z., Pan Y., Larssen T., Tang J., Mulder J. Acid deposition in Asia: Emissions, deposition, and ecosystem effects // *Atmospheric Environment*. – 2016. – Vol. 146. – P. 55–69. – <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.018>
11. Eremina I. D., Grigoriev A. V. Acidity and chemical composition of snow cover in the city of Moscow and the Moscow Region during 1999–2006 // *Lomonosov Geography Journal*. – 2010. – № 3. – P. 55–60. – <https://elibrary.ru/mvxlph>. (in Russian)
12. Gladun I. V., Shelganova A. A., Mayorova L. P. Technogenic pollution of snow cover in the Khabarovsk Territory in the period from 2015 to 2022 // *The Eurasian Scientific Journal*. – 2024. – Vol. 16, nr 3. – Art. 94NZVN324. (in Russian)
13. Glazovsky N. F., Zlobina A. I., Uchvatov V. P. Chemical composition of the snow cover in some parts of the upper Oka basin // *Regional Ecological Monitoring* / eds: V. E. Sokolov [et al.]. – Moscow : Nauka, 1983. – P. 67–86. (in Russian)
14. GN 2.1.5.1315-03. Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm SanPiN 1.2.3685-21 “Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya” : postanovlenie Gl. gos. sanit. vracha RF № 2 ot 28.01.2021 // Ofitsial’nyj internet-portal pravovoj informatsii. – 2021. – URL: [http:// publication.pravo.gov.ru/document/0001202102030022?index=1](http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202102030022?index=1) (data obrashcheniya: 12.02.25).
15. Grannas A. M., Jones A. E., Dibb J. [et al.]. An overview of snow photochemistry: evidence, mechanisms and impacts // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2007. – Vol. 7, iss. 16. – P. 4329–4373. – <https://doi.org/10.5194/acp-7-4329-2007>
16. Gurov K. I., Kotelyanets E. A. Distribution of trace metals (Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Sr, Ti, Mn and Fe) in the vertical section of bottom sediments in the Sevastopol Bay (Black Sea) // *Physical Oceanography*. – 2022 – Vol. 29, iss. 5. – P. 491–507 – <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2022-5-491-507>
17. Honrath R. E., Peterson M. C., Dziobak M. P., Dibb J. E., Arsenault M. A., Green S. A. Release of NO_x from sunlight-irradiated mid-latitude snow // *Geophysical Research Letter*. – 2000. – Vol. 27, iss. 15. – P. 2237–2240. – <https://doi.org/10.1029/1999GL011286>
18. Honrath R. E., Peterson M. C., Guo S., Dibb J. E., Shepson P. B., Campbell B. Evidence of NO_x production within or upon ice particles in the Greenland snowpack // *Geophysical Research Letter*. – 1999. – Vol. 26, iss. 6. – P. 695–698. – <https://doi.org/10.1029/1999GL900077>

19. Hunova I., Kurfürst P., Schreiberová M., Vlasáková L., Škáchová H. Atmospheric deposition of lead and cadmium in a Central European country over the last three decades // *Atmosphere*. – 2023. – Vol. 14, iss. 1. – Art. 19. – <https://doi.org/10.3390/atmos14010019>
20. Karpachevskiy L. O., Zubkova T. A., Proysler T., Kennel M., Gittel G., Gorcharuk N. Yu., Minaeva T. Yu. Impact of a complex spruce forest canopy on the chemical composition of precipitation // *Lesovedenie*. – 1998. – № 1. – S. 50–59.
21. Katanayeva V. G., Selyanin A. V. Estimation of heavy metals content and their inflow into the salt lakes of forest-steppe in the right-bank Priishimye // *Vestnik Tyumenskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ekologiya i Prirodopol'zovanie*. – 2011. – № 5. – S. 39–48. – <https://elibrary.ru/ofyood> (in Russian)
22. Kaya G., Tuncel G. Trace element and major ion composition of wet and dry deposition in Ankara, Turkey // *Atmospheric Environment*. – 1997. – Vol. 31, iss. 23. – P. 3985–3998. – [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00221-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00221-5)
23. Kayukova E. P. Features of the chemical composition of precipitation of the Crimean training site of SPbSU // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. Ser. 7, Geologiya. Geografiya* – 2011. – № 3. – C. 26–42. (in Russian)
24. Kotova E. I., Topchaya V. Yu., Novikova Yu. V. Geobiochemical characteristics of snow cover on the White Sea coast in 2021 and 2022 // *Water Resources*. – 2023. – Vol. 50, iss. 1. – P. 80–88. – <https://doi.org/10.1134/S0097807823700306>
25. Krnavek L., Simpson W. R., Carlson D., Domine F., Douglas T. A., Sturm M. The chemical composition of surface snow in the Arctic: Examining marine, terrestrial, and atmospheric influences // *Atmospheric Environment*. – 2012. – Vol. 50. – P. 349–359. – <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.033>
26. Kulikova V. K. Leaching of nutrient elements from tree crowns in spruce and birch-spruce plantations of Karelia // *Les i pochva : Trudy vsesoyuz. nauch. konf. po les. pochvovedeniyu*, 15–19 iyulya 1965 g. / otv. red. N. V. Orlovskij. – Krasnoyarsk : Kn. izd-vo, 1968. – S. 288–295.
27. Kurosaki Y., Matoba S., Matsumoto M., Yamasaki T., Hendriksen I., Iizuka Yo. Characteristics of snowpack chemistry on the coastal region in the northwestern Greenland Ice Sheet facing the North Water, EGU sphere : [preprint]. – 2025. – <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1560>
28. Lipatnikova O. A., Lubkova T. N., Yablonskaya D. A., Dmitriev L. A. Geokhimicheskaya kharakteristika vod rodnikov yuzhnoi chasti gorodskogo okruga Balashikha (Moskovskaya oblast') // *Vodnye Resursy*. – 2024. – T. 51, № 1. – S. 101–114. – <https://doi.org/10.31857/S0321059624010095>
29. Makarov V. N., Torgovkin N. V. Ecological and geochemical characteristics of the snow cover in the Yakutsk city (Central Siberia) // *Ice and Snow*. – 2021. – Vol. 61, iss. 3. – P. 420–430. – <https://doi.org/10.31857/S2076673421030098>
30. Moody J. L., Samson P. J. The influence of atmospheric transport on precipitation chemistry at two sites in the midwestern United States // *Atmospheric Environment* (1967). – 1989. – Vol. 23, iss. 10. – P. 2117–2132. – [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(89\)90173-X](https://doi.org/10.1016/0004-6981(89)90173-X)
31. Nickus U. Ion content of the snowpack on Franz Josef Land, Russia // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. – 2003. – Vol. 35, iss. 3. – P. 399–408. – <https://www.elibrary.ru/lzkssh>
32. Pham C. N., Gorbunov R., Lapchenko V., Gorbunova T., Tabunshchik V. Macro- and microelements and the impact of sub-mediterranean downy oak forest communities on their composition in rainwater // *Forests*. – 2024. – Vol. 15, iss. 4. – Art. 612. – <https://doi.org/10.3390/f15040612>

33. Poissant L., Schmit J.-P., Béron P. Trace inorganic elements in rainfall in the Montreal Island // *Atmospheric Environment*. – 1994. – Vol. 28, iss. 2. – P. 339–346. – [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)90109-0](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)90109-0)
34. Pristova T. A., Vasilevich M. I. Chemical composition of snow cover in middle-taiga forest ecosystems in the Komi Republic // *Geochemistry International*. – 2011. – Vol. 49, iss. 2. – P. 199–206. – <https://doi.org/10.1134/s001670291012102x>
35. Radomskaya V. I., Yusupov D. V., Pavlova L. M. Macrocomponent composition of snow cover of Blagoveshchensk city // *Voda: khimiya i ekologiya*. – 2014. – № 8. – S. 95–103. – <https://www.elibrary.ru/stwqut> (in Russian)
36. RD 52.04.186-89. Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery : data vved. 1991-07-01 / razrab. Gos. kom. SSSR po gidrometeorologii i M-vom zdravookhraneniya SSSR // *Kodeks : el. fond pravovykh i normat.-tekhn. dokumentov*. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200036406?ysclid=mqpe3uv741387816858> (data obrashcheniya: 12.02.25).
37. Sanina N. B., Sklyarova O. A., Kostin S. B. Geochemical study of snow cover in the Baikal Biosphere Preserve (in connection with degrading fir trees on the northern slope of the Khamar-Daban Mountain Ridge) // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. – 2003. – № 2. – S. 120–129. – <https://www.elibrary.ru/ndnuun> (in Russian)
38. Stachurski A., Zimka J. R. Atmospheric input of elements to forest ecosystems: a method of estimation using artificial foliage placed above rain collectors // *Environmental Pollution*. – 2000. – Vol. 110, iss. 2. – P. 345–356. – [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00290-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00290-0)
39. Surkova G. V., Eremina I. D., Zorina S. A. Vliyaniye kontinental'nykh i morskikh istochnikov na khimicheskij sostav letnikh atmosferykh osadkov severo-vostochnogo poberezh'ya Chernogo morya // *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa / Mor. gidrofiz. in-t RAN*. – Sevastopol' : MGI, 2005. – № 12. – S. 208–214. – <https://www.elibrary.ru/tgyvwf>
40. Toom-Sauntry D., Barrie L. A. Chemical composition of snowfall in the high Arctic: 1990–1994 // *Atmospheric Environment*. – 2002. – Vol. 36, iss. 15/16. – P. 2683–2693. – [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00115-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00115-2)
41. Topchaya V. Yu., Kotova E. I., Starodymova D. P., Chechko V. A. Distribution, material and chemical composition of sedimentary matter of rainfall on the territory of the Kaliningrad Region RF // *Advances in Current Natural Sciences* – 2020. – № 1. – S. 47–53. – <https://doi.org/10.17513/use.37320> (in Russian).
42. Trushkina L. Yu., Trushkin A. G., Demyanova L. M. Gigiena i ekologiya cheloveka. – 4-e izd. – Moskva : Prospekt, 2006 – 527 p.
43. Vasilevich M. I., Beznosikod [i. e. Beznosikov] V. A., Kondratenok B. M. Chemical composition of snow cover in the taiga zone of the Komi Republic // *Water Resources*. – 2011. – Vol. 38, iss. 4. – P. 530–542. – <https://doi.org/10.1134/S0097807811040130>
44. Vet R., Artz R. S., Carou S. [et al.]. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus // *Atmospheric Environment*. – 2014. – Vol. 93. – P. 3–100. – <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.060>
45. Vinogradov A. P. Vvedenie v geokhimiyu okeana. – Moskva : Nauka, 1967. – 215 p.
46. Weeks W. F., Ackley S. F. The growth, structure, and properties of sea ice // *The Geophysics of sea ice* / ed. N. Untersteiner. – New York : Plenum Press, 1986. – P. 9–161. – (NATO ASI Series. Ser. B, Physics ; vol. 146). – https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5352-0_2

47. Xue H., Chen W., Li M., Liu B., Li G., Han X. Assessment of major ions and trace elements in snow: A case study across northeastern China, 2017–2018 // *Chemosphere*. – 2020. – Vol. 251. – Art. 126328 – <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126328>
48. Yalcin K., Wake C. P., Dibb J. E., Whitlow S. I. Relationships between aerosol and snow chemistry at King Col, Mt. Logan Massif, Yukon, Canada // *Atmospheric Environment*. – 2006. – Vol. 40, iss. 37. – P. 7152–7163. – <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.028>
49. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. Toxic trace elements in coal. – Ekaterinburg : Institute of Geology Komi SC UB RAS, 2005. – 655 p. (in Russian)
50. Zverev V. P., Varvanina O. Yu., Putilina V. S. Zakonomernosti izmeneniya sostava atmosferykh osadkov na territorii Rossii // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. – 1997. – № 5. – S. 30–38.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ КРЫМА: НА ПРИМЕРЕ КАРАДАГСКОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА

Фам К. Н.^{1*}, Горбунов Р. В.¹, Лапченко В. А.², Горбунова Т. Ю.¹, Табунщик В. А.¹

¹ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,

г. Севастополь, Российская Федерация,

²Карадагская научная станция им. Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН – филиал ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН»,

г. Феодосия, Российская Федерация,

e-mail: famkn@ibss-ras.ru

Аннотация: Целью исследования является анализ химического состава снежного покрова и распределения макроэлементов в нём на территории Карадагского природного заповедника (Крым), где снегопады редки. Пробы снега, отобранные в зимний период с 2021 по 2024 год на фоновой станции экологического мониторинга, проанализированы на содержание ионов и кислотность. Выявлено, что кислотность варьирует от 6,00 до 7,46 с преобладанием сульфатов, что свидетельствует об антропогенном влиянии. Химический состав определяется как природными, так и антропогенными факторами. Высокое соотношение катионов к анионам указывает на буферные процессы, снижающие кислотность, что может положительно влиять на экосистему. Результаты подчёркивают необходимость мониторинга атмосферных осадков для оценки антропогенных воздействий.

Ключевые слова: химический состав, снежный покров, лесные экосистемы, Крым, Карадагский природный заповедник

Сведения об авторах

Фам Кам Ньунг

кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории ландшафтной экологии и геоматики, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: famkn@ibss-ras.ru

Горбунов Роман Вячеславович	доктор географических наук, директор, главный научный сотрудник лаборатории ландшафтной экологии и геоматики, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: gorbunov@ibss-ras.ru
Лапченко Владимир Александрович	научный сотрудник отдела изучения биоразнообразия и экологического мониторинга, Карадагская научная станция им. Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН – филиал ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», ул. Науки, 24, пгт Курортное, Феодосия, 298188, Российская Федерация, e-mail: ozon.karadag@gmail.com
Горбунова Татьяна Юрьевна	кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории ландшафтной экологии и геоматики, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: gorbunovatyu@ibss-ras.ru
Табунщик Владимир Александрович	кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории ландшафтной экологии и геоматики, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: tabunshchik@ibss-ras.ru

Поступила в редакцию 20.10.2025

Принята к публикации 25.04.2026

ПРОБЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ
И МОРСКАЯ РАДИОХЕМОЭКОЛОГИЯ

УДК 574.58:579.22

DOI: [10.21072/eco.2026.11.2.07](https://doi.org/10.21072/eco.2026.11.2.07)

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АКВАТОРИИ КЕРЧЕНСКОГО
ПРОЛИВА И ЧЕРНОМОРСКОГО ПРЕДПРОЛИВЬЯ СПУСТЯ ТРИ МЕСЯЦА
ПОСЛЕ АВАРИИ ТАНКЕРОВ В ДЕКАБРЕ 2024 Г. (ПО МАТЕРИАЛАМ
134-ГО РЕЙСА НИС «ПРОФЕССОР ВОДЯНИЦКИЙ»)

Бурдиян Н. В., Дорошенко Ю. В., Зиновьева Е. В.

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

Аннотация: Микробиологические процессы в водных экосистемах играют решающую роль в процессе самоочищения акваторий от нефтяного загрязнения. В ходе 134-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» получены количественные характеристики аборигенных гетеротрофных и углеводородокисляющих микроорганизмов в поверхностном слое воды и донных отложениях акватории Керченского пролива и прилегающей черноморской акватории спустя три месяца после аварийного разлива мазута в результате крушения танкеров «Волгонефть» в декабре 2024 г. Показано, что численность гетеротрофных микроорганизмов (ГБ) в поверхностном слое воды колебалась от 10^2 до 10^5 кл./мл, в донных отложениях – от 10^3 до 10^7 кл./г. Численность углеводородокисляющих микроорганизмов (УОБ) в поверхностном слое воды варьировала от 10 до 10^2 кл./мл, в донных отложениях – от $7,5 \times 10$ до $4,5 \times 10^3$ кл./г. Максимальные значения численности УОБ в донных отложениях зафиксированы на двух станциях, расположенных непосредственно в акватории пролива. Полученные результаты по численности УОБ, в подавляющем большинстве, свидетельствуют о низком потенциале бактериального самоочищения компонентов морской среды. Между глубиной места отбора проб и численностью анализируемых бактерий выявлена линейная корреляционная зависимость: положительная для ГБ ($r = 0,66$; $\alpha < 0,05$) и отрицательная для УОБ ($r = -0,27$; $\alpha < 0,05$). Накопительные культуры, выделенные из донных отложений трёх участков исследуемой акватории, показали неоднозначный рост на мазуте, нефти и дизельном топливе. Полученные результаты фоновых исследований в дальнейшем могут быть использованы для сравнительного анализа состояния компонентов водной среды Керченского пролива и прилегающей черноморской акватории при экологическом мониторинге последствий аварийного разлива мазута.

Ключевые слова: Чёрное море, Керченский пролив, углеводородокисляющие бактерии, донные отложения, мазут

Введение

Керченский пролив представляет собой ключевой транспортный маршрут, связывающий порты Азовского моря, а также бассейны рек Дон и Волга с Чёрным и Средиземным морями. Ширина пролива колеблется от 4,5 до 15 км, наибольшая глубина составляет 18 метров. Важные порты пролива — Керченский и Кавказский морские порты, основной грузооборот которых приходится на нефтеналивные грузы, что существенно повышает риски возникновения аварийных ситуаций. Одной из последних аварий в Керченском проливе стал разлив мазута 15 декабря 2024 г. Авария произошла в результате разлома корпусов двух нефтяных танкеров — «Волгонефть-212» и «Волгонефть-239» во время шторма. Окончательный объём аварийной утечки мазута до сих пор не установлен. Однако известно, что показатели разлива нефтепродуктов

в 2024 г. превышают значения аналогичной катастрофы, произошедшей в Керченском проливе в ноябре 2007 г. вследствие крушения танкера «Волгонетфть-139», в результате которой в акваторию попало около 1,3 тыс. т мазута [Tikhonova, Soloveva, Burdiyan, 2021].

При ликвидации последствий загрязнения нефтью и нефтепродуктами очистка водных объектов является одной из самых сложных и трудоёмких задач, что обусловлено динамичностью водной среды и сложностью процессов трансформации углеводородов в ней [Сколубович Ю., Сколубович А., Цыба, 2025]. В процессе самоочищения морей от нефтяного загрязнения ведущее положение занимает биологический фактор, решающую роль в котором играют микробиологические процессы [Миронов, 1971]. К примеру, за полтора месяца в лабораторных условиях микробное сообщество в жидкой культуре может разложить до 90 % углеводородов [Cameotra, Singh, 2008]. Углеводородоокисляющие бактерии, основные деструкторы нефти в морской среде, способны усваивать практически весь ряд нефтяных углеводородов, включая самые тяжёлые и токсичные соединения, в то же время скорость деградации и необходимые для этого условия варьируют в большей степени [Dash et al., 2013]. Чаще всего в районах с сильным нефтяным загрязнением выделяют бактерии, принадлежащие к роду *Arthrobacter*, *Brevibacterium*, *Corynebacterium*, *Mycobacterium*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus* [Богатыренко и др., 2022].

Целью нашей работы было получить количественные характеристики аборигенной углеводородоокисляющей микрофлоры и гетеротрофной группы бактерий в поверхностном слое воды и донных отложениях акватории Керченского пролива и прилегающей черноморской акватории.

Материалы и методы

Материалом для настоящей работы послужили пробы воды и донных отложений, отобранные в акватории Керченского пролива и черноморского предпроливья в ходе 134-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» в марте 2025 г., согласно схеме станций (рис. 1). Для микробиологических работ пробы воды отбирали в стерильные пробирки объёмом 50 см³, донных отложений — в стерильные банки. В пробах определяли численность гетеротрофных (ГБ) и углеводородоокисляющих (УОБ) микроорганизмов. Определение численности бактерий проводили методом предельных десятикратных разведений с использованием жидких элективных сред с учётом солёности воды. Для гетеротрофных бактерий применяли среду с пептоном [Биологические аспекты ... , 1988]. Для углеводородоокисляющих бактерий использовали среду Ворошиловой — Диановой [Ворошилова, Дианова, 1952], в которую в качестве единственного источника углерода и энергии добавляли стерильную нефть (1 % от объёма). Наиболее вероятное число УОБ в донных отложениях в единице объёма рассчитывали по таблице Мак-Креди (в трёх повторностях), основанной на методе вариационной статистики [Практикум по микробиологии, 2005]. Учёт остальных групп бактерий проводили методом предельных разведений [Практикум по микробиологии, 2005]. Инкубацию посевов проводили в судовой лаборатории при температуре 18–20 °С.

Способность и интенсивность роста выделенных бактериальных культур на различных источниках углерода определяли посевом полученных накопительных культур бактерий на среду Ворошиловой — Диановой с последующим добавлением различных стерильных источников углерода, в частности сырой нефти, дизельного топлива и мазута. Накопительные культуры исследуемых групп бактерий из донных отложений были получены однократно, станции отбора проб отличались по удалённости от места аварии: самая дальняя станция в акватории предпроливья (ст. 360), ст. 370 «Т» — в 600 м от места затонувшего танкера (ближе подойти не представлялось возможным по техническим причинам), ст. 362 — непосредственно в акватории Керченского пролива, недалеко от косы Тузла (рис. 1). Рост накопительных культур на указанных источниках оценивали визуально.

В ходе экспедиции для микробиологического анализа было отобрано по 13 проб воды и донных отложений.

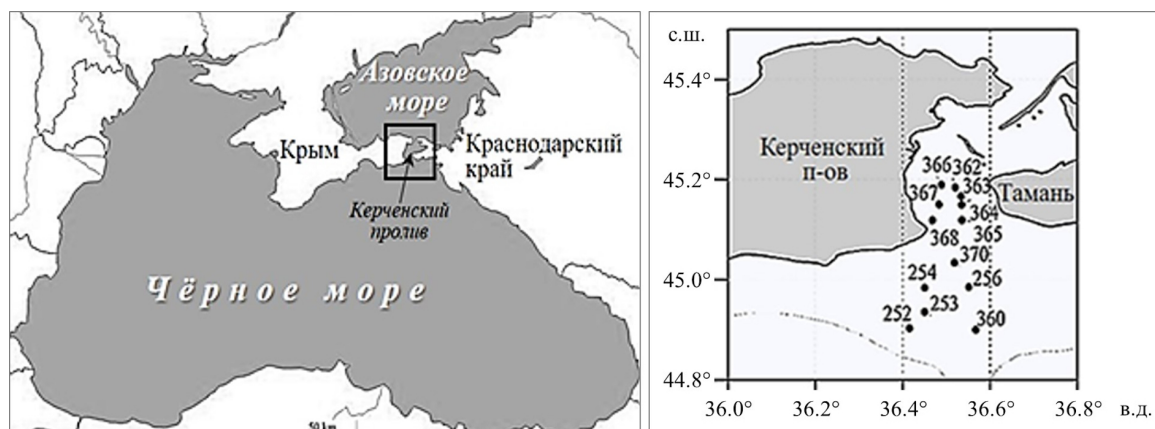


Рис. 1. Расположение станций отбора проб в Керченском проливе и прилегающей черноморской акватории (134-й рейс НИС «Профессор Водяницкий», март 2025 г.)

Результаты

Гетеротрофная микробиота — важный компонент биоценозов любых водных экосистем, его основная функция — ассимиляция и трансформация органических соединений, в том числе загрязняющих веществ антропогенного происхождения. Численность ГБ в поверхностном слое воды Керченского пролива варьировала от 10^2 до 10^5 кл./мл (рис. 2). Максимум выделен на ст. 368, на порядок меньшее число ГБ было зафиксировано на ст. 366. В остальных пробах численность ГБ составляла 10^3 кл./мл. В поверхностных водах прилегающей акватории численность ГБ колебалась в пределах 10^2 – 10^4 кл./мл (рис. 2). Максимальный показатель численности ГБ определён на ст. 254. Минимум ГБ выявлен на ст. 370 «Т», ближайшей к затонувшим танкерам.

Углеродоокисляющие микроорганизмы в поверхностном слое воды Керченского пролива и прилегающей акватории были выявлены повсеместно, численность УОБ колебалась в диапазоне от 10 до 10^2 кл./мл (рис. 2). Непосредственно в акватории пролива минимум численности УОБ выявлен на ст. 362 и 365. В остальных пробах число УОБ составляло 100 кл./мл. Наибольшие количественные показатели для УОБ в прилегающей к проливу акватории получены на станции (370 «Т»), ближайшей к месту аварии, и на ст. 254, в остальных пробах численность УОБ не превышала 10 кл./мл. В целом в исследуемой акватории в 54 % проб численность УОБ была в пределах второго порядка.

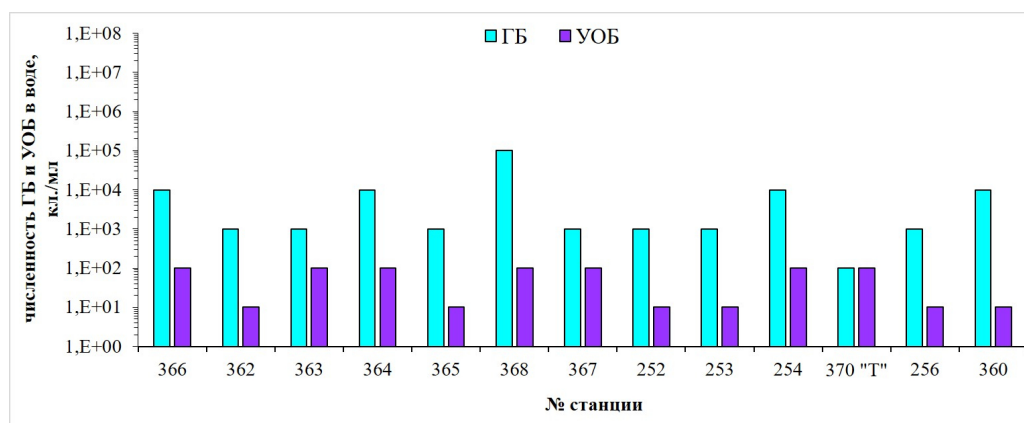


Рис. 2. Численность исследуемых групп бактерий в поверхностном слое воды Керченского пролива (134-й рейс НИС «Профессор Водяницкий»)

Глубина на станциях отбора донных отложений колебалась от 13 до 45 м. Донные отложения в основном были представлены серыми илами, также наблюдались пески и ракушечники. Численность ГБ в донных отложениях Керченского пролива варьировала от 10^3 до 10^7 кл./г (рис. 3). Максимум выделен на ст. 366, на порядок ниже численность ГБ на ст. 363. Минимум ГБ выявлен на ст. 362. На остальных станциях количественные показатели ГБ варьировали в пределах одного порядка: 10^4 – 10^5 кл./г. В донных отложениях черноморского предпроливья численность ГБ колебалась в пределах 10^4 – 10^5 кл./г. Максимум ГБ зафиксирован на ст. 252. На остальных станциях численность ГБ была в пределах четвертого порядка.

УОБ обнаружены во всех пробах донных отложений. Диапазон численности УОБ в донных отложениях Керченского пролива, отобранных с глубин от 10 до 17 м, колебался от $7,5 \times 10$ до $4,5 \times 10^3$ кл./г (рис. 3). Максимальные показатели ($4,5 \times 10^3$ кл./г) указанной группы бактерий зафиксированы на ст. 365 и 366. Минимум УОБ выделен на ст. 367, на остальных станциях численность УОБ варьировала от $1,5 \times 10^2$ до $9,5 \times 10^2$ кл./г. В донных отложениях, прилегающей к проливу акватории (станции № 252, 253, 254, 256, 360 и 370), на глубинах от 24 до 45 м численность УОБ колебалась от $9,5 \times 10$ до $9,5 \times 10^2$ кл./г. Минимум выделен на ст. 254. На станции (370 «Т»), ближайшей к месту аварии, число УОБ составляло 450 кл./г. На оставшихся станциях численность УОБ была равнозначной: $2,5 \times 10^2$ кл./г. Как отмечено [Мишустина, Щеглова, Мицкевич, 1985], колебания численности УОБ в донных отложениях прибрежных и открытых областей водных экосистем довольно значительно варьируют: от 10 до 10^9 кл./г. Полученные нами результаты по численности ГБ и УОБ схожи с результатами оценки нефтяного загрязнения Керченского пролива после аварии судов 11 ноября 2007 г. [Еремеев и др., 2008].

Между глубиной места отбора проб и численностью анализируемых бактерий выявлена линейная корреляционная зависимость: положительная для ГБ ($r = 0,66$; $\alpha < 0,05$) и отрицательная для УОБ ($r = -0,27$; $\alpha < 0,05$). Показано [Wang et al., 2011], что возрастание численности ГБ с глубиной может быть связано с множеством факторов, в том числе и с увеличением поступления углерода.

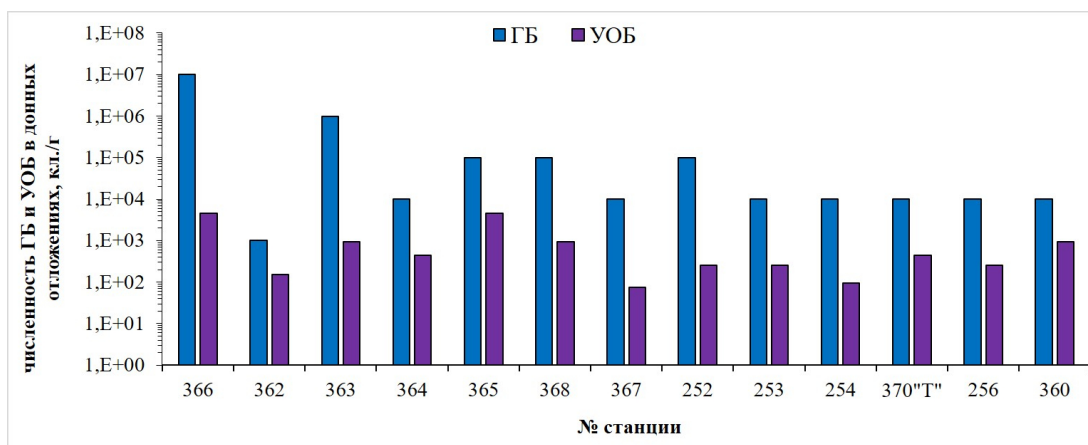


Рис. 3. Численность исследуемых групп бактерий в донных отложениях Керченского пролива (134-й рейс НИС «Профессор Водяницкий»)

В поверхностном слое воды процентная доля УОБ от количества ГБ варьировала от 0,1 до 10 %, за исключением ст. 370 «Т», ближайшей к месту аварии, где способность к деградации нефтяных углеводородов показало всё сообщество выселяемых ГБ, что может свидетельствовать об адаптации гетеротрофного сообщества микроорганизмов в районе ст. 370 «Т» к нефтепродуктам и протекающим процессам самоочищения в поверхностном слое воды, в то же время следует отметить низкую численность ГБ в указанном районе. Исследовано [Еремеев и др., 2008;

Мишустина, Щеглова, Мицкевич, 1985], что в районах с хроническим нефтяным загрязнением численность УОБ в воде колеблется в пределах 10^3 – 10^5 кл./мл и составляет от 35 до 80 % от количества ГБ. В незагрязнённых акваториях доля УОБ составляет до 7 % от общего количества ГБ [Студеникина, Толоконникова, Воловик, 2002]. В донных отложениях доля УОБ от общей численности ГБ варьировала, как в чистых акваториях: от 0,1 до 10 %, что может быть связано с зональным распределением мазута на дне.

В период отбора проб температура воды в поверхностном горизонте колебалась от 8,52 до 10,0 °С, а в придонном — от 8,3 до 9,7 °С. Не выявлена зависимость между температурой воды и численностью бактерий в поверхностном слое исследуемой нами акватории. По всей видимости, зафиксированные значения температуры воды несколько ниже оптимальных для активного развития большинства УОБ. В частности, для развития УОБ и интенсификации очищения воды от нефти оптимальными являются мезофильные условия (диапазон от +20 до +28 °С). При температуре от +6 до +15 °С интенсивность окисления нефти снижается в 2,5–4,0 раза по сравнению с оптимальной температурой. При +37 °С рост бактерий ограничивается, а разложение нефти замедляется [Квасников, Ключникова, 1981]. В то же время показано [Копытов, 1983], что действие температуры наиболее существенно проявляется в первые часы и сутки после внесения нефти в воду, далее наблюдается прогрессирующее снижение как скорости процесса биodeградации нефти, так и степени влияния на него повышенных температур.

В связи с тем, что донные отложения являются более консервативной средой, чем подвижные слои воды, был проанализирован рост микроорганизмов на накопительных культурах из проб грунта на различных станциях. Оказалось, что обильный рост, указывающий на адаптацию микробиоты к нефти и нефтепродуктам, отмечен только у культур из пробы ст. 362, расположенной в акватории Керченского пролива. Следует отметить, что донные отложения на этой станции были отобраны с наименьшей глубины (11 м), по сравнению с глубиной на ст. 360 и 370 «Т» (45 и 24 м соответственно). Микробиота, изолированная из донных отложений на станции, максимально приближенной к месту аварии (ст. 370 «Т»), показала скудный рост на всех источниках углерода, что свидетельствует о слабом углеводородокисляющем потенциале микрофлоры (табл. 1), что можно объяснить очаговым распределением мазута на дне акватории. По всей видимости, отбор данной пробы донных отложений был произведён на незагрязнённом участке дна.

Таблица 1

Рост накопительных культур бактерий с добавлением различных источников углерода

Накопительные культуры бактерий из станций (№)	Источник углерода		
	Мазут	Дизельное топливо	Нефть
360	++	++	++
362	+++	+++	+++
370 «Т»	+	+	+

Примечание: «+++» — обильный рост; «++» — умеренный рост; «+» — скудный рост.

Выводы

Получены количественные характеристики аборигенных гетеротрофных и углеводородокисляющих микроорганизмов в поверхностном слое воды и донных отложений акватории Керченского пролива и прилегающей черноморской акватории в марте 2025 г., спустя три месяца после аварийного разлива мазута. Численность ГБ в поверхностном слое воды колебалась

от 10^2 до 10^5 кл./мл, в донных отложениях — от 10^3 до 10^7 кл./г. Численность УОБ в поверхностном слое воды варьировала от 10 до 10^2 кл./мл, в донных отложениях — $7,5 \times 10$ до $4,5 \times 10^3$ кл./г. Максимальные значения ($4,5 \times 10^3$ кл./г) численности УОБ в донных отложениях зафиксированы на ст. 365 и 366, расположенных непосредственно в акватории пролива. Полученные результаты по численности УОБ в подавляющем большинстве свидетельствуют о низком потенциале бактериального самоочищения компонентов морской среды. Выявлена линейная корреляционная зависимость между численностью ГБ и глубиной на станциях отбора проб ($r = 0,66$; $\alpha < 0,05$), в то же время корреляционный анализ показал слабую отрицательную взаимосвязь между глубиной на станциях отбора проб и численностью УОБ ($r = -0,27$; $\alpha < 0,05$). Накопительные культуры, выделенные из донных отложений трёх участков исследуемой акватории, показали неоднозначный рост на мазуте, нефти и дизельном топливе. Микробиота, изолированная из донных отложений ближайшей к месту аварии ст. 370 «Т», не обладала выраженным углеводородокисляющим потенциалом. Полученные результаты фоновых исследований в дальнейшем могут быть использованы для сравнительного анализа состояния компонентов водной среды Керченского пролива и прилегающей черноморской акватории при экологическом мониторинге последствий аварийного разлива мазута.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудника лаборатории хемотрологии отдела радиационной и химической биологии младшего научного сотрудника Зарипову К. М. за помощь в отборе проб. Работы проводились в ЦПК НИС «Профессор Водяницкий» в рамках направления Государственного задания ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ: «Комплексный мониторинг состояния морской среды и её способности к самоочищению в прибрежных районах Республики Крым и Краснодарского края после разлива нефтепродуктов в декабре 2024 г.» (FNNZ-2026-0016).

Список литературы

1. Биологические аспекты нефтяного загрязнения морской среды / АН УССР, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского ; под общ. ред. О. Г. Миронова. — Киев : Наук. думка, 1988. — 247 с.
2. Богатыренко Е. А., Ким А. В., Полоник Н. С., Дункай Т. И., Пономарева А. Л., Дашков Д. В. Психротрофные углеводородокисляющие бактерии, выделенные из донных осадков залива Петра Великого Японского моря // Океанология. — 2022. — Т. 62, № 3. — С. 439–450. — <https://doi.org/10.31857/S0030157422030029>
3. Ворошилова А. А., Дианова Е. В. Окисляющие нефть бактерии — показатели интенсивности биологического окисления нефти в природных условиях // Микробиология. — 1952. — Т. 21, № 4. — С. 408–412.
4. Еремеев В. Н., Миронов О. Г., Алёмов С. В., Бурдиян Н. В., Шадрин Т. В., Тихонова Е. А., Волков Н. Г., Истомина М. И. Предварительные результаты оценки нефтяного загрязнения Керченского пролива после аварии судов 11 ноября 2007 г. // Морской биологический журнал. — 2008. — Т. 7, № 3. — С. 15–24. — <https://elibrary.ru/tynttp>
5. Квасников Е. И., Ключникова Т. М. Микроорганизмы — деструкторы нефти в водных бассейнах. — Киев : Наук. думка, 1981. — 131 с.
6. Копытов Ю. П. Влияние температуры на скорость биodeградации нефти в морской воде // Экология моря / АН УССР, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. — Киев : Наук. думка, 1983. — Вып. 14. — С. 75–80. — <https://elibrary.ru/yurckl>
7. Миронов О. Г. Нефтеокисляющие микроорганизмы в море. — Киев : Наук. думка, 1971. — 335 с.
8. Мишустина И. Е., Щеглова И. К., Мицкевич И. Н. Морская микробиология : учеб. пособие. — Владивосток : Изд-во Дальневост. ун-та, 1985. — 184 с.

9. Практикум по микробиологии : учеб. пособие / под ред. А. И. Нетрусова. – Москва : Академия, 2005. – 608 с.
10. Сколубович Ю. Л., Сколубович А. Ю., Цыба А. А. Последствия техногенных катастроф и их ликвидации // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2025. – № 2. – С. 81–90. – <https://doi.org/10.22227/2311-1518.2025.2.81-90>
11. Студеникина Е. И., Толоконникова Л. И., Воловик С. П. Микробиологические процессы в Азовском море в условиях антропогенного воздействия. – Москва : Нац. рыб. ресурсы, 2002. – 168 с.
12. Cameotra S. S., Singh P. Bioremediation of oil sludge using crude biosurfactants // International Biodeterioration & Biodegradation. – 2008. – Vol. 62, iss. 3. – P. 274–280. – <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2007.11.009>
13. Dash H. R., Mangwani N., Chakraborty J., Kumari S., Das S. Marine bacteria: potential candidates for enhanced bioremediation // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2013. – Vol. 97, iss. 2. – P. 561–571. – <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4584-0>
14. Tikhonova E. A., Soloveva O. V., Burdiyan N. V. Assessment of the pollution by organic substances of water and sea bottom sediments of the Kerch Strait and the adjacent Azov–Black Sea water area // Processes in GeoMedia / ed. T. Chaplina. – Cham, Switzerland : Springer Nature, 2021. – Vol. 3. – P. 285–293. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-69040-3_27
15. Wang J., Soininen J., Zhang Y., Wang B., Yang X., Shen J. Wang J. Contrasting patterns in elevational diversity between microorganisms and macroorganisms // Journal of Biogeography. – 2011. – Vol. 38, iss. 3. – P. 595–603. – <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02423.x>

MICROBIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE WATER AREA OF THE KERCH STRAIT AND THE BLACK SEA PRE-STRAIT THREE MONTHS AFTER THE TANKER ACCIDENT IN DECEMBER 2024 (BASED ON THE MATERIALS OF THE 134TH VOICE OF THE R/V «PROFESSOR VODYANITSKY»)

Burdiyan N. V., Doroshenko Yu. V., Zinovieva E. V.

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

Abstract: During the 134th cruise of the research vessel «Professor Vodyanitsky», quantitative characteristics of the indigenous heterotrophic and hydrocarbon-oxidizing groups of bacteria were obtained in the surface water layer and bottom sediments of the Kerch Strait and adjacent Black Sea waters, three months after the emergency oil spill caused by the «Vologoneft» tankers in December 2024. The number of heterotrophic bacteria (HB) in the surface water layer ranged from 10^2 to 10^5 cells/ml, and in the bottom sediments from 10^3 to 10^7 cells/g. The number of hydrocarbon-oxidizing bacteria (HOB) in the surface water layer varied from 10 to 10^2 cells/ml, and in the bottom sediments from $7,5 \times 10$ to $4,5 \times 10^3$ cells/g. The maximum values of the HOB abundance in bottom sediments were recorded at two stations located directly in the strait. The results obtained on the number of HOBs overwhelmingly indicate a low potential for bacterial self-purification of marine environment components. A correlation was found between the number of GB and the depth at the sampling stations ($r = 0,66$; $\alpha < 0,05$), while the correlation analysis showed a weak relationship between the initial parameter and the number of HOB ($r = -0,27$; $\alpha < 0,05$). Accumulative cultures isolated from the bottom sediments of three areas of the studied water area showed ambiguous growth on fuel oil, petroleum, and diesel fuel. The results of the background studies can be used in the future for a comparative analysis of the state of the water environment components in the Kerch Strait and the adjacent Black Sea water area during ecological monitoring of the consequences of an emergency fuel oil spill.

Keywords: Black Sea, Kerch Strait, heterotrophic bacteria, hydrocarbon-oxidizing bacteria, bottom sediments, fuel oil

Сведения об авторах

Бурдиян Наталия Витальевна	кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории хемозологии ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: burdiyan_nv@ibss-ras.ru
Дорошенко Юлия Валерьевна	кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории хемозологии ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: doroshenko_yuv@ibss-ras.ru
Зиновьева Екатерина Вячеславовна	ведущий инженер НО ЦКП «Спектрометрия и хроматография», ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация

*Поступила в редакцию 05.02.2026
Принята к публикации 08.05.2026*

БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ,
БИОТЕХНОЛОГИЯ И АКВАКУЛЬТУРА

УДК 576.34.042:519.6

DOI: [10.21072/eco.2026.11.2.08](https://doi.org/10.21072/eco.2026.11.2.08)

ОСНОВЫ МЕТАБОНОМИКИ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ *

Тренкеншу Р. П., Лелеков А. С., Боровков А. Б.

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

г. Севастополь, Российская Федерация,

e-mail: biotex@ibss-ras.ru

Аннотация: В статье рассматривается накопленный авторами опыт работ с культурами микроводорослей в свете современных понятий и терминологии метаболических процессов, происходящих в клетках в их связи с внешними условиями. Внешние условия, в которых находятся микроводоросли, определяют как конкретный набор метаболитов в клетке в данный момент времени (метаболом), так и скорость преобразования метаболитов из одной формы в другую (метабономика) в последовательности биосинтетических реакций в клетках. Конечный результат этих превращений — рост биомассы, развитие и цитокинез.

Ключевые слова: микроводоросли, биокинетика, лимитирование роста, узкое место, метаболом, метабономика

Введение

Микроводоросли являются ключевыми компонентами биосферы: они выполняют функцию первичных продуцентов кислорода и органического вещества. Исследование микроводорослей в естественной среде обитания сопряжено со значительными трудностями, обусловленными высокой вариабельностью абиотических факторов. Применение метода культивирования позволяет элиминировать влияние фоновых условий и изучать воздействие отдельных факторов на ростовые и метаболические характеристики клеток в контролируемых условиях. Широкое внедрение данного подхода способствовало накоплению фундаментальных данных и установлению ряда закономерностей, описывающих рост и метаболизм микроводорослей [Тренкеншу, 2005; Лелеков, Тренкеншу, 2018].

Одной из основных проблем в изучении микроводорослей остаётся количественная оценка воздействия абиотических факторов на клеточный метаболизм. Решение этой задачи требует разработки кинетической теории роста, устанавливающей взаимосвязь между параметрами внешней среды и физиологическим состоянием клеток. Базис подобной теории должен составлять комплекс фундаментальных принципов, интегрированных в единую парадигму, которая обеспечивает возможность математического моделирования кинетических процессов в культуре микроводорослей. Опираясь на данный инструментарий, можно математически описать световые и темновые реакции фотобиосинтеза, что позволяет определить видоспецифические коэффициенты моделей, выявить ключевые закономерности их взаимосвязи, а значит получить новые знания о росте микроводорослей [Тренкеншу, Лелеков, 2017]. При этом математическая строгость

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

теории должна быть дополнена конкретными примерами возможности её упрощения для практического использования в анализе экспериментальных данных [Borovkov et al., 2023] и построения прогностических моделей роста микроводорослей при заданных начальных условиях культуры и внешней среды.

В свете представлений об инновационных траекториях развития современных подходов в биокинетике как научной дисциплине о метаболических трансформациях в организме необходимо определиться с используемой терминологией. Наиболее часто употребляется термин «метаболом» [Saini et al., 2024]. Согласно общепринятой терминологии метаболом — это совокупность всех низкомолекулярных метаболитов ($M < 1$ кДа), присутствующих в клетке (организме) в данный момент времени. Впервые термин «метаболом» был применён в микробиологии [Tweeddale, Notley-McRobb, Ferenci, 1998]. К метаболитам относят аминокислоты, органические кислоты, сахара, нуклеотиды, липиды (низкомолекулярные), вторичные метаболиты и т. п.

Принципиальным отличием метабономики от метаболомики является то, что метабономика по терминологическому определению изучает динамический ответ живых систем на внешние условия, приводящие к изменению их метаболома [Wang et al., 2023]. Этот ответ требует знания набора правил (законов), которым подчиняется кинетика изменений. Исторически метабономический подход был одной из первых попыток применить приёмы системной биологии для изучения метаболизма [Nicholson, Lindon, Holmes, 1999].

Основные положения метабономики микроводорослей

Одним из главных обобщений биологии, определяющих подход к разработке теоретических основ роста, является положение о том, что синтез органического вещества (соответственно и рост организма) происходит за счёт биохимических реакций с участием ферментов, каждый из которых контролируется отдельным геном [Вилли, Детье, 1974]. Последовательность в виде схемы записывается как: «один ген — один фермент — одна биохимическая реакция». Каждый компонент этой схемы для процесса роста клетки или организма требует наличия энергии и биогенных элементов для их синтеза, т. е. потока из внешней среды для восполнения расхода на синтез.

Другой основной принцип, лежащий в основе метабономики микроводорослей, — это принцип минимума, или лимитирующих факторов (принцип Либиха) [Liebig, 1847]. Он относится к минеральному питанию. Блэкман [Blackman, 1905] обобщил принцип на другие факторы внешней среды и на смену лимитирующих факторов.

Позднее был сформулирован принцип узкого места метаболизма [Monod, 1949], появление которого обусловлено новыми методами и техникой выращивания микроорганизмов (хеостат), обеспечивающих непрерывный рост культур и получения динамически равновесных (стационарных) состояний с воспроизводимыми результатами. По аналогии со стационарными характеристиками в ферментативной кинетике Михаэлиса — Ментен [Michaelis, Menten, 1913], Моно предложил математическую модель зависимости удельной скорости роста от концентрации лимитирующего субстрата в виде гиперболы с максимальной скоростью (узкое место). Применительно к ферментативной кинетике этот принцип формулируется как определяющее звено в цепи ферментативных реакций [Романовский, Степанова, Чернавский, 1975].

Развитие этого подхода привело к фундаментальному открытию в молекулярной биологии, объясняющему механизм регуляции экспрессии генов у прокариотов (гипотеза оперона). Оперон позволяет бактериям быстро адаптироваться к изменениям среды: включать синтез нужных ферментов при появлении субстрата и прекращать его при исчезновении, экономя ресурсы клетки [Jacob, Monod, 1961]. Вместе с принципом смены лимитирующих факторов [Blackman, 1905]

принцип «узкого места» не только даёт возможность количественно описать рост микроводорослей (в тех или иных внешних условиях среды), но и позволяет использовать положение о разделении лимитирующих факторов и лимитирующих звеньев в последовательности метаболических реакций в клетках. Появляется возможность редуцировать системы уравнений, т. е. сделать это с помощью минимального числа относительно простых уравнений [Тренкеншу, 2005; Дроздов-Тихомиров, Дороднов, 1991].

Помимо вышеперечисленных положений, в основу метабономики микроводорослей имеет смысл положить вероятностный подход для оценки влияния внешних условий на скорость метаболических превращений, рост и развитие культуры. Это связано с тем, что во внеклеточной среде световые квантовые потоки и потоки биогенных элементов можно рассматривать как простейшие, подчиняющиеся закону Пуассона. Однако после поглощения и дальнейшей биотрансформации внутриклеточные потоки вещества и энергии имеют строгую направленность, которая определяется структурной организацией метаболических систем клетки. В математическом отношении появляется возможность использовать формальный аппарат теории массового обслуживания [Тренкеншу, 2005]. В цитируемой работе представлен понятийный аппарат гетерогенных ферментативных реакций в клетке, учитывающий структурную и временную организацию метаболических систем. Это позволяет сформулировать задачи метабономики в терминах теории массового обслуживания и использования соответствующих математических приёмов.

Такой подход позволяет четко разделить понятия лимитирующего фактора и лимитирующего звена (узкого места) в цепи метаболических процессов преобразования биогенов в структурные формы биомассы микроводорослей. Кроме того, в более общем смысле появляется возможность количественно выделить в биомассе клеток ресурсную и структурную формы [Тренкеншу, Лелеков, 2017]. Важным моментом в теории массового обслуживания являются понятия очереди в последовательности преобразований и количества мест ожидания, т. е. в контексте метаболических реакций эти понятия напрямую количественно связаны с метаболомом и играют существенную роль в характере формы зависимости скорости синтеза структуры клеток от потока лимитирующего субстрата в клетку.

Неотъемлемой частью метабономики микроводорослей также необходимо считать методические приёмы, разработанные для управления ростом культуры.

Динамически равновесная культура микроводорослей

Чаще всего микроводоросли изучают в периодической культуре, которая в динамике имеет различные фазы роста. Кинетические характеристики роста — удельная скорость и продуктивность — выражены через плотность культуры в начале и конце фазы роста. Такие общепринятые представления о периодической культуре микроводорослей имеют существенный недостаток, связанный с некоторой условностью границ фаз роста и развития популяции клеток. Соответственно, весьма условными становятся и границы, внутри которых наблюдается периодическая культура в целом. Особенно это касается первоначальных условий процесса культивирования: количества вносимого инокулята и способов обеспечения энергией и элементами питания.

Совсем иная картина будет наблюдаться при вмешательстве в процессы роста в любой фазе развития периодической культуры, например, при разбавлении культуры питательной средой. Процедуру разбавления можно повторять неоднократно, в результате чего в культиваторе будет наблюдаться стационарный рост культуры. Подбирая относительные объёмы и моменты разбавления, можно управлять процессами роста микроводорослей. Разбавление культуры представляет собой основу управления ростом микроводорослей. Причём управление ростом в культуре может осуществляться только по плотности культуры и времени, что следует из определения кинетических характеристик роста. Действительно, выбирая относительный объём разбавления,

можно уменьшать плотность культуры до необходимой величины, а изменяя промежуток времени между разбавлениями, можно повышать плотность до необходимой за счёт роста культуры. Ясно, что регулирование имеет пределы, определяемые внешними условиями среды и предельными видоспецифическими характеристиками роста микроводорослей. Эти предельные параметры определяются природными или искусственными генетическими свойствами [Fiehn, 2001; Челебиева и др., 2024].

Энергия, необходимая для протекания биосинтетических реакций у микроводорослей, может быть получена как за счёт фотосинтеза, так и за счёт процесса метаболизации органических веществ из водной среды. Кроме энергии, для поддержания роста и развития водорослей необходимы макро- и микроэлементы (биогены), источниками которых могут служить как минеральные, так и органические вещества. Эти элементы питания могут усваиваться водорослями в различной форме, но для перехода от одной формы питания к другой в клетках должна сформироваться необходимая транспортная и ферментативная система [Tanner, Grünes, Kandler, 1969]. Показано, что такое формирование происходит при экспрессии соответствующих генов [Wan et al., 2011].

Для получения динамически равновесного роста микроводорослей в культуре необходимо непрерывно пополнять расход энергии и биогеенных элементов на рост биомассы клеток. Это пополнение обеспечивается протоком питательной среды путём слива части культуры и долива такого же объёма свежей среды, при этом объём культуры не должен изменяться.

Основные показатели роста и состава биомассы микроводорослей

Обычно культура микроводорослей характеризуется концентрацией клеток или плотностью (концентрацией биомассы), B г/л. Удельная скорость продукции биомассы, по определению, записывается следующим образом:

$$\mu = \frac{dB}{Bdt}, \quad (1)$$

где t — время.

При динамически равновесном росте культуры (здесь и далее этот случай помечен надстрочным индексом $*$) плотность культуры устанавливается на постоянном уровне B^* , а удельная скорость роста культуры (μ) становится равной удельной скорости протока среды (ω):

$$\begin{aligned} \mu^* &= \omega, \\ \frac{dB^*}{dt} &= \omega B^*. \end{aligned} \quad (2)$$

Скорость накопления любой химической составляющей биомассы (B_i^*):

$$\frac{dB_i^*}{dt} = \mu^* B_i^* = \omega B_i^*. \quad (3)$$

Сравнивая с выражением для продуктивности, имеем:

$$\frac{B_i^*}{B^*} = \frac{dB_i^*}{dt} / \frac{dB^*}{dt}. \quad (4)$$

Последнее выражение показывает, что содержание любой химической составляющей в общей биомассе динамически равновесной культуры определяется отношением скорости её накопления в клетках к продуктивности культуры.

Здесь необходимо отметить важнейшее свойство динамически равновесного процесса роста в культуре: все удельные скорости любых составляющих биомассы равны и равны удельной скорости потока среды.

Структурная и ресурсная формы клеточной биомассы.

Поступающие в клетку элементы питания проходят множество последовательных метаболических реакций, протекающих в структурно-функциональных образованиях (мембраны, мультиферментные комплексы, транспортные системы и т. д.), и в итоге приводят к увеличению структурных образований в клетке и росту биомассы в целом. Рассматривая рост микроводорослей как процесс синтеза клеточных структур, необходимо выделить в биомассе клетки две основные макромолекулярные составляющие клеток: структурную (B_{str}^*) и ресурсную часть (B_{res}^*).

Ресурсная часть биомассы представляет собой питательные вещества — метаболит, из которого в процессе метаболизма формируется структура клетки:

$$B^* = B_{res}^* + B_{str}^*. \quad (5)$$

Кинетика поглощения лимитирующего элемента клетками

Механизмы транспорта биогенных элементов в микроводорослевую клетку рассматривают цитоплазматическую мембрану в качестве основного регулятора транспортного потока [Nielsen, Villadsen, Liden, 2003]. При этом выделяются разные типы переноса биогенов в клетку: от простой диффузии до активного транспорта с помощью ферментов (пермеаз). Возможна также облегчённая диффузия за счёт наличия на внешней стороне мембранной оболочки ферментов, катализирующих транслокацию неорганических катионов и их комплексов ЕС 7.2 и неорганических анионов ЕС 7.3 [Enzyme Nomenclature].

Таким образом, скорость потока в клетки будет определяться количеством транспортных систем в клеточной мембране (F_s), их активностью (μ_s) и приведённой плотностью потока элементов (λ) из внешней среды [Тренкеншу, 2005]:

$$\left(\frac{dS_{cell}}{dt} \right)_{inc} = \mu_s F_s \begin{cases} \lambda, & \lambda \leq 1; \\ 1, & \lambda \geq 1. \end{cases}, \quad (6)$$

где S_{cell} — концентрация поглощённого субстрата, г л⁻¹, индекс inc (including) указывает на поток субстрата в клетку, λ — приведённая плотность потока лимитирующих элементов — количество поглощённого субстрата на единицу транспортной системы F_s за время её оборота.

В первом приближении приведённая плотность потока лимитирующих элементов, попадающих в клетки за счёт диффузии или транспортной системы клеток, пропорциональна (коэффициент k) концентрации данного вещества во внеклеточной среде:

$$\lambda = kS. \quad (7)$$

При некоторой пороговой концентрации S_1 в среде поток становится единичным и величину приведённой плотности потока элемента в клетку можно выразить через эту величину, а уравнение для скорости потока в клетки записать в виде:

$$\lambda = 1, kS_1 = 1, k = \frac{1}{S_1}, \lambda = \frac{S^*}{S_1},$$

$$\left(\frac{dS_{cell}}{dt} \right)_{inc} = \frac{\mu_s F_s}{S_1} \begin{cases} S^*, & S^* \leq S_1; \\ S_1, & S^* \geq S_1. \end{cases} \quad (8)$$

При единичном потоке из культуральной (околоклеточной) среды поток в клетки становится максимальным и не зависящим от концентрации данного лимитирующего элемента в среде:

$$S^* = S_1, \quad \left(\frac{dS_{cell}}{dt} \right)_{inc}^{max} = \mu_s F_s. \quad (9)$$

Кинетика внутриклеточной трансформации лимитирующего элемента из ресурсной формы в структурную.

Огромное количество актов биохимических преобразований метаболома предполагает их учёт для построения полной динамической модели этих процессов, что приведёт к огромному количеству уравнений и бессмысленности моделирования в целом. В то же время для корректного описания биохимических трансформаций при стационарном росте достаточно учесть ключевые параметры, определяющие конечные скорости процессов. Это позволяет свести к минимуму количество уравнений.

Скорость преобразования ресурсного элемента в структурную форму будет определяться как концентрацией ресурсных форм элемента, так и концентрацией структурных форм. Последнее связано с концентрацией ключевого фермента или транспортного соединения, отвечающего за окончательное включение элемента в структуру клетки и являющегося их обязательным компонентом.

Кинетика внутриклеточной организации метаболического процесса трансформации элемента может быть количественно описана с помощью представлений о лимитирующем факторе (потоке субстрата) и ключевом звене (ферменте), изложенных в работе [Тренкеншу, 2005]. В данном случае лимитирующим фактором является поток ресурсной формы элемента, а узким местом (ключевым звеном) — структурный фермент. Согласно предположению о пропорциональности всех структурных компонентов клеток [Лелеков, 2023], концентрация ключевого конститутивно-го фермента (F_{rs}) прямо пропорциональна (коэффициент f_{rs}) его содержанию в структуре клеток. Это позволяет выразить концентрацию F_{rs} через общий пул структурного субстрата:

$$f_{rs} = \frac{F_{rs}}{S_{str}^*}, \quad (10)$$

где S_{str}^* — стационарная концентрация структурного субстрата, г л⁻¹.

Скорость образования структурной формы лимитирующего элемента из ресурсной можно записать в виде ферментативной реакции с константой k_{rs} :

$$\frac{dS_{str}^*}{dt} = k_{rs} f_{rs} S_{str}^* S_{res}^*. \quad (11)$$

С увеличением концентрации ресурсной формы лимитирующего субстрата до некоторой величины (S_{res1}^*) скорость реакции становится максимальной, определяемой новым лимитирующим фактором, и уже не зависит от рассматриваемого внутриклеточного лимитирующего ресурсного субстрата:

$$\begin{aligned} S_{res}^* &= S_{res1}^*, \\ \left(\frac{dS_{str}}{dt} \right)_m &= k_{rs} f_{rs} S_{res1}^* S_{str}^*. \end{aligned} \quad (12)$$

Скорость изменения концентрации резервной формы лимитирующего элемента в клетках будет равна разности между скоростью поступления элемента в клетки и скоростью его расхода на синтез структурных форм:

$$\frac{dS_{res}^*}{dt} = \left(\frac{dS_{cell}}{dt} \right)_{inc} - \frac{dS_{res}^*}{dt} = \mu_s f_s S_{str}^* \frac{1}{S_1} \left| \begin{array}{ll} S^*, & S^* \leq S_1; \\ S_1, & S^* \geq S_1, \end{array} \right. - k_{rs} f_{rs} S_{str}^* S_{res}^*. \quad (13)$$

В результате имеем систему уравнений, описывающую динамику внутриклеточных переходов одной формы лимитирующего элемента в другую:

$$\begin{cases} \frac{dS_{res}^*}{dt} = \mu_s f_s S_{str}^* \frac{1}{S_1} \left| \begin{array}{ll} S^*, & S^* \leq S_1; \\ S_1, & S^* \geq S_1, \end{array} \right. - k_{rs} f_{rs} S_{str}^* S_{res}^*, \\ \frac{dS_{str}^*}{dt} = k_{rs} f_{rs} S_{str}^* S_{res}^*. \end{cases} \quad (14)$$

Необходимо отметить, что коэффициенты параметрических уравнений имеют строгий физико-химический смысл и могут быть измерены независимым образом. Выбор прямо пропорциональной зависимости скорости транспортных и метаболических превращений от потока лимитирующих факторов в виде ломаных Блэкмана подкрепляется наличием относительно большого количества интермедиатов (метаболом) перед ключевым ферментом. В математическом отношении это положение связано с асимптотическими методами в теории массового обслуживания [Боровков, 1980]. Такой подход значительно облегчает моделирование технологии производства микроводорослей [Лелеков, 2023].

Заключение

В работе сформулированы основные положения метабономики микроводорослей, позволяющие дать количественную оценку скоростей метаболических реакций и соотношений любых химических составляющих клеточной биомассы микроводорослей. Рассмотрены основные понятия и принципы, позволяющие описать закономерности субстратзависимого роста культуры микроводорослей. Внешние и внутриклеточные потоки субстрата записаны линейными сплайнами, что позволяет достичь оптимального сочетания точности описания экспериментальных данных и возможности расчёта коэффициентов модели, каждый из которых имеет биологический смысл. Получены базовые уравнения, позволяющие описать динамический ответ живых систем на внешние условия, приводящие к изменению их метаболома.

Список литературы

1. Боровков А. А. Асимптотические методы в теории массового обслуживания. – Москва : Наука, 1980. – 381 с.
2. Вилли К., Детье В. Биология : (Биологические процессы и законы). – Москва : Мир, 1974. – 823 с.
3. Дроздов-Тихомиров Л. Н., Дороднов А. В. Оптимальная структура полиферментной системы // Молекулярная биология. – 1991. – Т. 25, № 5. – С. 1382–1390.
4. Лелеков А. С. Количественные закономерности роста микроводорослей в культуре и параметры управления процессом фото-биосинтеза : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 1.5.2. – Севастополь, 2023. – 45 с.
5. Лелеков А. С., Тренкениш Р. П. Фундаментальные принципы моделирования фото-биосинтеза микроводорослей // Вопросы современной альгологии. – 2018. – № 3. – С. 1–10. – <https://elibrary.ru/vqstdg>
6. Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. Математическое моделирование в биофизике. – Москва : Наука, 1975. – 344 с.
7. Тренкениш Р. П. Кинетика субстратзависимых реакций при различной организации метаболических систем. – Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – 89 с.
8. Тренкениш Р. П., Лелеков А. С. Моделирование роста микроводорослей в культуре. – Белгород : Константа, 2017. – 152 с.
9. Челебиева Э. С., Кладченко Е. С., Даниюк Н. В., Боровков А. Б., Водясова Е. А. Генетическая инженерия в биотехнологии микроводорослей: достижения и перспективы // Биоразнообразии и устойчивое развитие. – 2024. – Т. 9, № 1. – С. 53–76. – <https://doi.org/10.21072/eco.2024.09.1.04>
10. Blackman F. F. Optima and limiting factors // Annals of Botany. – 1905. – Vol. 19. – P. 281–295.
11. Borovkov A. B., Gudvilovich I. N., Lelekov A. S., Avsiyan A. L. Effect of specific irradiance on productivity and pigment and protein production of *Porphyridium purpureum* (Rhodophyta) semi-continuous culture // Bioresource Technology. – 2023. – Vol. 374. – Art. 128771. – <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128771>
12. Enzyme Nomenclature : world wide web version prepared by G. P. Moss / Nomenclature Committee of the Intern. Union of Biochemistry and Molecular Biology. – URL: <https://iubmb.qmul.ac.uk/enzyme/> (date of access: 16.02.2026).
13. Fiehn O. Combining genomics, metabolome analysis, and biochemical modelling to understand metabolic networks // Comparative and Functional Genomics. – 2001. – Vol. 2, iss. 3. – P. 155–168. – <https://doi.org/10.1002/cfg.82>
14. Jacob F., Monod J. Genetic regulatory mechanisms in the synthesis of proteins // Journal of Molecular Biology. – 1961. – Vol. 3, iss. 3. – P. 318–356. – [https://doi.org/10.1016/S0022-2836\(61\)80072-7](https://doi.org/10.1016/S0022-2836(61)80072-7)
15. Liebig J. Chemistry in its application to agriculture and physiology. – London : Taylor and Walton, 1847. – 320 p.
16. Michaelis L., Menten M. L. Die kinetik der invertinwirkung // Biochemische Zeitschrift. – 1913. – Vol. 49. – P. 333–369.
17. Monod J. The growth of bacterial cultures // Annual Review of Microbiology. – 1949. – Vol. 3. – P. 371–394. – <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.03.100149.002103>
18. Nicholson J. K., Lindon J. C., Holmes E. «Metabonomics»: understanding the metabolic responses of living systems to pathophysiological stimuli via multivariate statistical analysis of biological NMR spectroscopic data // Xenobiotica. – 1999. – Vol. 29, iss. 11. – P. 1181–1189. – <https://doi.org/10.1080/004982599238047>
19. Nielsen J., Villadsen J., Liden G. Bioreaction engineering principles. – 2nd ed. – New York [et al.] : Kluwer Academic/Plenum Publ., 2003. – 528 p.

20. Saini D. K., Manchanda G., Chaudhary R. G., Singh R. P. Microalgal metabolomes and recent biotechnological advances for their industrial application // *Microbiology Research*. – 2024. – Vol. 15, no 4. – P. 2056–2069. – <https://doi.org/10.3390/micrобиолres15040138>
21. Tanner W., Grünes R., Kandler O. Spezifität und turnover des induzierbaren hexoseaufnahmesystems von chlorella // *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie*. – 1969. – Vol. 62. – P. 376–386.
22. Tweeddale H., Notley-McRobb L., Ferenci T. Effect of slow growth on metabolism of *Escherichia coli*, as revealed by global metabolite pool (“metabolome”) analysis // *Journal of Bacteriology*. – 1998. – Vol. 180. – P. 5109–5116. – <https://doi.org/10.1128/JB.180.19.5109-5116.1998>
23. Wan M., Liu P., Xia J., Rosenberg J. N., Oyler G. A., Betenbaugh M. J., Nie Z., Qiu G. The effect of mixotrophy on microalgal growth, lipid content, and expression levels of three pathway genes in *Chlorella sorokiniana* // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2011. – Vol. 91, iss. 3. – P. 835–844. – <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3399-8>
24. Wang Y., Ning W., Li S., Gao C., Cui R., Guo W., Chang J. S., Ho S. H. Metabonomics analysis of microalga *Scenedesmus obliquus* under ciprofloxacin stress // *Environmental Research*. – 2023. – Vol. 237, pt. 2. – Art. 116974. – <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116974>

BASICS OF MICROALGAE METABONOMICS

Trenkenshu R. P., Lelekov A. S., Borovkov A. B.

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

Abstract: The paper discusses the experience gained by the authors in working with microalgae cultures in the light of modern concepts and terminology of metabolic processes occurring in cells in their connection with external conditions. The external conditions in which microalgae are located determine both the specific set of metabolites in the cell at a given moment (metabolome) and the rate of conversion of metabolites from one form to another (metabonomics) in the sequence of biosynthetic reactions in the cells. The final result of these transformations is the growth of biomass, development, and cytokinesis.

Keywords: microalgae, metabolome, metabonomics, limiting factor, specific growth rate, linear splines

Сведения об авторах

Тренкеншу Рудольф Павлович	кандидат биологических наук, научный консультант ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация
Боровков Андрей Борисович	кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель отдела биотехнологий и фиторесурсов ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация
Лелеков Александр Сергеевич	доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: a.lelekov@ibss-ras.ru

Поступила в редакцию 18.02.2026

Принята к публикации 21.04.2026

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ имени А. О. КОВАЛЕВСКОГО РАН»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр
«СУБТРОПИЧЕСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

БИОРАЗНООБРАЗИЕ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

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

**Выписка из реестра зарегистрированных
средств массовой информации
Сер. ПИ № ФС77-76870 от 11 октября 2019 г.**

Рекомендовано к печати решением учёного совета Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федерального исследовательского центра
«Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»
(протокол № 5 от 05.05.2026).

Главный редактор: доктор геогр. наук Горбунов Р. В.
Заместитель главного редактора: доктор биол. наук Довгаль И. В.
Ответственный секретарь: Жукова Ю. В.
Корректоры: Уткина Е. Г., Серебрянская В. А.
Компьютерная вёрстка: Майборода Д. И.
Макет обложки: Келип М.-Е. А.

Фото на обложке: Иллюстрация к статье Мильчаковой Н. А., Кандауровой Д. А.,
Чернышевой Е. Б. «Массовые скопления шаров *Cladophora* в береговой зоне
Азово-Черноморского бассейна (2010–2025 гг.): пос. Жуковка, шары *C. liniformis*»

Подписано к печати: 10.08.2026

Дата выхода: 24.08.2026

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

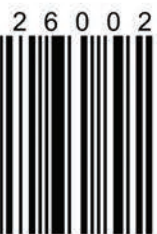
Отпечатано в типографии: ИП Ермолов М. П., ОГРНИП 314920436710081 от 26.12.2014;
ул. Кулакова, д. 59, г. Севастополь, 299011;
тел.: +7 978 70 45 111; e-mail: print-e@yandex.ru

Распространяется бесплатно

ISSN 2949-4583



9 772949 458006



2 6 0 0 2

>