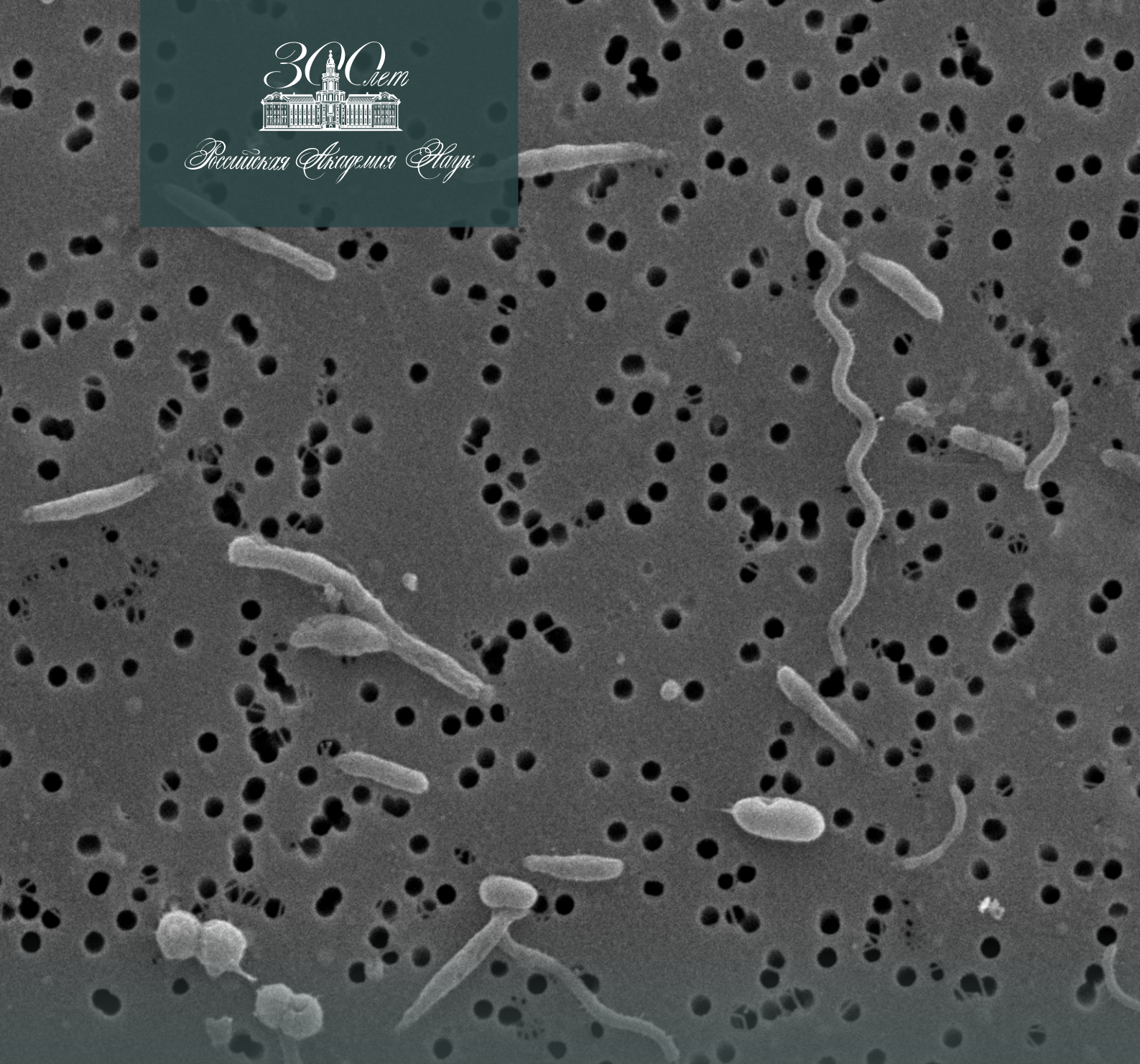

300 лет
Российская Академия Наук

БИОРАЗНООБРАЗИЕ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

Сопутствующая микробиота культуры *Arthrospira (Spirulina) Platensis* в условиях смены лимитирующих факторов

РЫЛЬКОВА О. А., ДОРОШЕНКО Ю. В., ЛЕЛЕКОВ А. С., ХАРЧУК И. А.

ТОМ 9
ВЫПУСК 3
2024

БИОРАЗНООБРАЗИЕ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

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

Все материалы проходят двойное независимое анонимное рецензирование.

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, Россия, 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»

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

БИОРАЗНООБРАЗИЕ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

2024 Том 9 вып. 3

Основан в мае 2016 г. **Научный журнал** **Выходит 4 раза в год**

СОДЕРЖАНИЕ

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

2024 Vol. 9 iss. 3

Established in May 2016 | **Periodical** | **Issued 4 times a year**

CONTENT

БИОРАЗНООБРАЗИЕ ЭКОСИСТЕМ И ЕГО СОХРАНЕНИЕ

УДК [581.526.53:551.435.32](292.471-15) DOI: 10.21072/eco.2024.09.3.01

ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ И ЭКОЛОГО-БИОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ФЛОРЫ ПЕСЧАНЫХ БИОТОПОВ КОСЫ БЕЛЯУС (ЗАПАДНЫЙ КРЫМ) *

Довгалюк И. Я., Мильчакова Н. А., Бондарева Л. В.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», г. Севастополь, Российская Федерация,

e-mail: dovgalyuk@ibss.su

Аннотация: Цель работы заключалась в выявлении разнообразия и эколого-биоморфологической структуры парциальной флоры сосудистых растений песчаных биотопов косы Беляус. Изучение флористического разнообразия района проводили в 2023 г., выделяли парциальную флору песчаных биотопов, приуроченных к тыльной части и выположенному слабонаклонённому склону песчаных дюн. Выявлено 73 вида из 20 семейств, лидирующими являлись семейства Poaceae (13 видов; 13 родов), Brassicaceae (9; 6) и Asteraceae (8; 8). По данным биоморфологического анализа, во флоре песчаных биотопов преобладали озимые однолетники (29 видов; 39,2 %) и поликарпические травы (28; 37,8 %), по типу корневой системы — растения со стержневыми (58; 76,8 %) и глубоко проникающими корнями (45; 61,6 %), по типу вегетации — эфемеры и эфемероиды (27; 36,9 %), отрастающие в позднелетне-осенний период. К особенностям экологической структуры флоры по отношению к световому режиму относилось преобладание гелиофитов (65 видов; 89,2 %), к водному режиму — ксеромезофитов (35; 47,3 %), к засолению почвы — гликофитов (54; 73 %). Установлено наличие видов с широкой экологической валентностью и узкой экологической пластичностью, которые относятся к наиболее уязвимым. Согласно анализу биотопической приуроченности видов, выявлено доминирование аэропедофитов (34 вида; 46,6 %), треть из них относилась к собственно псаммофитам (22 вида; 30,1 %), вклад литофитов (10 видов; 13,7 %), кальцефитов (1; 1,4 %) и растений, характерных для солончаков (6; 8,2 %), был значительно ниже. В составе флоры представлено девять видов, занесённых в Красную книгу Республики Крым (2015), из которых два включены в Красную книгу РФ (2023). С учётом большого природоохранного и средообразующего значения природных комплексов косы Беляус, рекомендовано создание на её территории государственного природного заказника регионального значения в составе ООПТ Республики Крым.

Ключевые слова: псаммофиты, эколого-биоморфологическая структура, биотоп, охраняемые виды, коса Беляус, Крымский полуостров

Введение

Приморские песчаные биотопы, такие как пляжи, косы, дюны и другие, относятся к наиболее уязвимым природным комплексам и имеют высокий охранный статус в Европе и мире [EUNIS habitat … , 2004; European Red List … , 2016], представлены во многих региональных и федеральных особо охраняемых природных территориях (ООПТ) юга России [ООПТ России].

*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).

Приуроченные к ним виды-псаммофиты включены в региональные, национальные и международные Красные книги [Красная книга … , 2015; Красная книга … , 2017; Красная книга … , 2024; Black Sea … , 1999; The Red Data … , 1995; Red Data … , 2015]. В этой связи сохранение приморских территорий Крымского полуострова, и особенно Западного Крыма, где выявлена наибольшая протяжённость песчаных пляжей [Горячкин, Фомин, 2020; Гуров, 2022], является важнейшей экологической и природоохранной задачей. Это обусловлено интенсивностью природопользования, увеличением рекреационной нагрузки [Бобра, Лычак, 2019; Игнатов, Лукьянова, Соловьева, 2016], сокращением ширины пляжей более чем вдвое из-за истощения материала, размыва берегов, усиления абразионных процессов [Агаркова-Лях, 2014; Олиферов, 2008].

Современные сведения о состоянии и распространении приморских псаммофитов Крымского полуострова, в том числе охраняемых видов, малочисленны [Корженевский, Рыфф, Литвинюк, 2006; Корженевский, Рыфф, 2006; Ена, 2012; Епихин, 2023]. Согласно данным «Биологической флоры Крыма» [Голубев, 1996], к прибрежным псаммофитам относятся 54 вида (около 2 % общего количества видов). Наиболее полно изучен псаммофитон Керченско-Таманского региона [Новосад, 1992], для некоторых приморских районов Крыма составлены продромусы растительности, проведена фитоиндикация эолового рельефа, описаны псаммофитные сообщества и их редкие виды [Корженевский, Клюкин, 1990; Корженевский, 2001; Корженевский, Квитницкая, 2014; Рыфф, Биотопическая … , 2017; Рыфф, Редкие биотопы … , 2017]. Для сохранения приморских биотопов Западного Крыма сформирована сеть особо охраняемых природных территорий, в составе которых следует выделить природный заповедник «Лебяжьи острова», природный парк «Тарханкутский», природный заказник «Каламитский», ландшафтно-рекреационные парки «Бакальская коса», «Ойбургский» и другие [ООПТ России]. По результатам проведённых исследований [Отчет о … , 2023] к заповеданию рекомендованы природные комплексы косы Беляус (коса Северная пересыпи лимана Донузлав), характеризующиеся высоким флористическим и биотопическим разнообразием, значительной защитной ролью растительности песчаных биотопов, к которым приурочены охраняемые виды с узким линейным ареалом, то есть наиболее подверженные воздействию негативных природных и антропогенных факторов [Дидух, Ена, 1999; Корженевский, Клюкин, 1990; Рыфф, Биотопическая … , 2017; Рыфф, Редкие биотопы … , 2017].

Учитывая необходимость сохранения приморских местообитаний и приуроченных к ним охраняемых редких видов, была поставлена цель работы: выявить таксономическое разнообразие и эколого-биомофологическую структуру парциальной флоры сосудистых растений песчаных биотопов косы Беляус.

Материалы и методы

Характеристика района исследований. Коса Беляус представляет собой северную часть Донузлавской пересыпи, её длина составляет 9 км, ширина варьирует от 200 до 600 м, общая площадь — около 1,3 км^2 (рис. 1). Берега низменные, аккумулятивного типа, при истощении наносов подвергаются разрушению [Игнатов, Лукьянова, Соловьева, 2016]. Пляжи представлены ракушечными песками с примесью оолитов, гравия коренных известняковых пород и кварцевых зёрен [Горячкин, Фомин, 2020].

Коса Беляус находится в пределах западного степного причерноморского климатического района, который характеризуется умеренно-тёплым климатом, жарким, засушливым летом и относительно мягкой и влажной зимой [Важов, 1977; Климатический атлас … , 2000]. Средняя годовая температура воздуха составляет 9,7–11,4 °C, температура самого тёплого месяца (июля) — 23,2 °C, самого холодного (января) — 5 °C, абсолютный минимум

Рис. 1. Карта-схема расположения косы Беляус (Западный Крым) [https://www.google.ru/maps]

составляет –28 °С. Зима непродолжительная, снежный покров неустойчивый. Продолжительность солнечного сияния около 2530 часов/год, суммарная солнечная радиация 127 ккал/см^2. Годовая сумма осадков составляет 316–373 мм, из них в вегетационный период выпадает более 180 мм.

Псаммофитная растительность формируется главным образом в тыльной части и на выположенном слабонаклонённом склоне песчаных дюн, на пляжах контактной зоны суша — море отмечены единичные растения [Отчет о … , 2023].

Материал и методы исследования. Флору сосудистых растений косы Беляус изучали с применением полевых маршрутных методов в 2023 г. Для индикации комплекса почвенно-климатических и антропогенных факторов в составе флоры выделяли парциальную флору [Юрцев, 1987] приморских песчаных биотопов, для этого выполняли эколого-биоморфологический анализ согласно [Голубев, 1996]. Для определения уровня адаптации видов к климатическим условиями были проанализированны жизненные формы с использованием шкалы Раункиера [Raunkiaer, 1934].

Номенклатуру видов приводили согласно GBIF [Global Biodiversity ...], песчаные биотопы косы Беляус указывали согласно [EUNIS habitat … , 2004]: B1.132 — однолетние сообщества понтических песчаных пляжей, B1.133 — многолетние сообщества понтических песчаных пляжей.

Результаты и обсуждение

По данным проведённых нами исследований, флора сосудистых растений косы Беляус насчитывает 145 видов [Отчет о … , 2023]. К песчаным биотопам приморской зоны (пляжи и дюны) приурочено 73 вида, из которых 22 (30,1 %) являются облигатными псаммофитами в соответствии с классификацией В. Н. Голубева [Голубев, 1996]. Аннотированный список видов приморских песчаных биотопов приведён ниже. При определении среды жизни применяли следующие условные обозначения: д — псаммофит, а — аэропедофит, л — литофит, к — кальцефит, б — берега рек, с — солончаки, п — побережье [Голубев, 1996].

Apiaceae Lindl.: *Astrodaucus littoralis* (M.Bieb.) Drude — дп; *Eryngium maritimum* L. — пб; *Falcaria vulgaris* Bernh. — а; *Pimpinella tragium* subsp. *lithophila* (Schischk.) Tutin — л; *Seseli tortuosum* L. — ал.

Asclepiadaceae R.Br.: *Cynanchum acutum* L. — а.

Asparagaceae Juss.: *Asparagus officinalis* L. — а; *Asparagus maritimus* (L.) Mill. — дп; *Asparagus pallasii* Miscz. — сп.

Asteraceae Martinov: *Artemisia arenaria* DC. — д; *Carduus arabicus* Jacq. — а; *Centaurea adpressa* Ledeb. — да; *Cichorium intybus* L. — а; *Cota dubia* (Steven) Holub — а; *Crepis sancta* (L.) Babc. — а; *Senecio vulgaris* L. — а; *Sonchus oleraceus* L. — а.

Boraginaceae Juss.: *Anchusa thessala* Boiss. et Spruner — а; *Buglossoides arvensis* (L.) I.M. Johnst. subsp. *arvensis* — ал, *Echium italicum* L. subsp. *biebersteinii* (Lacaita) Greuter et Burdet — а; *Lycopsis arvensis* L. — а.

Brassicaceae R.Br.: *Alyssum borzaeanum* E.I. Nyárády — д; *Alyssum desertorum* Stapf — а; *Alyssum hirsutum* M. Bieb. — а; *Cakile maritima* Scop. subsp. *euxina* (Pobed.) E.I. Nyárády — дп; *Crambe maritima* L. — дп; *Diplotaxis muralis* (L.) DC. — а; *Diplotaxis tenuifolia* (L.) DC. — лк; *Rapistrum rugosum* (L.) All — ас; *Velarum officinale* (L.) Rchb. — а.

Caryophyllaceae Juss.: *Gypsophila perfoliata* L. — сп; *Holosteum umbellatum* L. — а; *Silene subconica* Friv.Friv. — а; *Spergularia media* (L.) C. Presl — а.

Chenopodiaceae Vent.: *Atriplex sagittata* Borkh. — сп; *Salsola tragus* L. subsp. *pontica* (Pall.) Rilke — сп.

Convolvulaceae Juss.: *Convolvulus arvensis* L. — а; *Convolvulus lineatus* L. — а.

Cyperaceae Juss.: *Carex colchica* J. Gay — д.

Euphorbiaceae Juss.: *Euphorbia helioscopia* L. subsp. *Helioscopia* — а; *Euphorbia sequieriana* Neck. — а.

Fabaceae Lindl.: *Astragalus hamosus* L. — а; *Astragalus varius* S.G.Gmelin — дп; *Medicago marina* L. — дп; *Medicago minima* (L.) Bartal. — ал; *Melilotus albus* Medik. — а; *Securigera varia* (L.) Lassen — а.

Geraniaceae Juss.: *Erodium cicutarium* (L.) L'Her. — ал.

Lamiaceae Martinov: *Lamium amplexicaule* L. — ал; *Teucrium polium* L. — ал.

Papaveraceae Juss.: *Chelidonium majus* L. — ал; *Papaver hybridum* L. — а; *Papaver rhoeas* L. — а.

Plantaginaceae Juss.: *Plantago arenaria* Waldst. & Kit. — дп.

Poaceae (R.Br.) Barnh.: *Anisantha tectorum* (L.) Nevski — а; *Apera spica-venti* (L.) P.Beauv. subsp. *maritima* (Klokov) Tzvelev — а; *Avena trichophylla* K. Koch — а; *Cynodon dactylon* (L.) Pers. — да; *Dasypyrum villosum* (L.) P.Candargy — а; *Elymus repens* (L.) Gould — а; *Elytrigia elongata* (Host) Nevski — сп; *Festuca beckeri* (Hack.) Trautv. — д; *Hordeum murinum* L. — да; *Leymus racemosus* (Lam.) Tzvelev — дп; *Parapholis incurva* (L.) C.E.Hubb. — д; *Secale sylvestre* Host — д; *Thinopyrum bessarabicum* (Savul. & Rayss) Á.Löve — дп.

Polygonaceae Juss.: *Polygonum maritimum* L. — дп.

Rubiaceae Juss.: *Galium aparine* L. — а; *Galium humifusum* M. Bieb. — ал.

Scrophulariaceae Juss.: *Linaria genistifolia* (L.) Mill. — да; *Linaria sabulosa* Czern. ex Klokov — дп; *Veronica hederifolia* L. — ал.

Сосудистые растения песчаных биотопов относятся к 20 семействам, из которых наибольшей насыщенностью таксонов характеризуются Poaceae (13 видов; 13 родов), Brassicaceae (9; 6) и Asteraceae (8; 8). К ведущим семействам относятся также Fabaceae (6 видов; 4 рода), Apiaceae (5; 5), Caryophyllaceae и Boraginaceae (по 4 рода и вида). Насчитывается 13 семейств (Asclepiadaceae, Asparagaceae, Chenopodiaceae, Convolvulaceae, Cyperaceae, Euphorbiaceae,

Geraniaceae, Lamiaceae, Papaveraceae, Plantaginaceae, Polygonaceae, Rubiaceae, Scrophulariaceae), представленных одним-тремя видами и родами. Анализируемая флора имеет важное природоохранное значение — в Красную книгу Республики Крым [Красная книга … , 2015] занесено 9 видов (*Astragalus varius*, *Leymus racemosus*, *Astrodaucus littoralis*, *Cakile maritima* subsp. *euxina*, *Secale sylvestre*, *Asparagus maritimus*, *Asparagus pallasii*), из них два (*Crambe maritima, Eryngium maritimum*) представлены в Красной книге РФ [Красная книга … , 2024].

Флористическое разнообразие приморских песчаных биотопов косы Беляус превышает выявленное для многих районов литоральной зоны Азово-Черноморского бассейна. Так, псаммофитон Керченско-Таманского региона, площадь которого значительно больше, насчитывает 131 вид из 32 семейств [Новосад, 1992], псаммофитон кос Тузла и Чушка — 122 вида из 34 семейств и 206 видов из 43 семейств соответственно, тогда как их площадь в 2–7 раз больше. Сходным количеством видов характеризуется коса Вербяная (154 вида), площадь которой сопоставима с косой Беляус [Литвинская, Постарнак, 2008; Постарнак, Анисимов, 2020; Ермолаева, Коломийчук, Соколова, 2018].

Систематическая структура отличается от спектров флоры Крыма и псаммофитона Керченско-Таманского региона, где лидируют Asteraceae — Fabaceae — Poaceae [Голубев, 1996; Новосад, 1992]. Ближе всего она к флоре некоторых кос азовского побережья (косы Вербяная, Чушка, Тузла), включающей триаду Poaceae — Brassicaceae — Asteraceae, но в другом порядке [Постарнак, Анисимов, 2020; Литвинская, Постарнак, 2008]. Как известно, экологические условия отражаются на систематической структуре локальной флоры [Шмидт, 1980], очевидно, что значительная изменчивость характерна и для парциальной флоры, однако выявление общих черт флоры эоловых местообитаний требует дальнейшего изучения.

Биоморфологический анализ показал, что в составе флоры песчаных биотопов косы Беляус преобладают травянистые растения (около 80 %), доля озимых однолетников (29 видов; 39,2 %) и поликарпических трав (28; 37,8 %) сходна (рис. 2А), что закономерно для флоры Голарктики. Значительно ниже вклад полукустарничков и многолетних или двулетних монокарпиков — 6,8 % (по 5 видов). На долю яровых однолетников и полукустарников приходится соответственно 5,4 и 4 % (4 и 2 вида). В целом во флоре насчитывается 40 многолетников (55,4 %) и 33 однолетника (44,6 %). Выявленное лидирование среди травянистых растений озимых однолетников характерно для флор песчаных биотопов, как наиболее ксерофитных комплексов с низкими показателями трофности [Новосад, 1992]. Кроме того, высокая доля монокарпических видов (44,6 %) отражает как засушливые условия произрастания, так и увеличение антропогенной нагрузки на природные комплексы косы. С другой стороны, значительный вклад многолетних растений (55,4 %), в том числе среди облигатных псаммофитов, свидетельствует об устойчивости сообществ песчаных биотопов.

Биоморфологический спектр по типу вегетации представлен тремя группами из восьми, типичных для Крыма (рис. 2Б). В нём почти в равном соотношении присутствуют эфемеры и эфемероиды, отрастающие в позднелетне-осенний период (27 видов; 36,9 %), летне-зимнезелёные (26; 35,6 %) и летнезелёные (20; 27,5 %). Годовой ритм развития растений песчаных биотопов характеризуется средиземноморскими чертами, отражает ксерические условия произрастания и наличие холодного зимнего периода. Для псаммофитона Керченско-Таманского региона отмечается сходное распределение растений среди указанных биоморф, но доля эфемеров и эфемероидов выше, а летнезелёных — ниже [Новосад, 1992].

Суммарно во флоре песчаных биотопов косы Беляус доминируют растения со стержнекорневой системой (58 видов; 76,8 %), а по залеганию — глубокие (45; 61,6 %) (рис. 2В). Выявленные соотношения отличаются от данных, приводимых для флоры Крыма (стержнекорневые — 64,4 %, глубокие — 43,9 %) [Голубев, 1996], что, вероятно, обусловлено повышенным вкладом растений

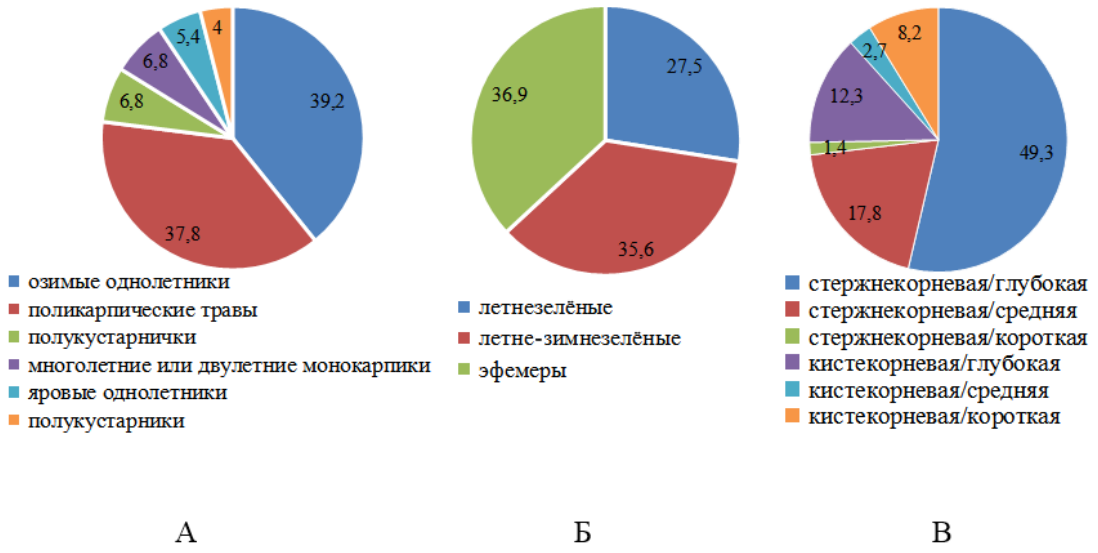

Рис. 2. Соотношение (в %) биоморф во флоре песчаных биотопов косы Беляус: А — основные биоморфы; Б — биоморфы по типу вегетации; В — биоморфы по типам корневой системы

со стержневыми корнями и глубокого залегания, особенно в группе облигатных псаммофитов. Особенности корневой системы, как известно, отражают свойства субстрата, в том числе его влажность, плотность и структуру. Для приморских песчаных биотопов характерны такие свойства, как подвижность, достаточная аэрация и рыхлость, что обуславливает сходство различных биоморф. Так, в составе псаммофитона Керченско-Таманского региона по типу корневой системы [Новосад, 1992] выявлено преобладание растений со стержневыми корнями — 64,9 %, что показано и для песчаных биотопов косы Беляус, где доля видов со стержнекорневой системой достигает 76,8 %.

Сравнительный анализ соотношения видов, согласно [Raunkiaer, 1934], показал преобладание среди жизненных форм терофитов (33 вида; 45,2 %), что отражает приспособленность растений к климату (рис. 3) и указывает как на сходство с флорой Средиземноморья, так и на повышение антропогенной нагрузки. При этом также заметна роль гемикриптофитов (25 видов; 34,2 %), характерных для умеренных неаридных условий. Доля других климатоморф значительно ниже: криптофитов — 8 видов (11 %), хамефитов — 7 видов (9,6 %). Анализируемый спектр наиболее близок к псаммофитону Керченско-Таманского региона [Новосад, 1992], но отличается от данных для литоральной зоны Азово-Черноморского бассейна, где наиболее высока роль гемикриптофитов [Литвинская, Постарнак, 2008; Strat, 2016].

Проведённый анализ экологической структуры флоры песчаных биотопов выявил её основные особенности, предопределённые условиями произрастания (рис. 4). К лидирующей экоморфе по отношению к световому режиму относятся гелиофиты — 89,2 % (65 видов), на долю сциогелиофитов приходится 8,1 % (6 видов), гелиосциофитов — 2,7 % (2 вида), сциофиты отсутствуют (рис. 4А). Все выявленные облигатные псаммофиты принадлежат к гелиофитам. Подобные закономерности отмечены и для других локальных и парциальных флор песчаных местообитаний приморской зоны Азово-Черноморского бассейна [Новосад, 1992; Литвинская, Постарнак, 2008].

Экологический спектр флоры (рис. 4Б) показал доминирование засухоустойчивых растений (67 видов; 91,8 %) над влаголюбивыми, около половины видов приходится на долю ксеромезофитов (35; 47,9 %), вклад мезоксерофитов ниже (20; 27,5 %). Доля эуксерофитов, представленных только облигатными псаммофитами, достаточно высока (12; 16,4 %). Состав экоморф, как известно, детерминируется гидрологическими особенностями эоловых форм

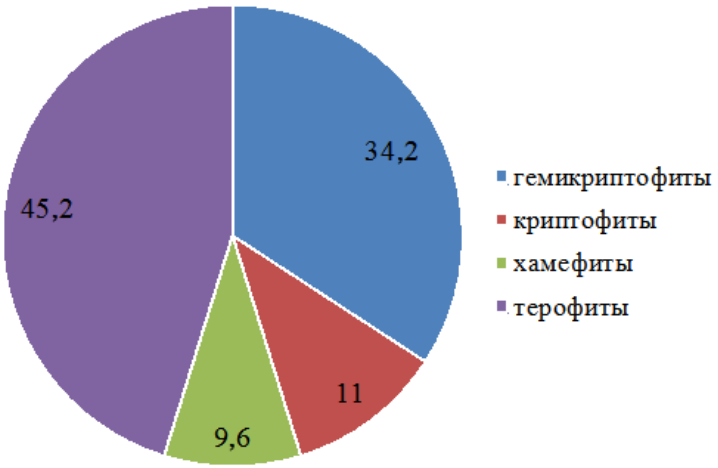

Рис. 3. Соотношение (в %) жизненных форм во флоре песчаных биотопов косы Беляус

рельефа с высокой водопроницаемостью, что подтверждается сходством с экологическим спектром псаммофитона Керченско-Таманского региона [Новосад, 1992], но доля эуксерофитов во флоре песчаных биотопов косы Беляус выше.

Экологический спектр по отношению к засолению почвы (рис. 4В) отражает способность многих видов переносить его, однако доминируют растения, обычно произрастающие на незасоленных грунтах. Подавляющее большинство видов относятся к гликофитам (54; 74 %), но в группе псаммофитов их всего девять. К галофитам относятся 16 видов (21,9 %), гликогалофитам — 3 вида (4,1 %), из которых псаммофиты представлены 9 и 3 видами соответственно. В целом во флоре песчаных биотопов косы Беляус доля растений, выдерживающих засоление, вдвое выше, чем во флоре Крыма [Голубев, 1996], несмотря на то что на полуострове галофитными сообществами заняты значительные площади по берегам морей, солёных озёр.

Значительный вклад гликофитов в структуру локальной и парциальной флоры прибрежных биотопов отмечен во многих работах [Постарнак, Анисимов, 2020; Литвинская, Постарнак, 2008; Мосеев, Мискевич, 2024]. Некоторые исследователи относят их к группе «гликофитов, толерантных к засолению субстратов» [Ребристая, 1997], то есть видов с широкой экологической валентностью, произрастающих в основном на незасоленных субстратах, но приспособленных к условиям засоления [Мосеев, Мискевич, 2024]. С учётом данных о нейтральной или щелочной реакции почвенного раствора песчаных биотопов [Новосад, 1992], о воздействии моря (от подтопления до аэрозольного орошения) на растительность береговой зоны [Корженевский, 2001], необходимо расширить исследования для обоснования возможного отнесения гликофитов к переходной экологической группе гликогалофитов [Голубев, 1996].

Спектр флоры песчаных местообитаний косы Беляус по биотопической приуроченности отражает их разнообразие и включает как виды с широкой экологической амплитудой, так и стенотопные (рис. 5). Большинство растений относится к аэропедофитам (34 вида; 46,6 %), в группе собственно псаммофитов (22; 30,1 %) половина видов приурочена именно к побережью, для них характерна узкая экологическая пластичность и наибольшая уязвимость. Менее представлены литофиты (10 видов; 13,7 %) — растения, характерные для солончаков (6; 8,2 %) и относящиеся к кальцефитам (1; 1,4 %). Широкая эколого-ценотическая амплитуда флоры характерна также для псаммофитона Керченско-Таманского региона и литоральной растительности Азовского моря [Новосад, 1992; Литвинская, Постарнак, 2008; Постарнак, Анисимов, 2020]. Однако корректное сравнение биотопической приуроченности флор других регионов с нашими

данными не представляется возможным из-за различных методических подходов. Например, некоторые виды-псаммофиты согласно [Голубев, 1996], встречающиеся на косе Беляус, отнесены В. В. Новосадом [Новосад, 1992] к литорантам (*Astrodaucus littoralis*, *Eryngium maritimum*, *Cakile maritima* subsp. *euxina*, *Crambe maritima*, *Hordeum murinum*, *Thinopyrum bessarabicum*, *Polygonum maritimum*), степантам (*Centaurea adpressa*, *Astragalus varius*) и синантропофантам (*Hordeum murinum*) или указана их приуроченность не только к псаммофитону, но и другим экоценофитонам (кальцефитон, литоралофитон, степофитон).

А Б В

Рис. 4. Соотношение (в %) экоморф во флоре песчаных биотопов косы Беляус: А — по световому режиму; Б — по водному режиму; В — по засолению почвы

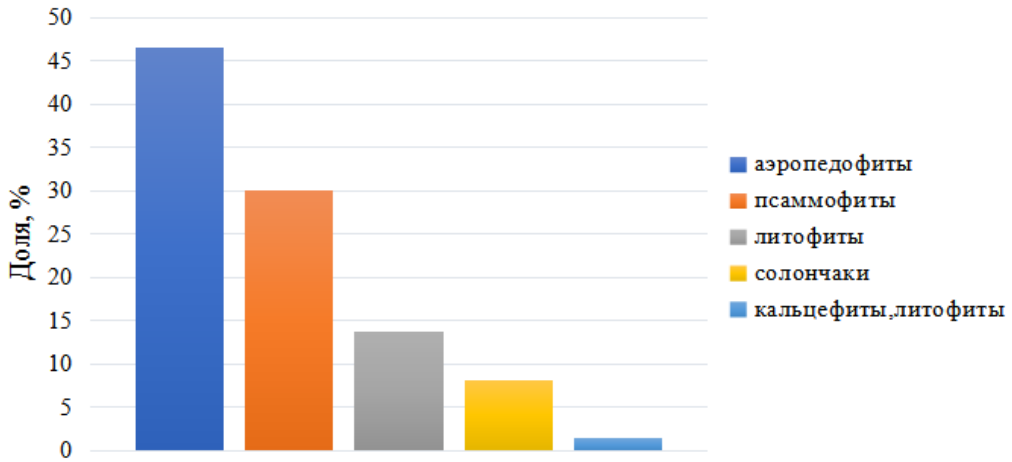

Рис. 5. Соотношение экоморф флоры песчаных биотопов косы Беляус по среде обитания

Заключение

Флора сосудистых растений косы Беляус насчитывает 145 видов, из которых 73 вида из 20 семейств приурочены к песчаным биотопам. Ведущими семействами являются Poaceae (13 видов; 13 родов), Brassicaceae (9; 6) и Asteraceae (8; 8). Региональный природоохранный статус имеют девять видов, два из них занесены в Красную книгу РФ.

Анализ основных биоморф флоры песчаных биотопов показал преобладание травянистых растений, среди которых лидируют озимые однолетники (29 видов; 39,2 %) и поликарпические травы (28; 37,8 %), что характерно для флоры с ксерическими условиями произрастания

и находящейся под антропогенным воздействием. Значительное участие малолетников отражает также адаптацию растений к условиям произрастания в засушливом климате. Суммарная доля многолетних растений (55,4 %) свидетельствует об устойчивости растительных сообществ приморской зоны.

Биоморфологический спектр по типу вегетации неполный, средиземноморского типа, преобладают эфемеры и эфемероиды, отрастающие в позднелетне-осенний период (27 видов; 36,9 %). К особенностям спектра относится значительная доля растений со стержневыми корнями (58 видов; 76,8 %) и глубокого залегания (45; 61,6 %), что связано с дефицитом увлажнения. Соотношение жизненных форм, в соответствии с классификацией Раункиера, и преобладание терофитов (33 вида; 45,2 %) свидетельствуют о приспособленности растений к засушливому климату.

В экологической структуре флоры песчаных биотопов косы Беляус по отношению к световому режиму преобладают гелиофиты (65 видов; 89,2 %), по отношению к водному режиму — ксеромезофиты (35; 47,3 %), по отношению к засолению почвы — гликофиты (54; 74 %). Спектры по отношению к световым условиям и засолению субстрата характерны для локальных и парциальных флор песчаных местообитаний, а по отношению к увлажнению их структура обусловлена в основном ксерическими условиями.

Анализ биотопической приуроченности флоры песчаных биотопов выявил наличие аэропедофитов, псаммофитов, литофитов, кальцефитов, которые отличаются как широкой экологической амплитудой, так и стенотопностью.

На основании проведённых исследований выявлено высокое флористическое разнообразие, в том числе охраняемых видов флоры песчаных биотопов косы Беляус. С учётом природоохранного и средообразующего значения флоры изученной территории, рекомендовано создание государственного природного заказника регионального значения «Коса Беляус» в составе экологической сети ООПТ Республики Крым.

Благодарности. Авторский коллектив глубоко признателен кандидату биологических наук В. В. Александрову и кандидату биологических наук Д. В. Епихину за ценные консультации и помощь в экспедиционных исследованиях, а также А. Н. Иванову — за организацию полевых работ.

Список литературы

1. *Агаркова-Лях И. В.* Современное состояние пляжей Западного побережья Крыма и актуальные вопросы берегового природопользования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2014. – № 29. – С. 50–60.
2. *Бобра Т. В., Лычак А. И.* Природоохранные исследования в Крыму: итоги, перспективы и новые вызовы // 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. 3–12.
3. *Важов В. И.* Агроклиматическое районирование Крыма // Труды / Гос. Никит. ботан. сад. – Ялта : ГНБС, 1977. – Т. 71. – С. 92–120.
4. Климатический атлас Крыма : прилож. к науч.-практ. дискус.-аналит. сб. «Вопр. развития Крыма» / авт.-сост. И. П. Ведь. – Симферополь : Таврия-Плюс, 2000. – 120 с.
5. *Голубев В. Н.* Биологическая флора Крыма. – 2-е изд. – Ялта : Никит. ботан. сад, 1996. – 126 с.
6. *Горячкин Ю. Н., Фомин В. В.* Волновой режим и литодинамика в районе аккумулятивных берегов Западного Крыма // Морской гидрофизический журнал. – 2020. – Т. 36, № 4. – С. 451–466. – https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-451-466

7. Гугл. Карты : [онлайн-сервис]. – URL: https://www.google.ru/maps (дата обращения: 20.12.2024).
8. *Гуров К. И.* Характеристики и динамика гранулометрического состава донных наносов прибрежных районов Крыма : дис. … канд. геогр. наук : 1.6.17. – Севастополь, 2022. – 166 с.
9. *Дидух Я. П., Ена Ан. В.* Некоторые новейшие данные по фиторазнообразию Крыма // Вопросы развития Крыма : науч.-практ. дискус.-аналит. сб. / отв. ред.: Л. Г. Апостолов, А. И. Дулицкий. – Симферополь : Сонат, 1999. – Вып. 11. – С. 60.
10. *Ена А. В.* Природная флора Крымского полуострова. – Симферополь : Н. Оріанда, 2012. – 232 с.
11. *Епихин Д. В.* Флора и растительность территории ООПТ регионального значения Республики Крым «Ландшафтно-рекреационный парк «Ойбурский» // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартьян» / Никит. ботан. сад – Нац. науч. центр, Гос. природ. заповедник «Мыс Мартьян». – Ялта : НБС – ННЦ, 2023. – Вып. 14. – С. 139–144.
12. *Ермолаева О. Ю., Коломийчук В. П., Соколова Т. А.* Редкие растения косы (острова) Тузла (Краснодарский край, Крым) // Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Науки о Земле. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 351–358.
13. *Игнатов Е. И., Лукьянова С. А., Соловьева Г. Д.* Морские берега Крыма // Геоморфология. – 2016. – № 1. – С. 55–63.
14. *Корженевский В. В., Рыфф Л. Э., Литвинюк Н. А.* Анализ флоры высших сосудистых растений Казантипского природного заповедника // Труды Никитского ботанического сада – Национального научного центра. – Ялта : НБС – ННЦ, 2006. – Т. 126. – С. 165–189.
15. *Корженевский В. В., Рыфф Л. Э.* Анализ флоры высших сосудистых растений Опукского природного заповедника // Труды Никитского ботанического сада – Национального научного центра. – Ялта : НБС – ННЦ, 2006. – Т. 126. – С. 51–73.
16. *Корженевский В. В., Клюкин А. А.* Растительность абразионных и аккумулятивных форм рельефа морских побережий и озер Крыма / Гос. Никит. ботан. сад. – Ялта, 1990. – 109 с. – Деп. в ВИНИТИ, 10.07.1990, № 3822-В90.
17. *Корженевский В. В.* Синтаксономическая схема и типология местообитаний Азовского и Черноморского побережий Крыма // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. – Ялта : НБС – ННЦ, 2001. – Т. 120. – С. 107–124.
18. *Корженевский В. В., Квитницкая А. А.* Синтаксономия растительности эолового рельефа Крыма // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. – Ялта : НБС – ННЦ, 2014. – Т. 136. – С. 41–55.
19. Красная книга Краснодарского края. Растения и грибы / Администрация Краснодар. края ; отв. ред. С. А. Литвинская [и др.]. – 3-е изд. – Краснодар: [б. и.], 2017. – 850 с.
20. Красная книга Республики Крым. Растения, водоросли и грибы / М-во экологии и природ. ресурсов Респ. Крым ; отв. ред.: А. В. Ена, А. В. Фатерыга. – Симферополь : АРИАЛ, 2015. – 480 с.
21. Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы / М-во природ. ресурсов и экологии Рос. Федерации [и др.] ; отв. ред. Д. В. Гельтман. – 2-е офиц. изд. – Москва : ВНИИ «Экология», 2024. – 944 с.
22. *Литвинская С. А., Постарнак Ю. А.* Анализ ботанического разнообразия растений, обитающих в Азовской прибрежной зоне // Наука Кубани. – 2008. – № 4. – С. 29–34.
23. *Мосеев Д. С., Мискевич И. В.* Парциальные флоры приморских экотопов устьев малых рек пролива Югорский Шар // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. – 2024. – Т. 23, № 1. – С. 162–168. – https://doi.org/10.14258/bssm.2024031
24. *Новосад В. В.* Флора Керченско-Таманского региона. – Киев : Наук. думка, 1992. – 276 с.

25. *Олиферов А. Н.* Динамика крымских пляжей // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2008. – Т. 4, № 1/2. – С. 59–67.
26. ООПТ России : информ.-справ. система / Центр охраны дикой природы. – URL: https://oopt.info (дата обращения: 28.12.2024).
27. Отчет о научно-исследовательской работе по разработке материалов комплексного экологического обследования, обосновывающих необходимость создания особо охраняемой природной территории Республики Крым – природный парк регионального значения «Беляус» : (заключит.) / М-во науки и высш. образования РФ, ФИЦ «Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского РАН» ; рук. Н. А. Мильчакова. – Севастополь, 2023. – 266 л. – Регистрац. номер НИОКТР 123070600026-5.
28. *Постарнак Ю. А., Анисимов К. В.* Ценотическое разнообразие литоральных экосистем косы Чушка // Наземные и морские экосистемы Причерноморья и их охрана : сб. тез. II Всерос. науч.-практ. шк.-конф., 28 сент. – 02 окт. 2020 г., пгт Курортное, Феодосия / редкол.: Д. И. Коробушкин [и др.]. – Севастополь : Ин-т природ.-техн. систем, 2020. – С. 175–176.
29. *Ребристая О. В.* Флора приморских экотопов Западносибирской Арктики // Ботанический журнал. – 1997. – Т. 82, № 7. – С. 30–40.
30. *Рыфф Л. Э.* Биотопическая характеристика некоторых редких видов флоры юго-западного Крыма // Экосистемы. – 2017. – № 11. – С. 14–23.
31. *Рыфф Л. Э.* Редкие биотопы эрозионно-денудационных ландшафтов юго-восточного Крыма // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2017. – № 124. – С. 61–71.
32. *Шмидт В. М.* Статистические методы в сравнительной флористике. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1980. – 176 с.
33. *Юрцев Б. А.* Элементарные естественные флоры и опорные единицы сравнительной флористики // Теоретические и методические проблемы сравнительной флористики : материалы II Рабочего совещ. по сравнит. флористике, Неринга, 20–24 сент. 1983 / отв. ред. Б. А. Юрцев. – Ленинград : Наука, 1987. – С. 47–66.
34. Black Sea Red Data Book / ed. Dumont H. J. – New York: United Nations Offise for Project Services, 1999. – 413 p.
35. EUNIS habitat classification revised 2004 : report / Europ. Environment Agency, Europ. Topic Centre on Nature Protection and Biodiversity ; by C. E. Davies, D. Moss, M. O. Hill. – [S. l. : s. n.], 2004. – 307 p.
36. European Red List of Habitats. Pt. 1. Marine habitats / S. Gubbay, N. Sandres, T. Haynes [et al.]. – Luxembourg : Publ. Office of the Europ. Union, 2016. – 46 p.
37. Global Biodiversity Information Facility. – URL: https://www.gbif.org/ (accessed: 09.12.2024).
38. *Raunkiaer C.* The life forms of plants and statistical plant geography. – Oxford : Claredon Press, 1934. – 632 p.
39. Red Data Book of the Republic of Bulgaria. Vol. 3. Natural Habitats / Bulgarian Acad. of Sciences ; eds Biserkov V. [et al.]. – Sofia : BAS, 2015. – 423 p.
40. *Strat D.* Floristic composition and functional zones pattern of the beach-dune system along the Danube Delta coast – Romania // Forum Geografic. – 2016. – Vol. 15, iss. 1. – P. 65–79. – https://doi.org/10.5775/fg.2016.093.i
41. The Red Data Book of rare and threatened plants of Greece / eds: Phitos D. [et al.]. – Athens : World Wide Fund for Nature Greece, 1995. – 527 p.

TAXONOMIC DIVERSITY AND ECOLOGICAL AND BIOMORPHOLOGICAL STRUCTURE OF THE FLORA OF SANDY BIOTOPES OF THE BELYAUS SPIT (WESTERN CRIMEA)

Dovgalyuk I. Y., Milchakova N. A., Bondareva L. V.

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

Abstract: The aim of this work was to identify the diversity and ecological-biomorphological structure of the partial flora of vascular plants in sandy biotopes of the Belyaus Spit. The study of the phytodiversity of this spit was conducted in 2023, focusing on the partial flora of sandy biotopes located in the back part and on the gently sloping flattened slope of sand dunes. For the first time, 73 species of vascular plants from 20 families were identified, and a systematic and ecological-biomorphological analysis was performed. In the systematic spectrum, the families Poaceae (13 species; 13 genera), Brassicaceae (9 species; 6 genera), and Asteraceae (8 species; 8 genera) are dominant in terms of the number of species and genera. Nine species are listed in the Red Data Book of the Republic of Crimea (2015), two of which are also included in the Red Data Book of the Russian Federation (2023). Biomorphological analysis of the flora of sandy biotopes revealed a prevalence of winter annuals (29 species; 39,2 %) and polycarpic herbs (28 species; 37,8 %). Regarding the root system, plants with taproots (58 species; 76,8 %) and deeply penetrating roots (45 species; 61,6 %) were most common. In terms of vegetation type, there was a slight prevalence of ephemerals which grow in the late summer-autumn period (27 species; 36,9 %). The main features of the ecological structure of the flora in relation to the light regime are the dominance of heliophytes (65 species; 89,2 %), in relation to the water regime — xeromesophytes (35 species; 47,3 %), and in relation to soil salinity — glycophytes (54 species; 73 %). The flora includes two groups of species: one with a broad ecological valence and the other with narrow ecological plasticity and the greatest vulnerability (stenotopic species). In terms of biotopes, aeropedophytes are dominant (34 species; 46,6 %), followed by psammophytes (22 species; 30,1 %). The proportion of lithophytes was two times smaller (10 species; 13,7 %). Plants characteristic of saline biotopes (solonchaks, 6 species; 8,2 %) and those related to calciphytes and lithophytes (1 species; 1,4 %) are less common. Considering the high environmental and habitat-forming significance of the plant vegetation of the Belyaus Spit, it is proposed that a State Nature Reserve of regional significance should be established for the ecological network of the Republic of Crimea.

Keywords: psammophytes, ecological and biomorphological structure, biotope, protected species, Belyaus Spit, Crimean Peninsula

Сведения об авторах

Довгалюк Ирина Яковлевна	ведущий инженер, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, dovgalyuk@ibss.su
Мильчакова Наталия Афанасьевна	кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, nmilchakova@ibss-ras.ru
Бондарева Лилия Викторовна	кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, lbondareva@ibss-ras.ru

Поступила в редакцию 01.12.2024 г.
Принята к публикации 27.12.2024 г.

УДК [594.32-147.11:551.435.322](262.5.04) DOI: 10.21072/eco.2024.09.3.02

РАКОВИНЫ МОЛЛЮСКА-ВСЕЛЕНЦА РАПАНА (*RAPANA VENOSA*) В ШТОРМОВЫХ ВЫБРОСАХ НА БЕРЕГУ КАЛАМИТСКОГО ЗАЛИВА В ДЕКАБРЕ 2023 г. *

Агаркова-Лях И. В.[1], Шадрин Н. В.[2]

[1] *ФГБНУ «Институт природно-технических систем», г. Севастополь, Российская Федерация, e-mail: iva_crimea@mail.ru,*

[2] *ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», г. Севастополь, Российская Федерация, e-mail: snickolai@yandex.ru*

Аннотация: В ходе полевых наблюдений за штормовыми выбросами раковин моллюсков в северной части Каламитского залива в декабре 2023 г. выявлено присутствие среди них значительного количества живых особей рапана (*Rapana venosa*). Изучены дефекты раковин живых моллюсков рапанов, выброшенных на берег, проведены измерения их морфометрических и массовых характеристик. Рассчитаны количественные показатели штормовых выбросов минеральной части раковин моллюсков на берег Каламитского залива в декабре 2023 г. В августе 2024 г. проведён гранулометрический анализ пляжевых наносов в месте декабрьского выброса раковинного материала и на сопряжённых с ним участках берега. Дана оценка роли штормовых выбросов раковин в формировании вещественного состава исследуемого пляжа, а также пополнении обломочным материалом пляжей Каламитского залива в целом.

Ключевые слова: пляж, дефекты раковин, высота и диаметр раковин, масса раковины, раковинный материал, питание пляжей, гранулометрический анализ, шторм 25–27 ноября 2023 г., Крым, Чёрное море

Введение

Одним из источников пополнения обломочного материала морских пляжей являются раковины моллюсков. Их роль на некоторых участках крымского побережья всегда была довольно высока [Братусь, 1965]. Но если ранее доминанта в формировании пляжной ракуши принадлежала автохтонным видам моллюсков *(Ostrea edulis, Mytilus galloprovincialis, Flexopecten glaber, Cerastoderma glaucum*), то в настоящее время среди них появляются и виды-вселенцы [Косьян, Кучерук, Флинт, 2012].

Непреднамеренное вселение в 1947 г. из Японского моря брюхоногого моллюска — рапана (*Rapana venosa*) [Драпкин, 1953] способствовало практически полному исчезновению поселений устриц и мидий в восточной части Чёрного моря и Керченском проливе [Золотарев, Терентьев, 2012; Фащук, 2019]. Численность двустворчатого моллюска-вселенца анадары (*Anadara kagoshimensis)* (до 2014 г. — *A. inaequivalvis*), впервые появившегося у черноморских берегов Болгарии в 1983 г. [Gomoiu, 1984], а в Крыму — в конце 1990-х … начале 2000-х гг., в настоящее время достигла значительной величины [Ревков, 2015; Бондарев, 2015].

В результате произошедших биоценотических изменений в последние годы в донных выбросах моллюсков на берега Крыма нередко стали преобладать раковины отмеченных выше вселенцев — рапана и анадары. Однако материалы наблюдений по данному вопросу очень малочисленны [Шадрин, Латушкин, 2002; Шадрин, Афанасова, 2009; Говорин, 2012],

* Работа выполнена по теме гос. задания ИПТС (№ гос. регистрации 124013000609-2) с частичной поддержкой темы гос. задания ИнБЮМ (№ гос. регистрации 124030100107-9).

что не позволяет количественно оценить вклад раковин указанных моллюсков в питание пляжей. В связи с этим могут представлять интерес наши новые данные, полученные в Каламитском заливе после экстремального черноморского шторма 25–27 ноября 2023 г.

Цель статьи — оценить роль штормовых выбросов раковин моллюска-вселенца рапана (*R. venosa*) в питании обломочным материалом крымских пляжей на примере мощнейшего шторма, обрушившегося на Каламитский залив 25–27 ноября 2023 г.

Материалы и методы

Штормовая погода в регионе в конце ноября 2023 г. определялась мощным внетропическим, так называемым южным циклоном, формирующимся над Средиземным морем [Дулов и др., 2024]. По расчётам [Дулов и др., 2024], шторм в Чёрном море сопровождался волнами высотой более 9,0 м и периодами, превышавшими 13 с. Согласно картам [Дулов и др., 2024] максимальная высота волн в Каламитском заливе составляла 4,5–5,5 м; их период — около 11,0 с. По данным Гидрометцентра Крыма, 26 ноября 2023 г. скорость ветра достигала в Евпатории 25,0 м/с [Ураганный ветер … , 2023].

Спустя 6 дней после «пика» шторма, 3 декабря 2023 г., в ходе полевых обследований берега Каламитского залива у морского канала, соединяющего море с озером Сасык-Сиваш (рис. 1), были обнаружены массовые выбросы живых моллюсков рапанов (*R. venosa)* (раковин с мягкими тканями) (рис. 2). Раковины рапана собирались с двух участков. Первый был площадью 18,0 м^2 с протяжённостью береговой линии 6,0 пог. м и располагался в месте непосредственного выхода к морю канала, ограниченного по бокам бетонными плитами (своеобразная ловушка для морского материала). Здесь моллюски находились как на поверхности пляжа, среди антропогенного мусора и выбросов водорослей, так и в толще обломочного материала, на глубине в 2–3 высоты раковины рапана (8,0–15,0 см). Примерно за час сборов на первом участке было найдено 180 живых особей рапана.

Второй участок располагался на 30,0 м южнее и примыкал к первому. В этом месте под углом к берегу сооружена бетонная стена морского канала высотой около 2,5–3,0 м, которая задерживает обломочный материал перед собой. Площадь второго участка составила 80,0 м^2, но, поскольку здесь рапан был рассредоточен главным образом по поверхности пляжа, а не в несколько слоёв на глубине, как на первом участке, можно предположить, что основная часть его раковин была собрана до нас. На втором участке было обнаружено 20 живых моллюсков рапанов.

По раковинам анадары (как живым, так и без моллюсков) столь детальный количественный учёт не вёлся, но её раковин было на несколько порядков больше, чем рапана, что наглядно отражено на фотографиях, сделанных на берегу (см. рис. 2).

Общее количество живых моллюсков рапанов, найденных на двух участках, составило 200 шт., из которых 39 шт. были взяты случайным образом для дальнейшего изучения дефектов их раковин, оценки морфометрических и массовых характеристик.

Высота и диаметр (ширина) раковин рапана измерялись согласно методике, изложенной в [Топтиков, Ковтун, Алексеева, 2016]. Взвешивание раковин проводили на лабораторных весах. Количественные расчёты выбросов раковинного материала на берег базировались на измерениях массы 39 раковин, которая была пересчитана на всё их обнаруженное количество (200 шт.).

В августе 2024 г. в районе морского канала, где в декабре 2023 г. были обнаружены массовые выбросы раковин рапана, в 4,0–5,0 м от уреза воды была взята проба пляжевых наносов для изучения её гранулометрического и вещественного состава. Контрольные пробы пляжевого материала отбирались на соседних участках, севернее и южнее морского канала. Гранулометрический анализ пляжевых наносов проводился ситовым методом без промывки водой в соответствии с [ГОСТ 12536-2014].

Рис. 1. Место выброса моллюсков на пляж

Расчёты морфометрических и массовых характеристик раковин, гранулометрического состава пляжевых наносов осуществлялись в программе Excel.

Результаты

Среди выбросов раковин у морского канала особенно в большом количестве присутствовали рапан (*R. venosa*) и анадара (*A. kagoshimensis)*, в меньшем — *Flexopecten glaber, Chamelea gallina, Tritia reticulata, Tritia neritea, Solen marginatus* и др. (рис. 2). Имелись в выбросах и живые особи рапана и анадары, раковины которых были целыми или с повреждениями разной степени. Здесь же и в 0,5 км севернее морского канала отмечался вынос на берег водорослей — филлофоры *(Phyllophora*sp.) и цистозиры *(Cystoseira*sp. = *Gongolaria* sp.) с кладками рапана.

Визуальный осмотр степени и характера внешних деформаций позволил разделить исследуемые раковины рапана на две группы. Группа 1: с существенными повреждениями (25 шт.); её дефекты выражались главным образом через отсутствие или отбитый апикальный угол, отсутствие или наличие отверстия в средней части раковин; в меньшей степени отмечались стёртость рёбер завитков, отбитость края устья. Указанные деформации не позволили провести морфометрические замеры раковин. Группа 2: с мелкими или незначительными повреждениями (14 шт.), касающимися стёртости рёбер завитков, отбитости края устья, не влияющими на проведение замеров высоты и диаметра раковин. Таким образом, только 36 % из 39 исследованных раковин живых моллюсков, выброшенных на берег, оказались без значительных внешних повреждений.

Морфометрические измерения высоты и диаметра раковин рапана проводились только для группы 2; измерения массы — для обеих групп. Высота раковин изменялась от 51,70 до 72,00 мм; диаметр — от 44,00 до 61,10 мм. Отношение высоты раковины (H) к её диаметру (D) составило от 1,11 до 1,28. Масса пустой раковины (без моллюска) варьировала от 22,20 до 71,45 г. Общая масса 14 раковин группы 2 была 541,35 г.

Масса пустой раковины из группы 1 колебалась от 16,10 до 149,35 г. Общая масса 25 раковин группы 1 составила 1010,00 г, суммарная масса 39 раковин двух групп — 1551,35 г.

Для количественной оценки штормовых выбросов раковинного материала на берег исходили из того, что фактическое количество обнаруженных на пляже раковин было почти в 5 раз больше, чем число подвергшихся замерам (200 экз. против 39 экз.). Значит, масса выбросов 200 раковин составила 7,5 кг с двух участков. Вычтем из этого количества массу 10 % или 20 штук, которые были собраны на втором участке. Получим 6,75 кг раковинного материала, поступившего

Рис. 2. Раковины моллюсков на пляже (фото Агарковой-Лях И. В.)

во время наших исследований на первый участок площадью 18,0 м^2, где моллюски находились на поверхности и в толще обломочного материала. Таким образом, на 1,0 м^2 пляжа поступило 375,0 г раковин моллюсков. Линейная величина выбросов раковин составила 1,125 кг на погонный метр берега.

Через девять месяцев после шторма, в августе 2024 г., был проведён гранулометрический анализ обломочного материала пляжа у морского канала и в контрольных точках по соседству (южнее и севернее канала). Проба у морского канала была определена как галечная, с долей доминирующей фракции размером более 10,0 мм 89,9 %. В этой фракции присутствовали главным образом целые раковины двустворчатых и брюхоногих моллюсков общей массой 58,70 г или 1,69 % от массы всей пробы. При этом на анадару (*A. kagoshimensis)* приходилось 41,85 г или 71,30 % от массы всех раковин, на рапана (*R. venosa*) — только 7,35 г или 12,40 %. Доля других раковин (*Tritia* sp., *Chamelea* sp., *Donax* sp., *Flexopecten* sp.) составила 9,55 г или 16,30 %. В контрольных пробах пляжевых наносов к северу и к югу от морского канала также встречались раковины видов и родов моллюсков, аналогичных представленным выше, но их масса не превышала 5–10 г.

Обсуждение

Основываясь на итогах наблюдений за штормовыми выбросами на берег Каламитского залива раковинного материала в декабре 2023 г., с высокой долей вероятности можно предполагать нахождение на прилегающем к морскому каналу дне довольно крупных по численности популяций анадары (*A. kagoshimensis)* и рапана (*R. venosa)*. Подтверждением этого могут также служить и свидетельства местных жителей, указывающие на регулярность выбросов живых раковин указанных моллюсков во время сильных штормов. Дополнительным фактором, обеспечившим вынос донного биогенного материала не только из мелководной зоны, но, по всей видимости,

и со значительной глубины, выступили сила и продолжительность шторма конца ноября 2023 г. Подобные процессы в береговой зоне Крыма были описаны ранее, после мощного шторма у мыса Опук [Шадрин, Латушкин, 2002].

Исследования выброшенных на берег раковин рапана в количестве 39 экз. показали, что только чуть более трети (36 %) из них были без существенных внешних повреждений. Это может говорить об интенсивном механическом воздействии на них морских волн. При этом одной из возможных причин крупных дефектов (дырок) раковин могут являться действия чаек и других крупных птиц, которые разбивают их для извлечения мяса моллюсков.

Высота целых раковин, выброшенных на берег Каламитского залива, изменялась от 51,70 до 72,00 мм, что вполне соответствует показателям, характерным для популяций рапана из других районов Крыма, например у Донузлавской пересыпи, где она варьировала от 44,9 до 88,6 мм [Бондарев, 2022]. В частности, в работах [Бондарев, 2010; Бондарев, 2011; Бондарев, 2016; Бондарев, 2024] отмечается, что в настоящее время у берегов Крыма наиболее распространены *R. venosa* с высотой раковины 40–90 мм, но она может существенно различаться в разных популяциях. Большинство современных популяций рапана у крымского побережья состоит из «карликовых» особей, высота раковин которых в зрелом возрасте не превышает 50–60 мм.

Как известно, отношение H/D раковины рапана характеризует её форму и степень вытянутости: чем оно больше, тем более вытянута её форма. Измеренное отношение H/D раковин без существенных внешних повреждений изменялось от 1,11 до 1,28. Для сравнения: в донных популяциях у мыса Тарханкут это соотношение составляло 1,36 ± 0,01; в Судакской бухте — 1,3 ± 0,01 [Говорин, 2012]. На основании этого можно предположить, хотя и нельзя утверждать с полной уверенностью, что в Каламитском заливе существует локальная популяция вида, форма раковины которой менее вытянута и более компактна по сравнению с указанными выше районами крымского побережья. Это предположение нуждается в дальнейшей проверке.

Сбор моллюсков происходил на двух участках пляжа, отличающихся площадью и характером рассредоточения раковин моллюсков. В частности, на первом участке количество и плотность раковин были существенно выше вследствие его малой площади (18,0 м^2) и высокой концентрации раковин среди обломочного материала на глубине (до 8,0–15,0 см). Площадь второго участка составила 80,0 м^2, но, поскольку здесь рапаны были рассредоточены главным образом на поверхности пляжа, а не в несколько слоёв на глубине, их сбор отдыхающими значительно снизил обнаруженное нами количество. Рассмотренные особенности участков сбора обусловили различные количество и плотность концентрации раковин моллюсков среди обломочного материала. В частности, соотношение их числа на первом и втором участках составило 9 (180 шт.) : 1 (20 шт.).

Расчётами было установлено, что суммарная масса выбросов (200 раковин) на двух участках берега составила 7,5 кг. Площадные и линейные расчёты штормовых выбросов на берег были проведены для первого участка, куда поступило 6,75 кг раковин. На 1,0 м^2 площади берега пришлось 0,375 кг, а на 1 погонный метр — 1,125 кг раковин моллюсков. Очевидно, что рассчитанное количество раковинного материала меньше его фактических выбросов, так как не представляется возможным учесть его расход в результате сбора другими посетителями, а также выноса с пляжа птицами. Тем не менее эти данные позволяют оценить порядок штормового выброса на берег минеральной части раковин с живыми моллюсками.

Сильные шторма, подобные ноябрьскому шторму 2023 г., происходят в Крыму один раз в 10–15 лет. Последний шторм такой мощности был в ноябре 2007 г. В течение года на побережье происходят 2–3 небольших шторма. То есть, по самым оптимистичным расчётам, количество раковин, выносимых со средними штормами, составит за год на исследуемом участке около 2,25–3,375 кг на погонный метр берега или 0,75–1,125 кг на 1,0 м^2 его площади.

Чтобы оценить вклад штормовых выбросов раковинного материала в питание пляжей, сравним полученные нами данные с результатами исследований на других участках черноморского побережья. Для Анапской пересыпи были рассчитаны годовые величины поступления раковин моллюсков с морского дна на берег по материалам наблюдений за продуктивностью моллюсков в прилегающей акватории [Косьян и др., 2020]. Согласно этим исследованиям, общая масса раковин на погонный метр берега за год составила: в 2016 г. — 174,1 кг; в 2017 г. — 49,5 кг; в 2018 г — 94,6 кг. Следует отметить, что это средние величины выноса, не учитывающие вклад экстремальных штормов. Таким образом, годовые объёмы питания пляжей Анапской пересыпи минеральной составляющей раковин моллюсков в 15–77 раз выше их количества, поступающего за год на рассматриваемый участок Каламитского залива с несколькими штормами средней силы. Это говорит о несущественной роли раковинного материала в питании исследуемого пляжа.

Анализ вклада раковин моллюсков в гранулометрический и вещественный состав пляжевых наносов на участке штормовых выбросов по прошествии девяти месяцев показал, что со временем он существенно снижается. Однако их локальная роль на данном участке всё же остаётся значимой по сравнению с расположенными по соседству участками берега Каламитского залива, где этот источник местного выноса раковинного материала практически отсутствует. Количественный вклад штормовых выбросов раковинного материала на исследуемом участке составляет 1,69 % от массы пробы. При этом более 71 % общей массы раковин дают створки моллюска-вселенца — анадары. Этот факт, по-видимому, обусловлен высокой численностью популяции этого моллюска на прилегающем дне и толстостенностью его раковины, слабо подверженной истиранию и волновой переработке.

Выводы

В акватории Каламитского залива, прилегающей к берегу у морского канала, обитают достаточно большие по численности популяции рапана (*R. venosa)* и анадары (*A. kagoshimensis)*, что подтверждается их многочисленными выбросами во время ноябрьского шторма 2023 г. Спустя 6 дней после «пика» шторма с участка пляжа площадью 18,0 м^2, с поверхности до глубины 8,0–15,0 см, было собрано 180 живых раковин рапана.

Исследование состояния раковин рапана после их выброса на пляж показало, что только чуть более 1/3 (14 экз.) из них были без существенных внешних повреждений. Диапазон высоты (от 51,70 до 72,00 мм) целых раковин рапана из района Каламитского залива находится в пределах значений (40–90 мм), характерных для современных популяций из других акваторий Крыма.

Отношение высоты раковины к её диаметру изменяется от 1,11 до 1,28. По этому показателю раковина является несколько менее удлинённой в сравнении с рапанами в донных популяциях Судакской бухты и у мыса Тарханкут. На основании этого можно предположить, хотя и нельзя утверждать с полной уверенностью, что в Каламитском заливе обитает локальная популяция *R. venosa*, форма раковины которой менее вытянута и более компактна по сравнению с отмеченными выше районами крымского прибрежья. Отметим, что это предположение нуждается в дальнейшей проверке. Тем не менее полученный морфометрический материал интересен как новые данные о размерных характеристиках популяций рапана из Каламитского залива. Кроме того, эта информация позволяет сравнить размеры штормовых выбросов рапана в других районах Крыма.

По нашим расчётам, суммарная масса выбросов минеральной части 200 раковин на двух участках исследуемого берега составила 7,5 кг. По расчётам для первого участка, куда поступило 6,75 кг раковинного материала: на 1,0 м^2 его площади пришлось 0,375 кг, а на 1 погонный метр береговой линии — 1,125 кг биогенного вещества.

С учётом частоты штормов в Крыму, величина выноса раковин за год составит на исследуемом участке около 2,25–3,375 кг на погонный метр берега или 0,75–1,125 кг на 1,0 м^2 его площади. Сравнение этого количества с общей массой раковин, поступивших на погонный метр берега Анапской пересыпи в 2016–2018 гг., указывает, что годовые объёмы питания пляжей последней выше в 15–77 раз. Это говорит о несущественной роли раковинного материала как источника питания участка пляжа Каламитского залива у морского канала и всего залива в целом.

Эти расчёты, а также анализ грансостава пляжа в месте декабрьского выброса раковин на берег спустя девять месяцев позволили установить их локальную, но всё же значимую роль на исследуемом участке Каламитского залива в сравнении с соседними, не имеющими такой подпитки. Остаточный вклад раковинного материала в пополнение материала пляжа у морского канала составил в августе 2024 г. 1,69 %. При этом среди раковин доминировал двустворчатый моллюск-вселенец анадара с долей более 2/3 от всей их массы.

Гранулометрический состав пляжевых наносов зависит от многих факторов, в том числе от энергии морских волн, способных осуществлять перенос и переотложение фракций разного размера и массы на различные расстояния. Количество переносимых из моря на берег раковин косвенно может характеризовать как силу того или иного шторма, так и плотность популяций моллюсков в прилегающей акватории. Чем плотность выше, тем доля раковин в пляжевых наносах может быть больше даже при штормах умеренной силы. Для количественных обобщений в пределах протяжённых участков морских берегов необходимо иметь больше данных наблюдений за штормовыми выбросами раковинного материала на крымском побережье.

Список литературы

1. *Бондарев И. П.* Морфогенез раковины и внутривидовая дифференциация рапаны *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) // Ruthenica: Русский малакологический журнал. – 2010. – Т. 20, № 2. – С. 69–90.
2. *Бондарев И. П.* Особенности питания и перспективы развития рапаны *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) в Черном море // Вопросы сохранения биоразнообразия водных объектов : материалы междунар. науч. конф. (Ростов-на-Дону, 27 нояб. 2015 г.) / Азов. науч.-исслед. ин-т рыб. хоз-ва. – Ростов-на-Дону : АзНИИРХ, 2015. – С. 44–48.
3. *Бондарев И. П.* Особенности популяционной структуры и биоценотических связей *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) (Gastropoda, Muricidae) в заливе Донузлав Чёрного моря // Морской биологический журнал. – 2024. – Т. 9, № 2. – С. 3–18. – https://doi.org/10.21072/mbj.2024.09.2.01
4. *Бондарев И. П.* Современное состояние популяций рапаны *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) в крымской части ареала // Промысловые биоресурсы Чёрного и Азовского морей / НАН Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. – Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – Гл. 5. – С. 177–189.
5. *Бондарев И. П.* Структура популяций *Rapana venosa* (Gastropoda, Muricidae) севастопольских бухт (Чёрное море) // Морской биологический журнал. – 2016. – Т. 1, № 3. – С. 14–21.
6. *Бондарев И. П. Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) залива Донузлав и прилегающей акватории Чёрного моря // Ruthenica: Русский малакологический журнал. – 2022. – Т. 32, № 4. – С. 137–147. – https://doi.org/10.35885/ruthenica.2022.32(4).1
7. *Братусь О. С.* Вещественный состав пляжей Крымского полуострова // Доклады Академии наук СССР. – 1965. – Т. 165, № 2. – С. 399–402.

8. *Говорин И. А.* Определение прижизненных показателей массы у рапан *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) по морфометрическим характеристикам их раковин из штормовых береговых выбросов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа / НАН Украины, Мор. гидрофиз. ин-т. – Севастополь : МГИ, 2012. – Вып. 26, ч. 1. – С. 419–426.
9. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 22 с.
10. *Драпкин Е. И.* Новый моллюск в Черном море // Природа. – 1953. – № 9. – С. 92–95.
11. *Дулов В. А., Юровская М. В., Фомин В. В., Шокуров М. В., Юровский Ю. Ю., Барабанов В. С., Гармашов А. В.* Экстремальный черноморский шторм в ноябре 2023 года // Морской гидрофизический журнал. – 2024. – Т. 40, № 2. – С. 325–347.
12. *Золотарев П. Н., Терентьев А. С.* Изменения в сообществах макробентоса Гудаутской устричной банки // Океанология. – 2012. – Т. 52, № 2. – С. 251–257.
13. *Косьян А. Р., Кучерук Н. В., Флинт М. В.* Роль раковинных моллюсков в балансе осадков Анапской пересыпи // Океанология. – 2012. – Т. 52, № 1. – С. 78–84.
14. *Косьян Р. Д., Косьян А. Р., Крыленко В. В., Федорова Е. А.* Состав и распределение осадков Анапской пересыпи // Океанология. – 2020. – Т. 60, № 2. – С. 302–314. – https://doi.org/10.31857/S0030157420020057
15. *Ревков Н. К.* Недавний вселенец и перспективный объект аквакультуры в Черном море – двустворчатый моллюск *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906): особенности развития поселений у берегов Крыма // Промысловые беспозвоночные : VIII Всерос. науч. конф. по промысл. беспозвоночным, Калининград, 2–5 сент. 2015 г. / Атлант. науч.-исслед. ин-т мор. рыб. хоз-ва и океанографии [и др.]. – Калининград : Изд-во Калинингр. гос. техн. ун-та, 2015. – С. 254–257.
16. *Топтиков В. А., Ковтун О. А., Алексеева Т. Г.* Изучение морфологии и физиологии брюхоногого моллюска *Rapana venosa* : учеб.-метод. пособие. – Саарбрюккен : LAP, 2016. – 83 с.
17. Ураганный ветер накрыл Крым // Газета.ru. – URL: https://www.gazeta.ru/social/news/2023/11/26/21793639.shtml. – Дата публ.: 26.11.2023.
18. *Фащук Д. Я.* Черное море: географо-экологический «портрет» : (иллюстрир. науч.-справ. пособие). – Москва : ГЕОС, 2019. – 312 с.
19. *Шадрин Н. В., Афанасова Т. А.* Питание и распределение *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) в акватории Опукского заповедника (Восточный Крым, Чёрное море) // Морской экологический журнал. – 2009. – Т. 8, № 2. – С. 24.
20. *Шадрин Н. В., Латушкин А. А.* Массовые находки раковин *Aporrhais pespelecani* (Linne, 1758) в береговой полосе Крыма // Экология моря / НАН Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. – Севастополь : ИнБЮМ, 2002. – Т. 61. – С. 44.
21. *Gomoiu M. T. Scapharca inaequivalvis* – a new species in the Black Sea // Cercetări marine – Recherches marines. – Constanța, 1984. – Vol. 17. – P. 131–141.

SHELLS OF THE RAPANA UNIVERSAL CLAM (*RAPANA VENOSA*) IN STORM SURGES ON THE SHORES OF THE GULF OF KALAMITA IN DECEMBER 2023

Agarkova-Lyakh I. V.[1], Shadrin N. V.[2]

[1] *Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russian Federation,*
e-mail: iva_crimea@mail.ru,

[2] *A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,*
e-mail: snickolai@yandex.ru

Abstract: During field observations of storm releases of mollusk shells in the northern part of the Kalamita Bay in December 2023, the presence of a significant number of living *Rapana venosa* individuals among them was revealed. Defects of shells of living rapan mollusks washed ashore have been studied; measurements of their morphometric and mass characteristics have been carried out. Quantitative indicators of storm emissions of the mineral part of mollusk shells on the shore of the Gulf of Kalamita in December 2023 have been calculated. In August 2024, a granulometric analysis of beach sediments was carried out at the site of the December release of shell material and on the adjacent sections of the shore. The role of storm shell emissions in the formation of the material composition of the beach under study, as well as the replenishment of the beaches of the Kalamita Bay as a whole with detrital material, is assessed.

Keywords: beach, shell defects, height and diameter of shells, shell mass, shell material, beach nutrition, granulometric analysis, storm on November 25–27, 2023, Crimea, Black Sea

Сведения об авторах

Агаркова-Лях Ирина Владимировна	кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории экологических проблем природопользования ФГБУН «Институт природно-технических систем», ул. Ленина, 28, Севастополь, 299011, Российская Федерация, iva_crimea@mail.ru
Шадрин Николай Васильевич	кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории экстремальных экосистем ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, snickolai@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.11.2024 г.
Принята к публикации 18.12.2024 г.

УДК 599.742.75-15:599.735.31 DOI: 10.21072/eco.2024.09.3.03

ОЛЕНИ РОДА *CERVUS* КАК ЖЕРТВЫ ЕВРАЗИЙСКОЙ РЫСИ (*LYNX LYNX*) НА СРЕДНЕМ СИХОТЭ-АЛИНЕ

Серёдкин И. В.

ФГБУН «Тихоокеанский институт географии ДВО РАН», г. Владивосток, Российская Федерация,
e-mail: seryodkinivan@inbox.ru

Аннотация: С целью изучения хищничества евразийской рыси *Lynx lynx* (Linnaeus, 1758) по отношению к благородному оленю *Cervus elaphus* Linnaeus, 1758 и пятнистому оленю *C. nippon* Temminck, 1838, в 1992–2023 гг. проведены исследования на территории Сихотэ-Алинского биосферного заповедника и в его окрестностях (юг Дальнего Востока России). Обследованы останки 25 оленей, добытых рысями. Жертвами хищников становились в основном молодые олени и только четыре особи были взрослыми самками. Благородные и пятнистые олени являются наиболее крупными и сложными для добывания объектами питания рыси на Среднем Сихотэ-Алине. По следам установлено, что рыси использовали скрадывание при охоте на оленей. Прыжки хищника при преследовании имели длину от 2,1 до 3,7 м. Рыси добывали оленей, запрыгнув на шею и нанося смертельные повреждения дыхательных путей и шейного отдела позвоночника. Хищники кормились добытыми оленями от 2 до 6 дней. Экологические связи рыси с жертвами в заповеднике носят естественный характер. Как евразийская рысь, так и оба вида оленей являются на Дальнем Востоке России охотничьими видами, поэтому их взаимоотношения следует учитывать при рациональном управлении популяциями животных.

Ключевые слова: рысь, благородный олень, пятнистый олень, хищничество, Сихотэ-Алинь

Введение

Евразийская рысь *Lynx lynx* (Linnaeus, 1758) — широко распространённый в Евразии вид, находящийся на Дальнем Востоке на восточной границе своего ареала. В лесных экосистемах Сихотэ-Алиня рысь является хищником по отношению к животным разных размерных категорий: от мышевидных грызунов до крупных копытных. Тем не менее в их питании преобладают жертвы мелкого и среднего размера [Сутырина, Гудрич, Микелл, 2005; Юдин, Юдина, 2019]. В Сихотэ-Алинском заповеднике рыси питаются в основном кабаргой *Moschus moschiferus* Linnaeus, 1758, сибирской косулей *Capreolus pygargus* Pallas, 1771, зайцем-беляком *Lepus timidus* Linnaeus, 1758, маньчжурским зайцем *L. mandshuricus* Radde, 1861, рябчиком *Tetrastes bonasia* (Linnaeus, 1758) и грызунами [Рысь … , 2003; Сутырина, Гудрич, Микелл, 2005]. Благородный олень *Cervus elaphus* Linnaeus, 1758 и пятнистый олень *C. nippon* Temminck, 1838 являются второстепенными, но наиболее крупными объектами охоты для рыси [Юдин, Юдина, 2019]. В отношении оленей конкурентами рыси на Сихотэ-Алине являются тигр *Panthera tigris* (Linnaeus, 1758) и волк *Canis lupus* Linnaeus, 1758, для которых представители рода *Cervus* являются важнейшим пищевым ресурсом [Юдин, Юдина, 2009; Серёдкин и др., 2012; Юдин, 2013; Kerley et al., 2015].

Изучение хищничества евразийской рыси по отношению к благородному и пятнистому оленям представляет интерес, поскольку данные объекты охоты наиболее крупные и, предположительно, сложные для добывания хищником среднего размера. Новая информация о взаимоотношениях животных актуальна для понимания функционирования системы хищник — жертва. На особо охраняемой природной территории федерального значения, каковой является Сихотэ-Алинский заповедник, взаимоотношения хищника с жертвами носят эталонный характер. По этой причине исследования на территории с низким антропогенным прессом позволяют

выявить экологические характеристики, присущие животным в их естественной среде обитания. Тем не менее как рысь, так и оба вида оленей на большей части территории Дальнего Востока России имеют статус охотничьих видов. Охота на благородного и пятнистого оленей очень востребована у населения в Приморском крае. Знание экологии рыси и оленей, в частности взаимоотношений между ними, имеет практический интерес для рационального управления популяциями этих охотничьих видов животных.

Целью данного исследования являлось изучение хищничества евразийской рыси по отношению к благородному и пятнистому оленям на Среднем Сихотэ-Алине. В задачи работы входило выявление фактов добывания оленей разных половозрастных групп рысями, описание способов и особенностей охоты на оленей и продолжительности утилизации жертв хищниками.

Материалы и методы

Исследования проходили в рамках научных программ в Приморском крае, на территории Сихотэ-Алинского государственного биосферного заповедника и его окрестностей в 1992–2023 гг. [Серёдкин, 2014]. Территория исследования относится к Среднему Сихотэ-Алиню, характеризующемуся среднегорным ландшафтом и климатом с ярко выраженным муссонным характером [Ветренников, 1976]. Важнейшими местообитаниями рыси являются широколиственные и кедрово-широколиственные леса.

Добытых рысями оленей обнаруживали при обследовании территории, при троплении хищников, а также при посещении мест долговременного пребывания на одном месте двух самцов рыси, оснащённых радиоошейниками (MOD-400, Telonics; Biotrack Biothane collars TW3). Координаты предполагаемых мест кормления меченых хищников определяли с помощью радиотелеметрии.

Всего обнаружили останки 9 благородных оленей и 16 пятнистых оленей, добытых рысями. Для каждой жертвы определяли вид, пол и возраст, степень утилизации её съедобных частей (без учёта костей и шкуры) хищниками, предполагаемую продолжительность пребывания рыси на жертве. Отмечали способ умерщвления оленя хищником. По следам на снегу, когда это было возможно, описывали особенности и тактику охоты рыси. Все жертвы были добыты одиночными рысями. В пяти случаях был известен пол хищников, поскольку они были оснащены радиоошейниками.

Результаты

Из обнаруженных благородных оленей, являющихся жертвами рысей, было 5 самок, 1 самец и в трёх случаях пол не был определён. Только 1 жертва была взрослой самкой (рис. 1), остальные 8 — сеголетками. Пол рысей, добывших благородных оленей, был известен в двух случаях, оба раза это были взрослые самцы, добывшие самок первого года жизни.

Из пятнистых оленей — жертв рысей — 7 были самками, в остальных случаях пол не был установлен. Больше всего жертвы были представлены сеголетками (8 случаев). Кроме того, были 2 оленя второго года жизни, 3 особи в возрасте 2–3 лет и 3 самки более старших возрастов. Трижды сеголетков пятнистых оленей добывали взрослые самцы рыси, в остальных случаях пол хищников был неизвестен.

Обнаруженные благородные и пятнистые олени были добыты рысями в разные сезоны: 6 раз в январе, 4 — в феврале, 5 — в марте, 2 — в апреле, 1 — в августе, 1 — в ноябре и 6 — в декабре.

На останках 3 благородных и 9 пятнистых оленей присутствовали следы их умерщвления рысью. Во всех случаях следы прокусов клыками присутствовали на шее или нижней части головы жертв. У благородных оленей имелись прокусы глотки или трахеи (рис. 1). У 4 пятни-

Рис. 1. Взрослая самка благородного оленя со следами прокусов евразийской рыси в Сихотэ-Алинском государственном заповеднике

стых оленей помимо прокусов дыхательных путей клыками были повреждены позвонки шейного отдела, а у одного из сеголетков имелся прокус сочленения черепа с первым шейным позвонком. У годовалой самки пятнистого оленя был повреждён глаз и расцарапана когтями голова.

В трёх случаях удалось выявить некоторые обстоятельства нападения рысей на благородных оленей. Взрослый самец рыси подкрался к сеголетку из-за укрытия на 7 м и преодолел это расстояние тремя прыжками, настигнув жертву на месте; следы борьбы оставлены животными на площадке длиной 6 м и шириной 2 м. В другом случае протяжённость следов противостояния сеголетка оленя хищнику составила 15 м. В третьем случае рысь умертвила взрослую самку благородного оленя в 2 м от места, где набросилась на неё.

Для трёх охот на пятнистых оленей определены дистанции до жертвы на момент нападения и длина отдельных прыжков рысей. Взрослый самец рыси, добывший сеголетка оленя в январе, напал на него, когда тот лежал. Хищник, скрадывая жертву, приблизился к ней на 10 м. Бросившись на оленя, рысь настигла её в 3 прыжка, протяжённость которых была 3,0; 2,6 и 3,7 м. Тот же самец рыси в январе добыл сеголетка оленя, совершив 9 прыжков, длина которых составила 2,1; 2,3; 2,7; 2,7; 2,6; 2,4; 2,9; 2,8 и 2,6 м. Другая рысь в декабре спускалась по склону и, обнаружив отдыхающих пятнистых оленей, подкрадывалась к ним на протяжении 80 м. С 20 м хищник совершил нападение и, сделав 8 прыжков, задавил сеголетка оленя на лёжке.

Перетаскивание добытой жертвы рысью отмечено только один раз. Хищник протащил тушу трёхгодовалого пятнистого оленя 5 м, скрыв её под упавшим деревом. Удалось установить, что рыси забрасывали жертв ветками, лесной подстилкой или снегом 6 раз: 4 раза — пятнистых оленей и 2 раза — благородных оленей. Один раз рысь не укрывала жертву (взрослую самку пятнистого оленя), в остальных случаях не удалось установить, прибегали ли рыси к такому поведению.

Рыси оставались на крупных жертвах, каковыми являются олени, до 6 дней (табл. 1). Такое время потребовалось взрослому самцу для почти полной утилизации сеголетка пятнистого оленя. Другой взрослый самец рыси за 4 дня использовал тушу почти годовалой самки благородного оленя на 85 %. Быстрее хищники объедали съедобные части сеголетков пятнистого оленя: за 2 дня на 90 % и за 3 дня на 100 % (табл. 1). При полной утилизации оленей рысями оставались только кости и шкура (рис. 2).

Таблица 1

Длительность и степень утилизации (поедания) оленей рода *Cervus* евразийскими рысями в Сихотэ-Алинском государственном заповеднике и его окрестностях в 1992–2023 гг.

Пол рыси	Месяц	Количество дней пребывания на жертве	Процент утилизации съедобных частей	Вид жертвы	Пол жертвы	Возраст жертвы
Неизвестно	декабрь	2–3	45	благородный олень	самка	сеголеток
Самец	декабрь	3	50	благородный олень	самка	сеголеток
Самец	март	4	85	благородный олень	самка	сеголеток
Неизвестно	декабрь	2	90	пятнистый олень	неизвестно	сеголеток
Неизвестно	февраль	2	55	пятнистый олень	неизвестно	сеголеток
Неизвестно	декабрь	2–3	40	пятнистый олень	самка	взрослая
Самец	январь	3	65	пятнистый олень	неизвестно	сеголеток
Самец	январь	3	100	пятнистый олень	неизвестно	сеголеток
Самец	ноябрь	6	95	пятнистый олень	неизвестно	сеголеток

Из падальщиков у добытых рысями оленей обнаружены следы или визуально зарегистрированы: енотовидная собака *Nyctereutes procyonoides* (J.E. Gray, 1834), орлан-белохвост *Haliaeetus albicilla* (Linnaeus, 1758), белоплечий орлан *H. pelagicus* (Pallas, 1811), восточная чёрная ворона *Corvus* (*corone*) *orientalis* Eversmann, 1841 и большеклювая ворона *C. macrorhynchos* Wagler, 1827.

Рис. 2. Останки пятнистого оленя, добытого и съеденного евразийской рысью в Сихотэ-Алинском государственном заповеднике

Евразийская рысь добывает представителей рода *Cervus* в разных частях своего ареала. Благородный олень входит в состав кормов рысей в Эстонии, Белоруссии, Казахстане, Средней Сибири, на Западном Кавказе, Алтае [Рысь … , 2003], в Польше [Jędrzejewski et al., 1993]; Okarma et al., 1997; Mysłajek et al., 2022], Германии [Schulz, 2016], Словении [Buzan et al., 2024] и Чехии [Cerveny, Bufka, 1996]. В большей части регионов, как и на Среднем Сихотэ-Алине, благородный олень не входит в состав первостепенных кормов хищников [van Beeck Calkoen et al., 2023].

По данным ежегодной регистрации находок остатков жертв рысей в Сихотэ-Алинском заповеднике в 1964–1995 гг., благородный олень составлял 14,9 % [Рысь … , 2003]. По обновлённым данным С. В. Сутыриной с соавторами [Сутырина, Гудрич, Микелл, 2005], этот показа-

тель в заповеднике исчислялся 20,2 %. Необходимо отметить, что относительно крупные жертвы, такие как благородный олень, исследователям обнаружить легче, чем добычи меньшего размера. По этой причине доля оленей от общего числа зарегистрированных жертв рыси может быть завышена.

Известна встречаемость благородного оленя в добыче рыси в других регионах, например в Алтае-Саянской горной системе. Она составляет 21,0 % [Рысь … , 2003]. Благородный олень является одним из основных компонентов в рационе рыси, обитающей на границе Альп и Динарских гор в Словении [Buzan et al., 2024] и в Беловежской пуще в Польше [Okarma et al., 1997].

Ареалы рыси и пятнистого оленя совпадают в меньшей степени, чем ареалы рыси и благородного оленя. Тем не менее известны случаи нападения рыси на акклиматизированных пятнистых оленей в Ленинградской области [Рысь … , 2003]. Описаны случаи гибели от рыси пятнистых оленей на Южном Сихотэ-Алине, в Лазовском заповеднике [Маковкин, 1999]. В Сихотэ-Алинском заповеднике доля пятнистого оленя от общего количества обнаруженных жертв рыси составляла 1,5–3,8 % [Рысь … , 2003; Сутырина, Гудрич, Микелл, 2005]. В последние десятилетия численность пятнистого оленя в заповеднике возрастает, что сказывается на увеличении роли представителей этого вида в рационе рыси. Впервые пятнистый олень включён в список жертв рыси Сихотэ-Алинского заповедника в 1992 г. [Сутырина, Гудрич, Микелл, 2005].

Относительно крупные размеры оленей рода *Cervus,* по сравнению с другими объектами питания евразийской рыси, делают их добывание сложным для хищника, масса которого на Дальнем Востоке не превышает 30 кг [Юдин, Юдина, 2019]. Для сравнения: масса взрослого благородного оленя в среднем составляет 224 и 149 кг для самцов и самок соответственно, а масса пятнистого оленя — 117 кг для самцов и 73 кг для самок [Бромлей, Кучеренко, 1983].

Преобладание в добыче рыси оленей первого года жизни подтверждается как нашим, так и другими исследованиями. Из 9 жертв благородных оленей, обнаруженных в более раннем исследовании в Сихотэ-Алинском заповеднике, 8 являлись сеголетками и только в одном случае был полуторагодовалый самец [Рысь … , 2003]. В Лазовском заповеднике на юге Сихотэ-Алиня среди пятнистых оленей рыси добывали в основном молодых животных и самок. Там был известен только один случай, когда рысью был задавлен трёхлетний самец пятнистого оленя [Маковкин, 1999]. На Алтае рыси добывают молодняк благородных оленей, а взрослых — лишь изредка, в глубокоснежье [Собанский, 2008]. В Беловежской пуще в Польше рыси чаще выбирают оленят и никогда — взрослых самцов благородного оленя [Okarma et al., 1997]. В горах Гарц в Германии среди благородных оленей, добытых рысью, в основном были сеголетки и самки [Schulz, 2016].

На юго-востоке Польши соотношение самцов и самок среди добытых рысью европейских косуль *Capreolus capreolus* (Linnaeus, 1758) близко к 1 : 1 [Mysłajek et al., 2022]. Копытное данного вида имеет меньшие размеры по сравнению с оленями рода *Cervus*, поэтому выбор хищниками косуль по полу отсутствует.

В литературе имеются сведения о том, что рыси определённых половозрастных категорий могут выбирать в качестве жертв оленей разного пола, а значит, и размеров. В Эстонии благородный олень встречается в питании только взрослых самцов [Рысь … , 2003]. В Беловежской пуще взрослые самцы рысей чаще добывали благородных оленей, чем самки или полувзрослые особи [Okarma et al., 1997].

Осмотр повреждений, нанесённых рысями жертвам, позволил установить, что во время охоты хищник запрыгивает на шею оленя и, удерживаясь с помощью когтей, наносит смертельные повреждения дыхательных путей и шейного отдела позвоночника. Подобная тактика умерщвления жертв характерна и для других представителей кошачьих [Leyhausen, 1979; Mazzolli, 2013].

Забрасывание жертвы лесной подстилкой и снегом как элемент её скрытия от других хищников присуще евразийской рыси в разных частях ареала [Jędrzejewski et al., 1993; Cerveny, Bufka, 1996; Рысь … , 2003].

Продолжительность пребывания рыси на жертве зависит от разных факторов, включая пол хищника и размер добычи [Okarma et al., 1997]. В нашем исследовании рыси оставались на олене от 2 до 6 дней, тогда как в Польше 3–4 дня, при этом взрослую самку благородного оленя хищники утилизировали в среднем за 3,8 дней [Jędrzejewski et al., 1993; Okarma et al., 1997]. Имеются основанные на GPS-телеметрии сведения, что время кормления самок рыси больше, чем самцов, на жертвах аналогичного размера [Melovski et al., 2020]. Падальничество других животных может сокращать время пребывания рыси на добыче [Krofel, Skrbinšek, Mohorović, 2019; Duľa, Krofel, 2020].

Заключение

Благородный и пятнистый олени входят в рацион евразийской рыси на Среднем Сихотэ-Алине. Данные объекты питания являются наиболее крупными для рыси. Хищники добывают в основном оленей первого года жизни, в меньшей степени — самок более старших возрастов. При охоте на оленей рысь использует тактику скрадывания. Преследуя жертву, хищник совершает прыжки длиной до 3,7 м. Догнав жертву, рысь запрыгивает на неё и, удерживаясь когтями, наносит зубами смертельные повреждения на шее и нижней части головы. Добытым оленем рысь кормится в течение 2–6 дней.

Благодарности. Работа проведена при содействии администраций и сотрудников Сихотэ-Алинского государственного заповедника, Общества сохранения диких животных и Тихоокеанского института географии ДВО РАН. Особый вклад в осуществление работу внесли А. А. Астафьев, Е. А. Марчук, С. В. Сутырина, Д. Ю. Горшков, Д. Г. Микелл, Д. М. Гудрич, Р. П. Кожичев и Ю. К. Петруненко.

Список литературы

1. *Бромлей Г. Ф., Кучеренко С. П.* Копытные юга Дальнего Востока СССР. – Москва : Наука, 1983. – 305 с.
2. *Ветренников В. В.* Геологическое строение Сихотэ-Алинского государственного заповедника и Центрального Сихотэ-Алиня. – Владивосток : Дальневост. кн. изд-во, 1976. – 167 с.
3. *Маковкин Л. И.* Дикий пятнистый олень Лазовского заповедника и сопредельных территорий : (Материалы исслед. 1981–1996 гг.). – Владивосток : Рус. Остров, 1999. – 133 с.
4. Рысь. Региональные особенности экологии, использования и охраны / отв. ред.: Е. Н. Матюшкин, М. А. Вайсфельд. – Москва : Наука, 2003. – 523 с.
5. *Серёдкин И. В.* Применение радиотелеметрии и спутникового слежения для изучения использования территории дикими животными на Дальнем Востоке России // Ареалы, миграции и другие перемещения диких животных : материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Владивосток, 25–27 нояб. 2014 г.) / Тихоокеан. ин-т географии Дальневост. отд-ния РАН [и др.]. – Владивосток : Рея, 2014. – С. 292–299.
6. *Серёдкин И. В., Зайцев В. А., Гудрич Д. М., Микелл Д. Г., Петруненко Ю. К.* Состав добычи и значение кабана (*Sus scrofa*) в питании амурского тигра (*Panthera tigris altaica*) Среднего Сихотэ-Алиня // Успехи наук о жизни. – 2012. – № 5. – С. 77–93.
7. *Собанский Г. Г.* Звери Алтая. Ч. 1. Крупные хищники и копытные. – Новосибирск ; Москва : Т-во науч. изд. КМК, 2008. – 404 с.

8. *Сутырина С. В., Гудрич Д. М., Микелл Д. Г.* Рысь в Сихотэ-Алинском заповеднике // Результаты охраны и изучения природных комплексов Сихотэ-Алиня : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию ... заповедника, п. Терней, Примор. край, 20–23 сент. 2005 г / редкол.: Е. В. Потиха [и др.]. – Владивосток : Примполиграфкомбинат, 2005. – С. 333–341.
9. *Юдин В. Г.* Волк Дальнего Востока России. – 2-е изд., перераб. и доп. – Владивосток : Дальнаука, 2013. – 412 с.
10. *Юдин В. Г., Юдина Е. В.* Рысь Дальнего Востока России. – Владивосток : ТИГ ДВО РАН, 2019. – 424 с.
11. *Юдин В. Г., Юдина Е. В.* Тигр Дальнего Востока России. – Владивосток : Дальнаука, 2009. – 485 с.
12. *Buzan E., Potočnik H., Pokorny B., Potušek S., Iacolina L., Gerič U., Urzi F., Kos I.* Molecular analysis of scats revealed diet and prey choice of grey wolves and Eurasian lynx in the contact zone between the Dinaric Mountains and the Alps // Frontiers in Zoology. – 2024. – Vol. 21, iss. 1. – Art. 9. – URL: https://frontiersinzoology.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12983-024-00530-6. – Publ.: 19.03.2024.
13. *Cerveny J., Bufka L.* Lynx (*Lynx lynx*) in South-Western Bohemia // Acta Scientiarum Naturalium – Academiae Scientiarum Bohemicae, Brno. – 1996. – Vol. 30. – P. 16–33.
14. *Dul'a M., Krofel M.* A cat in paradise: hunting and feeding behaviour of Eurasian lynx among abundant naive prey // Mammalian Biology. – 2020. – Vol. 100. – P. 685–690. – https://doi.org/10.1007/s42991-020-00070-6
15. *Jędrzejewski W., Schmidt K., Miłkowski L., Jędrzejewska B., Okarma H.* Foraging by lynx and its role in ungulate mortality: the local (Białowieża Forest) and the Palaearctic viewpoints // Acta Theriologica. – 1993. – Vol. 38, no. 4. – P. 385–403. – https://doi.org/10.4098/AT.arch.93-30
16. *Kerley L. L. Mukhacheva A. S., Matyukhina D. S., Salmanova E., Salkina G. P., Miquelle D. G.* A comparison of food habits and prey preference of Amur tiger (*Panthera tigris altaica*) at three sites in the Russian Far East // Integrative Zoology. – 2015. – Vol. 10, iss. 4. – P. 354–364. – https://doi.org/10.1111/1749-4877.12135
17. *Krofel M., Skrbinšek T., Mohorović M.* Using video surveillance to monitor feeding behaviour and kleptoparasitism at Eurasian lynx kill sites // Folia Zoologica. – 2019. – Vol. 68, no. 4. – P. 274–284. – https://doi.org/10.25225/fozo.037.2019
18. *Leyhausen P.* Cat Behavior. The Predatory and Social Behavior of Domestic and Wild Cats. – New York [et al.] : Garland STPM Press, 1979. – 340 p.
19. *Mazzolli M.* Lethal biting behaviour of pumas (Carnivora, Felidae) interpreted from fractured skull of prey // Neotropical Biology and Conservation. – 2013. – Vol. 8, iss. 1. – P. 63–66. – https://doi.org/10.4013/nbc.2013.81.08
20. *Melovski D., Ivanov G., Stojanov A., Avukatov V., Gonev A., Pavlov A., Breitenmoser U., von Arx M., Filla M., Krofel M., Signer J., Balkenhol N.* First insight into the spatial and foraging ecology of the critically endangered Balkan lynx (*Lynx lynx balcanicus*, Buresh 1941) // Hystrix. The Italian Journal of Mammalogy. – 2020. – Vol. 31, iss. 1. – P. 26–34. – https://doi.org/10.4404/hystrix-00254-2019
21. *Mysłajek R. W., Stachyra P., Figura M., Nowak S.* Food habits of the Eurasian lynx *Lynx lynx* in southeast Poland // Journal of Vertebrate Biology. – 2022. – Vol. 71. – Art. 21061. – URL: https://bioone.org/journals/journal-of-vertebrate-biology/volume-71/issue-21061/jvb.21061/Food-habits-of-the-Eurasian-lynx-Lynx-lynx-in-southeast/10.25225/jvb.21061.full. – Publ.: 01.12.2021.

22. *Okarma H., Jędrzejewski W., Schmidt K., Kowalczyk R., Jędrzejewska B.* Predation of Eurasian lynx on roe deer and red deer in Białowieża Primeval Forest, Poland // Acta Theriologica. – 1997. – Vol. 42, no. 2. – P. 203–224. – https://doi.org/10.4098/AT.arch.97-22
23. *Schulz V.* Condition, sex and age of red deer *Cervus elaphus* and roe deer *Capreolus capreolus* in Eurasian lynx *Lynx lynx* diet compared to hunting bags in the Harz Mountains, Germany : thesis for master's degree / Techn. Univ. of Braunschweig. – Braunschweig, 2016. – 46 p.
24. *van Beeck Calkoen S. T. S., Kuijper D. P. J., Apollonio M., Blondel L., Dormann C. F., Storch I., Heurich M.* Numerical top-down effects on red deer (*Cervus elaphus*) are mainly shaped by humans rather than large carnivores across Europe // Journal of Applied Ecology. – 2023. – Vol. 60, iss. 12. – P. 2625–2635. – https://doi.org/10.1111/1365-2664.14526

DEER OF THE GENUS *CERVUS* AS PREY OF THE EURASIAN LYNX (*LYNX LYNX*) IN THE MIDDLE SIKHOTE-ALIN

Seryodkin I. V.

Pacific Geographical Institute of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation,
e-mail: seryodkinivan@inbox.ru

Abstract: In order to study the predation of the Eurasian lynx (*Lynx lynx*) on the red deer (*Cervus elaphus*) and sika deer (*C. nippon*), studies were conducted in the Sikhote-Alin Biosphere Reserve and its environs (south of the Russian Far East) in 1992–2023. The remains of 25 deer killed by lynxes were examined. The predators mainly preyed on young deer, and only four individuals were adult females. Red and sika deer are the largest and most difficult to obtain prey for lynxes in the Middle Sikhote-Alin. Based on the tracks, it was established that lynxes used sneaking when hunting deer. The predator's jumps during prey stalking were from 2.1 to 3.7 m long. Lynxes got deer by jumping on their necks and causing fatal damage to the respiratory tract and cervical spine. The predators fed on the deer they got for 2 to 6 days. The ecological relationships between the lynx and its prey in the Reserve are natural. The Eurasian lynx and both species of deer are game species in the Russian Far East, so their relationships should be taken into account in the sustainable management of animal populations.
Keywords: ungulates, predator-prey system, predation, carnivorans, animal ecology

Сведения об авторе

Серёдкин Иван Владимирович	кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук», ул. Радио, 7, г. Владивосток, 690041, Российская Федерация, seryodkinivan@inbox.ru

Поступила в редакцию 05.11.2024 г.
Принята к публикации 06.12.2024 г.

СТРУКТУРА, ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМ

УДК [911.52:528.8](292.471-12)

DOI: 10.21072/eco.2024.09.3.04

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ТИПОВ НАЗЕМНОГО ПОКРОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ БАЗ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КРЫМА *

Дрыгваль А. В.[1,2,3], Дрыгваль П. В.[1,2,4], Табунщик В. А.[3], Горбунова Т. Ю.[3]

[1] *Карадагская научная станция им. Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН – филиал ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», г. Феодосия, пгт Курортное, Российская Федерация,*

[2] *Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация,*

[3] *ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», г. Севастополь, Российская Федерация,*

[4] *ФГУП «Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России», г. Москва, Российская Федерация,*

e-mail: drygval95@mail.ru

Аннотация: В настоящей работе проведён анализ изменения площадей типов наземного покрова Юго-Восточного Крыма (на территории в целом и отдельно по ландшафтным контурам) в динамике. Тематические карты типов наземного покрова были взяты из открытых баз пространственных данных: Globcover, ESRI Land Cover, Copernicus Global Land Cover, Land Cover CCI; рассмотрены преимущества и недостатки их использования. Показано, что Land Cover CCI и Globcover, имея самое низкое пространственное разрешение из всех баз данных, не позволяют увидеть мелкие элементы земельного покрова, которые важны для наблюдений за локальными процессами в ландшафтах, хотя Land Cover CCI имеет широкое временное покрытие территории (1992–2020 гг.). ESRI Land Cover подходит для такой задачи в силу своего пространственного разрешения. База данных Copernicus Global Land Cover не показала никакой динамики типов наземного покрова. Для выявления изменения типов наземного покрова в Юго-Восточном Крыму в сторону роста или снижения площадей был проведён факторный анализ рассматриваемых баз данных. Для сравнения баз спутниковых данных между собой был проведён дисперсионный анализ унифицированных до единой классификации данных о типах наземного покрова.

Ключевые слова: типы наземного покрова, спутниковые базы данных, Юго-Восточный Крым, ландшафты, факторный анализ, дисперсионный анализ

Введение

Наземный покров является одним из важных параметров при изучении экологического состояния территории. Являясь звеном между атмосферой, гидросферой, литосферой и биосферой, он перераспределяет вещество и энергию в природных комплексах. Мониторинг изменения типов наземного покрова территории является актуальной задачей для рационального использования природных ресурсов. Удобным инструментом для решения этой задачи является спутниковое

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Изучение особенностей функционирования и динамики субтропических и тропических прибрежных экосистем в условиях изменения климата и антропогенной нагрузки с использованием методов дистанционных исследований, технологий облачной обработки информации и машинного обучения для создания научных основ их рационального использования» (№ гос. регистрации 124030100030-0). Работа поддержана Программой стратегического академического лидерства РУДН.

дистанционное зондирование Земли, с помощью которого осуществляется эффективный мониторинг типов наземного покрова путём сбора долгосрочных данных наблюдения Земли с высоким разрешением через орбитальные платформы [Yang, Huang, 2021].

В настоящее время технологии дистанционного зондирования и географические информационные системы являются привлекательными для исследователей, так как их продукты находятся в свободном доступе, имеют широкое пространственное покрытие Земли с различным разрешением и с разновременной периодичностью снимков, что, в свою очередь, позволяет изучать наземный покров в динамике на разных масштабах — от глобального до регионального. Доступность баз данных высокого разрешения позволяет осуществлять крупномасштабный мониторинг типов наземного покрова [Yang, Huang, 2021] для различных целей, что успешно осуществляется исследователями по всему миру. Например, с помощью различных баз данных типов наземного покрова проводятся: определение взаимосвязи между падением уровня грунтовых вод и изменением типов наземного покрова на территории [Singh S., Singh C., Mukherjee, 2010]; анализ влияния изменения типов наземного покрова на экосистемные услуги водоснабжения для бытового использования [Twisa et al., 2020]; выявление основных проблем в картировании растительного покрова в регионе Нижнего Меконга и Гиндукуш-Гималаев [Saah et al., 2019]; изучение типов наземного покрова как регионально (например, Китая [Yang, Huang, 2021], Монголии [Wang et al., 2022] и Индии [Singh et al., 2015], Южно-Центрального и Восточно-Европейского регионов [Manakos et al., 2018], Западной Африки [Kaptue Tchuente, Roujean, Faroux, 2010], полуострова Крым [Табунщик, Горбунов, 2022; Горбунова, Гапон, Горбунов, 2017]), так и глобально [Potapov et al., 2022], в том числе сравнивая между собой разные глобальные базы данных типов наземного покрова [Venter et al., 2022; Fritz et al., 2017; Manakos et al., 2018].

Для понимания экологических проблем, связанных с изменением климата и антропогенной нагрузкой на территории, необходимо провести анализ динамики распределения типов наземного покрова изучаемой территории, так как она является продуктом совокупного действия этих двух факторов.

В настоящей работе в качестве региона исследования динамики распределения типов наземного покрова была выбрана территория Юго-Восточного Крыма.

Целью исследования является определение пространственно-временных различий в типах наземного покрова Юго-Восточного Крыма на основе разных открытых баз данных дистанционного зондирования.

Материалы и методы

Район исследования

Территорией исследования является Юго-Восточный Крым, он включает в себя южный макросклон Главной гряды Крымских гор и всё побережье с запада на восток (полоса от г. Алушты до г. Феодосии, рисунок 1). Благодаря географическому расположению полуострова климат Юго-Восточного Крыма субтропический, средиземноморского типа, характеризуется наименьшим количеством осадков (максимум их выпадения приходится на летний сезон) и большей сухостью воздуха по сравнению с остальной частью Горного Крыма [Кочкин, 1952], что в совокупности с горным рельефом отражается на петрофитном характере растительности, а в целом природные комплексы отличают субсредиземноморские черты. Экзогенные геологические процессы, такие как абразия, эрозия и оползни, формируют здесь так называемые бедлэнды [Современные ландшафты … , 2009].

Рис. 1. Расположение Юго-Восточного Крыма

Операционно-территориальными единицами исследования являются пять ландшафтов, выделенные Л. А. Багровой [Багрова, 1974] (рисунок 2): Туакский, Пречемско-Карадагский, Судакско-Меганомский, Демерджи-Ускутский, Зеленогорский.

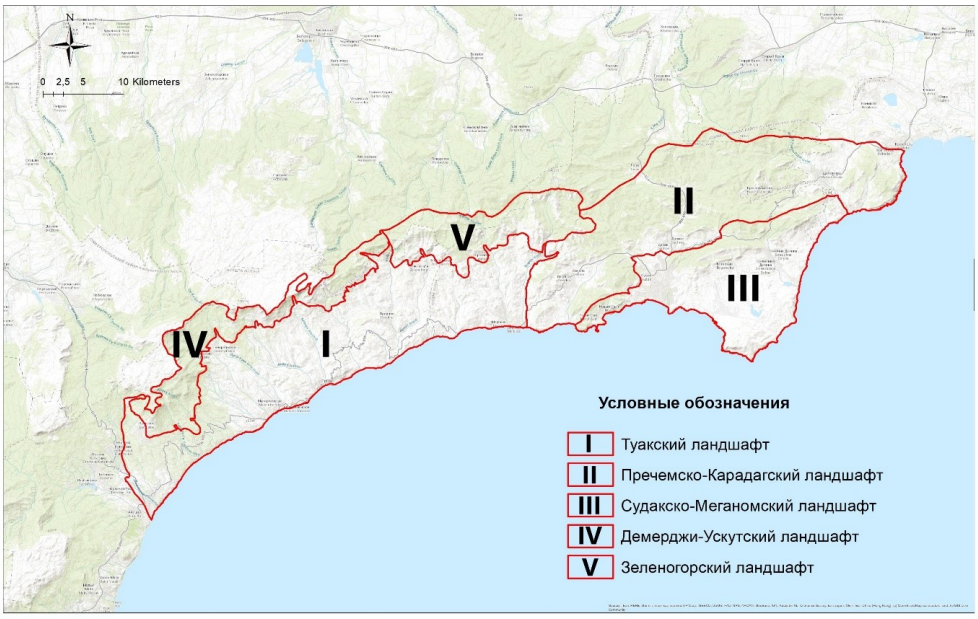

Рис. 2. Ландшафты Юго-Восточного Крыма согласно [Багрова, 1974]

Подробная информация о ландшафтах Юго-Восточного Крыма, согласно [Багрова, 1974], представлена в таблице 1.

Таблица 1

Ландшафты Юго-Восточного Крыма согласно [Багрова, 1974]

№ п/п	Ландшафтный ярус, м н. у. м.	Название ландшафта	Характеристика ландшафта	Площадь, км^2
1	Низкогорный (до 450–500)	Туакский	эрозионно-денудационное низкогорье с фисташково-дубовым лесом, можжевеловым редколесьем и шибляково-фригановыми зарослями	268,3
2	Низкогорный (до 450–500)	Пречемско-Карадагский	эрозионно-денудационное низкогорье с ясенево-грабинниково-дубовым лесом	242,3
3	Низкогорный (до 450–500)	Судакско-Меганомский	эрозионно-денудационная волнистая равнина и низкогорные хребты с шибляково-степной растительностью и сосново-можжевеловым редколесьем	134,9
4	Среднегорный ярус (до 1000–1200)	Демерджи-Ускутский	эрозионно-денудационное среднегорье с буково-грабово-дубовым лесом	72,5
5	Среднегорный ярус (до 1000–1200)	Зеленогорский	эрозионно-денудационное среднегорье с дубовым шибляком и петрофитной степью	68,9

Базы данных дистанционного зондирования

В работе для оценки динамики распределения типов наземного покрова территории Юго-Восточного Крыма, в том числе в пределах ландшафтных контуров, были использованы несколько открытых баз пространственных данных: Globcover [GlobCover], ESRI Land Cover [ESRI Land Cover], Copernicus Global Land Cover [Copernicus Global …], Land Cover CCI [Download CCI …]. Надо сказать, что их продукты в виде слоёв типов наземного покрова имеют свои ограничения, поскольку различны по пространственному разрешению, имеют разную точность эмпирической модели отображения типов наземного покрова и были созданы с использованием разных методов интерпретации данных, полученных от разных датчиков спутников дистанционного зондирования, имеют свои несовершенства калибровочных данных из-за облачности, а также относятся к разным классификациям типов наземного покрова, которые, в свою очередь, тоже имеют свои преимущества и недостатки.

Используемые в работе базы данных о типах наземного покрова и их технические характеристики представлены в таблице 2.

Набор данных Globcover [GlobCover] представляет собой результат реализации проекта Европейского космического агентства (European Space Agency), где в качестве исходных использовались данные с 300-метрового датчика MERIS на борту спутниковой миссии ENVISAT. База данных охватывает два периода: декабрь 2004 г. — июнь 2006 г. и январь — декабрь 2009 г. Минимальный размер операционной единицы (пикселя) составляет 300 * 300 м. Все данные этого ресурса составляют 18 типов наземного покрова, однако на территории Юго-Восточного Крыма представлены 11.

Таблица 2

Источники и характеристики пространственных растровых данных

№ п/п	Источник данных	Разрешение (размер пикселя), м	Временной период, год
1	Globcover [GlobCover]	300 * 300	2005–2006, 2009
2	ESRI Land Cover [ESRI Land Cover]	10 * 10	2017–2021
3	Copernicus Global Land Cover [Copernicus Global …]	100 * 100	2015–2019
4	Land Cover CCI [Download CCI …]	300 * 300	1992–2020

Набор данных ESRI Land Cover [ESRI Land Cover] также даёт возможность картировать типы наземного покрова изучаемой нами территории. В базе данных ESRI Land Cover доступна информация за 2017–2021 гг., что позволяет оценить динамику изменения типов наземного покрова в пределах рассматриваемых ландшафтов. Разрешение пикселя — 10 метров. Классификация земель насчитывает 9 классов наземного покрова, 6 из которых встречаются на рассматриваемой в настоящей статье территории.

Набор данных Copernicus Global Land Cover [Copernicus Global …] представлен динамической картой наземного покрова, которая является продуктом глобальной наземной службы Copernicus — The Copernicus Global Land Service, с временным покрытием 2015–2019 гг. Разрешение слоёв — 100 м. В системе классификации типов наземного покрова набора данных Copernicus Global Land Cover на исследуемой территории выделяется 15 типов.

Набор данных Land Cover CCI [Download CCI …] также представляет собой результат реализации проекта «Инициатива по изменению климата (Climate change initiatiue)» Европейского космического агентства (European Space Agency). База данных [Download CCI …] содержит:

• новый временной ряд глобальных карт с пространственным разрешением 300 метров с 1992 по 2015 г.;

• ряд архивных слоёв поверхности AVHRR HRPT на расстоянии 1 км с 1992 по 1999 г.;

• архив слоёв поверхности MERIS с 2003 по 2011 г. (разрешение 300 м и 1 км);

• временной ряд слоёв PROBA-V на расстоянии 1 км с середины марта 2014 г. до конца 2015 г.;

• статическую карту открытых водоёмов с данными ENVISAT ASAR;

• 3 слоя поверхности Земли с определением сезонности земной поверхности, характеризующей динамику растительности, распространение снежного покрова и выгоревших площадей.

Мы рассматриваем среднегодовые карты типов наземного покрова Land Cover CCI с пространственным разрешением 300 м за период 1992–2020 гг. На территории Юго-Восточного Крыма определяются 15 типов наземного покрова рассматриваемой базы данных.

Информация о типах наземного покрова баз данных была визуализирована в программном комплексе Arcgis 10.2.

С целью проанализировать изменения наземного покрова в динамике был проведён факторный анализ каждой базы спутниковых данных, где в качестве анализируемых данных использовалось количество пикселей типов наземного покрова на растровых слоях первого и последнего годов временного ряда базы данных.

Дисперсионный анализ был проведён для сравнения баз данных типов наземного покрова между собой. Для этого все классификации типов наземного покрова были унифицированы и приведены в соответствие с классификацией ESRI Land Cover: 1 — водные объекты; 2 — деревья;

3 — сельскохозяйственные культуры; 4 — застроенная территория; 5 — оголённые участки; 6 — смесь небольших скоплений растений или одиночных растений, рассеянных по территории, в виде трав и кустарников. Для каждого типа наземного покрова были рассчитаны площади, которые потом использовались в качестве исходных данных для дисперсионного анализа. Дисперсионный анализ и факторный анализ площадей типов наземного покрова на территории был проведён в программе Exel.

Хотя в работе [Venter et al., 2022] подчёркивается важность оценки площади не только на основе подсчёта пикселей, для цели нашего исследования этот подход уместен, так как мы сравниваем базы данных для рассмотрения недостатков и преимуществ каждой из них при картировании типов наземного покрова территории.

Результаты и обсуждение

Были составлены карты типов наземного покрова за каждый год с использованием всех рассматриваемых баз спутниковых данных: Globcover [GlobCover], ESRI Land Cover [ESRI Land Cover], Copernicus Global Land Cover [Copernicus Global …], Land Cover CCI [Download CCI …] — для визуализации распределения типов наземного покрова на территории Юго-Восточного Крыма.

На рисунке 3 представлено распределение типов наземного покрова базы данных Globcover [GlobCover] на рассматриваемой территории за 2005–2006 и 2009 гг. Названия типов наземного покрова базы данных (условные обозначения) указаны в подписи к рисунку 3.

На рисунке 4 на основе базы данных ESRI Land Cover [ESRI Land Cover] представлено пространственное распределение типов наземного покрова на территории Юго-Восточного Крыма за период 2017–2021 гг. Названия типов наземного покрова в качестве условных обозначений указаны в подписи к рисунку 4.

На рисунке 5 на основе базы данных Copernicus Global Land Cover [Copernicus Global …] представлено распределение типов наземного покрова на рассматриваемой территории за период 2015–2019 гг. Названия типов наземного покрова базы данных (условные обозначения) приведены в подписи к рисунку 5.

На рисунке 6 на основе базы данных Land Cover CCI [Download CCI …] представлено пространственное распределение типов наземного покрова на территории Юго-Восточного Крыма за период 1992–2020 гг. Названия типов наземного покрова указаны в качестве условных обозначений в подписи к рисунку 6.

Набор данных Globcover. Для анализа базы данных Globcover был проведён факторный анализ. Входными данными для анализа послужило количество пикселей типов наземного покрова в растровых слоях 2005–2006 и 2009 гг. По результатам факторного анализа построены диаграммы, отражающие рост и снижение количества пикселей в растровых слоях типов наземного покрова на территории Юго-Восточного Крыма в целом и отдельно по ландшафтным контурам (рисунок 7).

В целом на рисунке 7 показано, что на территории Юго-Восточного Крыма наибольшим ростом площадей отличается тип наземного покрова «густой (> 40 %) широколиственный лес (> 5 м)», где данный показатель составляет 12,06 %, также этот тип наземного покрова занимает наибольшую площадь на рассматриваемой территории. Густые широколиственные леса представлены дубовыми, грабовыми, вязовыми и хвойными лесами. Данный тип растительного покрова в основном встречается в Пречемско-Карадагском (рост на 10,97 %), Демерджи-Ускутском (рост на 30,51 %) ландшафтах, где густые широколиственные леса занимают почти половину, а в некоторых случаях — больше половины территории ландшафта. В Туакском и Судакско-Меганомском ландшафтах также произошёл рост площадей густого широколиственного леса (на 15,96 и 2,12 % соответственно). В Зеленогорском ландшафте, напротив, практически никаких изменений не произошло в рассматриваемом типе наземного покрова, его площадь незначительно снизилась (на 0,30 %).

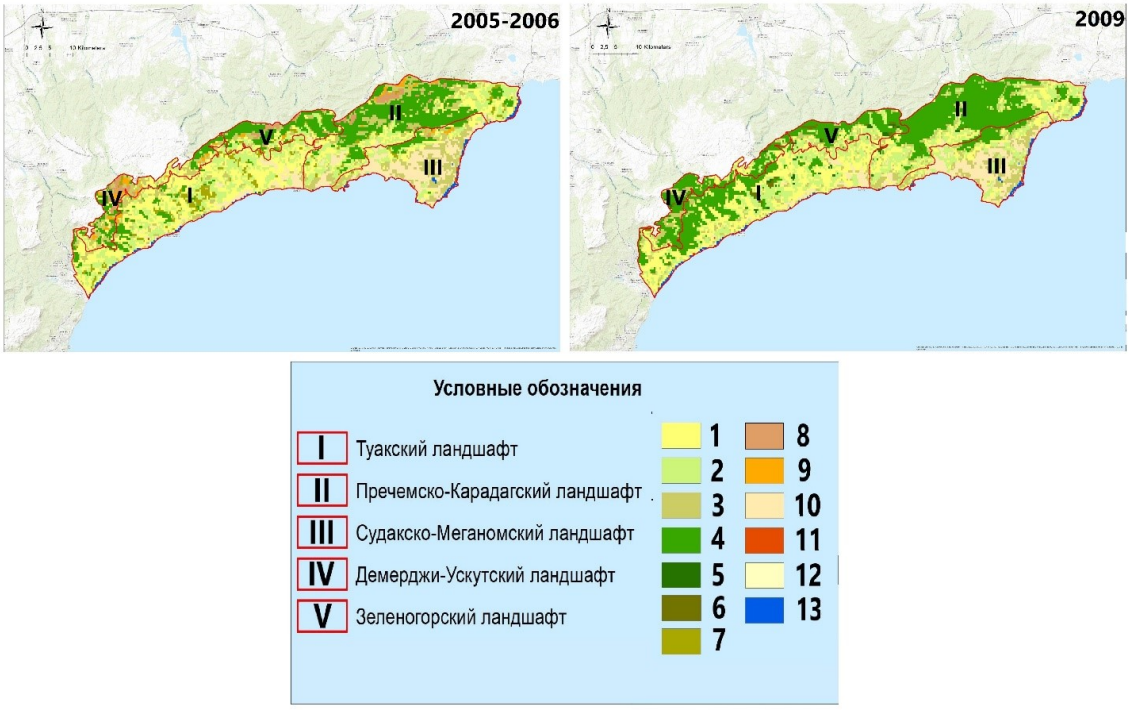

Рис. 3. Распределение типов наземного покрова Юго-Восточного Крыма на основе базы данных Globcover. Условные обозначения [Табунщик, Горбунов, 2022]:1— неорошаемые пахотные земли, богарные пашни; 2 — мозаичные пахотные земли (50–70 %) / растительность (луга, кустарники, леса) (20–50 %); 3 — мозаичная растительность (луга, кустарники, лес) (50–70 %) / пахотные земли (20–50 %); 4 — густой (> 40 %) широколиственный лес (> 5 м высотой); 5 — густой (> 40 %) хвойный вечнозелёный лес (> 5 м высотой); 6 — густой и редкий (> 15 %) смешанный широколиственный и хвойный лес (> 5 м высотой); 7 — мозаичный лес / кустарник (50–70 %) / пастбище (20–50 %); 8 — мозаичные пастбища (50–70 %) / леса / кустарники (20–50 %); 9 — густые и редкие (> 15 %) луга; 10 — разреженная (> 15 %) растительность (древесная растительность, кустарники, луга); 11 — искусственные поверхности и связанные с ними территории (городские территории > 50 %); 12 — оголённые участки; 13 — водные объекты

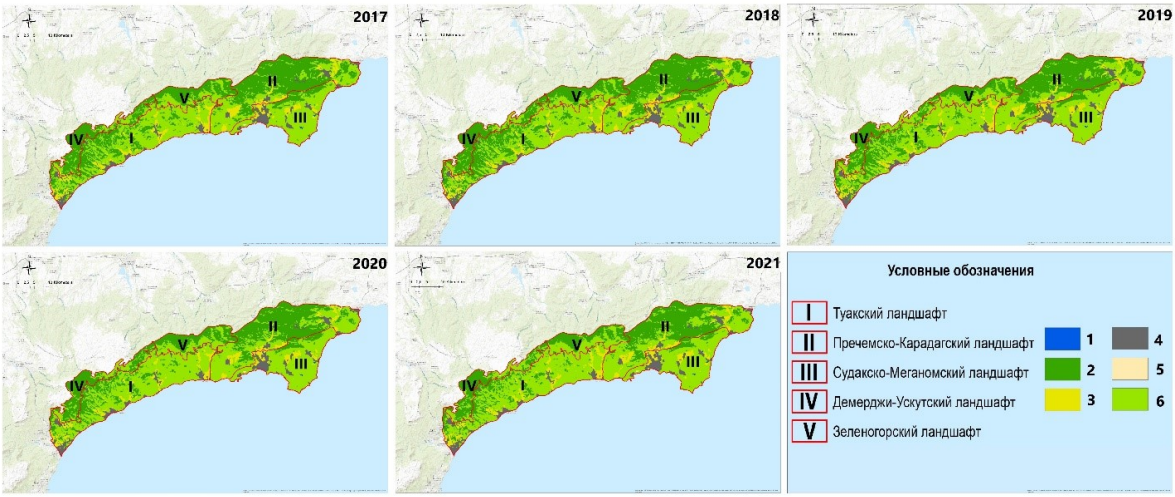

Рис. 4. Распределение типов наземного покрова Юго-Восточного Крыма на основе базы данных ESRI Land Cover в период 2017–2021 гг. Условные обозначения [Табунщик, Горбунов, 2022]: 1 — водные объекты; 2 — деревья; 3 — сельскохозяйственные культуры; 4 — застроенная территория; 5 — оголённые участки; 6 — смесь небольших скоплений растений или одиночных растений, рассеянных по территории, в виде трав и кустарников

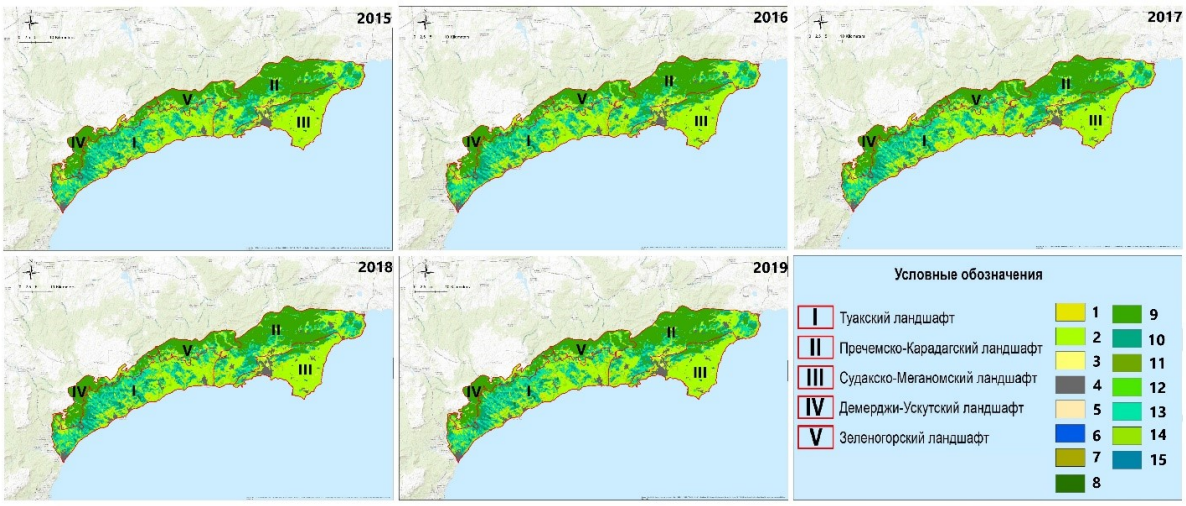

Рис. 5. Распределение типов наземного покрова Юго-Восточного Крыма на основе базы данных Copernicus Global Land Cover в период 2015–2019 гг. Условные обозначения [Табунщик, Горбунов, 2022]: 1 — кустарники; 2 — травянистая растительность; 3 — возделываемая растительность / сельское хозяйство (пахотные земли); 4 — городские застроенные земли; 5 — оголённые земли / разреженная растительность; 6 — водные объекты; 7 — травянистые водно-болотные угодья; 8 — густой хвойный лес; 9 — густой широколиственный лес; 10 — густой смешанный лес; 11 — густой лес (состав неизвестный, не соответствующий ни одному из других определений); 12 — редкий широколиственный лес; 13 — редкий смешанный лес; 14 — редкий лес (состав неизвестный, не соответствующий ни одному из других определений); 15 — открытое море

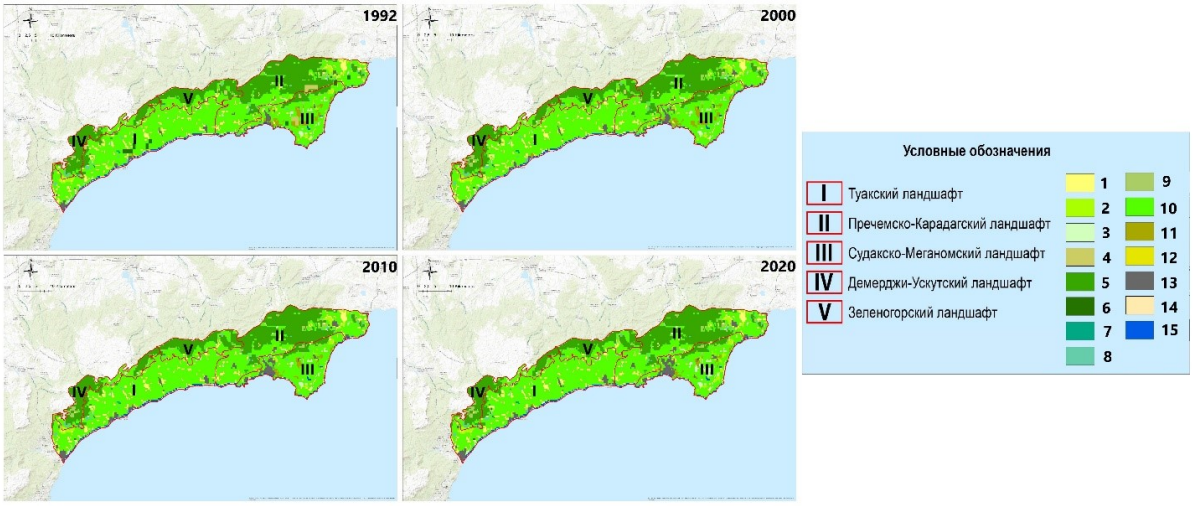

Рис. 6. Распределение типов наземного покрова Юго-Восточного Крыма на основе базы данных Land Cover CCI в период 1992–2020 гг. Условные обозначения [Табунщик, Горбунов, 2022]: 1 — пахотные земли; 2 — травянистый покров; 3 — мозаичные пахотные земли (> 50 %) / естественная растительность (деревья, кустарники, травянистый покров) (< 50 %); 4 — мозаичная естественная растительность (деревья, кустарники, травянистый покров) (> 50%) / пахотные земли (< 50 %); 5 — древесный покров, широколиственный, лиственный, густой или редкий (> 15 %); 6 — древесный покров, хвойный, вечнозелёный, густой или редкий (> 15 %); 7 — древесный покров, смешанный тип листьев (широколиственный и хвойный); 8 — мозаичные деревья и кустарники (> 50 %) / травянистый покров (< 50 %); 9 — мозаичный травянистый покров (> 50 %) / деревья и кустарники (< 50 %); 10 — луга; 11 — редкая растительность (деревья, кустарники, травянистый покров) (< 15 %); 12 — кустарниковый или травянистый покров, затопленный, пресная/солёная вода; 13 — селитебные территории; 14 — голые участки; 15 — водные объекты

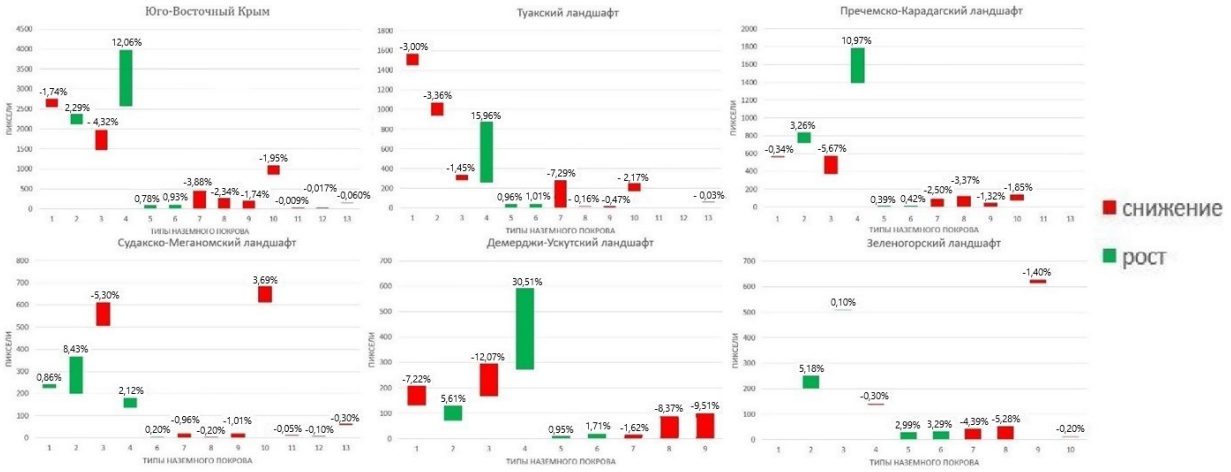

Рис. 7. Рост и снижение площадей типов наземного покрова в динамике (2005–2006 и 2009 гг.) на территории Юго-Восточного Крыма согласно набору данных Globcover

На территории Юго-Восточного Крыма, согласно данным Globcover, также произошёл рост площадей следующих типов наземного покрова: «мозаичные пахотные земли (50–70%) / растительность (луга, кустарники, леса) (20–50%)» — на 2,29 %, «густой (> 40 %) хвойный вечнозелёный лес (> 5 м)» — на 0,78 % и «густой и редкий (> 15 %) смешанный широколиственный и хвойный лес (> 5 м)» — на 0,93 %. Рост площадей типа наземного покрова «мозаичные пахотные земли (50–70 %) / растительность (луга, кустарники, леса) (20–50 %)» произошёл в основном из-за их увеличения в Судакско-Меганомском ландшафте (на 8,43 %), в Демерджи-Ускутском ландшафте (на 5,6 %), в Зеленогорском ландшафте (на 5,18 %) и в Пречемско-Карадагском ландшафте (на 3,26 %). В Туакском ландшафте наблюдается снижение площади этого типа наземного покрова на 3,36 %.

Площадь типа наземного покрова «густой (> 40 %) хвойный вечнозелёный лес (> 5 м)» увеличилась в Зеленогорском ландшафте на 2,99 %, в Туакском и Демерджи-Ускутском ландшафтах — на 0,96 и 0,95 % соответственно, в Пречемско-Карадагском — незначительно (на 0,39 %). В Судакско-Меганомском ландшафте этого типа наземного покрова нет. Рост площади типа наземного покрова «густой и редкий (> 15 %) смешанный широколиственный и хвойный лес (> 5 м)» отмечен в Зеленогорском ландшафте (на 3,29 %), Демерджи-Ускутском ландшафте (на 1,71 %), Туакском ландшафте (на 1,01 %) и незначительно — в Пречемско-Карадагском и Судакско-Меганомском ландшафтах (на 0,42 и 0,20 % соответственно).

В остальных типах наземного покрова наблюдается снижение площадей покрытия территории Юго-Восточного Крыма в следующих значениях: «мозаичная растительность (луга, кустарники, лес) (50–70 %) / пахотные земли (20–50 %)» — на 4,32 %, «мозаичный лес / кустарник (50–70 %) / пастбище (20–50 %)» — на 3,88 %, «мозаичные пастбища (50–70 %) / леса / кустарники (20–50 %)» — на 2,34 %, «разреженная (> 15 %) растительность (древесная растительность, кустарники, луга)» — на 1,95 %, «неорошаемые пахотные земли, богарные пашни» и «густые и редкие (> 15 %) луга» — на 1,74 %. Отмечено незначительное уменьшение площадей типов наземного покрова: «искусственные поверхности и связанные с ними территории (городские территории > 50 %)» — на 0,009 %, «оголённые участки» — на 0,017 %, «водные объекты» — на 0,060 %. В частности, в Туакском ландшафте уменьшились площади типов наземного покрова: «мозаичный лес / кустарник (50–70 %) / пастбище (20–50%)» — на 7,29 %, «мозаичные пахотные земли (50–70 %) / растительность (луга, кустарники, леса) (20–50 %)» — на 3,36 %, «неорошаемые пахотные земли, богарные пашни» — на 3,00 %, «разреженная (> 15 %) растительность (древесная растительность, кустарники, луга)» — на 2,17 %. Такие типы наземного покрова, как «густые

и редкие (> 15 %) луга», «водные объекты» и «мозаичные пастбища (50–70 %) / леса / кустарники (20–50 %)» практически не изменились в площади (снижение на 0,47; 0,03 и 0,16 % соответственно). Типы наземного покрова «искусственные поверхности и связанные с ними территории (городские территории > 50 %)» и «оголённые участки» в площади не изменились совсем.

В Пречемско-Карадагском ландшафте в порядке уменьшения площади типы наземного покрова можно расположить следующим образом: «неорошаемые пахотные земли, богарные пашни» — на 0,34 %, «густые и редкие (> 15 %) луга» — на 1,32 %, «разреженная (> 15 %) растительность (древесная растительность, кустарники, луга)» — на 1,85 %, «мозаичный лес / кустарник (50–70 %) / пастбище (20–50 %)» — на 2,50 %, «мозаичные пастбища (50–70 %) / леса / кустарники (20–50 %)» — на 3,37 %, «мозаичная растительность (луга, кустарники, лес) (50–70 %) / пахотные земли (20–50 %)» — на 5,67 %. Типы наземного покрова «искусственные поверхности и связанные с ними территории (городские территории > 50 %)» и «водные объекты» не изменялись.

В Судакско-Меганомском ландшафте уменьшились площади типов наземного покрова: «мозаичная растительность (луга, кустарники, лес) (50–70 %) / пахотные земли (20–50 %)» — на 5,30 %, «разреженная (> 15 %) растительность (древесная растительность, кустарники, луга)» — на 3,69 %, «мозаичный лес / кустарник (50–70 %) / пастбище (20–50 %)» и «густые и редкие (> 15 %) луга» — на 0,96 и 1,01 % соответственно. Незначительно уменьшились в площади типы наземного покрова: «водные объекты» — на 0,30 %, «мозаичные пастбища (50–70 %) / леса / кустарники (20–50 %)» — на 0,20 %, «оголённые участки» — на 0,10 %, «искусственные поверхности и связанные с ними территории (городские территории > 50 %)» — на 0,05 %.

В Демерджи-Ускутском ландшафте наблюдается следующая картина снижения площади типов наземного покрова: «мозаичная растительность (луга, кустарники, лес) (50–70 %) / пахотные земли (20–50 %)» — на 12,07 %, «неорошаемые пахотные земли, богарные пашни» — на 7,22 %, «густые и редкие (> 15 %) луга» — на 9,51 %, «мозаичные пастбища (50–70 %) / леса / кустарники (20–50 %)» — на 8,37 %, «мозаичный лес / кустарник (50–70 %) / пастбище (20–50 %)» — на 1,62 %.

В Зеленогорском ландшафте как в сторону роста, так и в сторону снижения меньше всего изменились площади следующих типов наземного покрова (названия приведены в порядке уменьшения площади): «разреженная (> 15 %) растительность (древесная растительность, кустарники, луга)» — на 0,20 %, «густой (> 40 %) широколиственный лес (> 5 м)» — на 0,30 %, «густые и редкие (> 15 %) луга» — на 1,40 %, «мозаичный лес / кустарник (50–70 %) / пастбище (20–50 %)» — на 4,39 %, «мозаичные пастбища (50–70 %) / леса / кустарники (20–50 %)» — на 5,28 %.

В целом можно заключить, что, согласно данным о типах наземного покрова Globcover, за период с 2005 по 2009 г. на территории Юго-Восточного Крыма больше всего выросла площадь густого широколиственного леса, рост составляет 12,06 %. Больше всего сократились площади мозаичной растительности (луга, кустарники, лес), мозаичного леса и кустарников (на 4,32 и 3,88 % соответственно). Площадь городских территорий, оголённых участков и водных объектов практически не изменилась. Наибольший рост площади густого широколиственного леса наблюдается в Демерджи-Ускутстком (на 30,51 %), Туакском (на 15,96 %) и Пречемско-Карадагском (на 10,97 %) ландшафтах. Снижение площади мозаичной растительности (луга, кустарники, лес) больше всего произошло в Демерджи-Ускутском (на 12,07 %), Пречемско-Карадагском (на 5,67 %) и в Судакско-Меганомском (на 5,30 %) ландшафтах. В свою очередь, наибольшее снижение площади мозаичного леса и кустарников наблюдается в Туакском ландшафте (на 7,29 %). Больше всего в пределах Юго-Восточного Крыма претерпели изменения Демерджи-Ускутский и Туакский ландшафты за счёт роста площади густого широколиственного леса, меньше всего — Зеленогорский ландшафт.

Набор данных ESRI Land Cover использовался для анализа динамики временного изменения типов наземного покрова за пятилетний период (2017–2021 гг.). В работе также был проведён факторный анализ для выявления роста и снижения площадей типов наземного покрова в динамике с 2017 по 2021 г. в пределах Юго-Восточного Крыма и отдельно в пределах ландшафтных контуров. Входными данными для анализа послужило количество пикселей в растровых слоях типов наземного покрова в 2017 и 2021 гг. По результатам факторного анализа были построены графики, отражающие доли роста и снижения площадей типов наземного покрова на территории (рисунок 8).

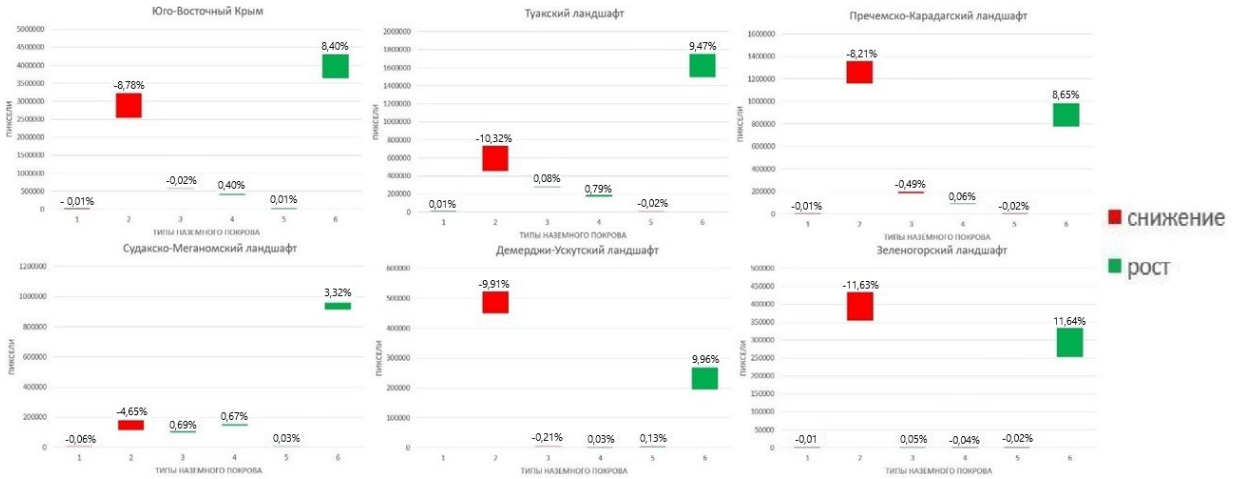

Рис. 8. Рост и снижение площадей типов наземного покрова, согласно набору данных ESRI Land Cover, в динамике (2017–2021 гг.) на территории Юго-Восточного Крыма

На рисунке 8 видно, что, согласно данных ESRI Land Cover, в Юго-Восточном Крыму явно изменяются только 2 типа наземного покрова: «деревья» — в сторону снижения площади, «смесь небольших скоплений растений или одиночных растений, рассеянных по территории, в виде трав и кустарников» — в сторону увеличения площади. Таким образом, мы можем заключить, что за рассматриваемый период площадь, занимаемая смесью небольших скоплений растений или одиночных растений, рассеянных по территории, в виде трав и кустарников, выросла в Юго-Восточном Крыму на 8,40 %. В Зеленогорском ландшафте таких территорий стало больше на 11,64 %, в Демерджи-Ускутском ландшафте — на 9,96 %, а в Туакском, Пречемско-Карадагском и Судакско-Меганомском ландшафтах — на 9,47; 8,65 и 3,32 % соответственно.

Площадь покрытия деревьями в Юго-Восточном Крыму снизилась на 8,78 %. В частности, в Зеленогорском ландшафте — на 11,63 %, в Туакском ландшафте — на 10,32 %, в Демерджи-Ускутском ландшафте — на 9,91 %, в Пречемско-Карадагском ландшафте — на 8,21 %, в Судакско-Меганомском ландшафте — на 4,64 %.

Остальные типы наземного покрова изменились в сторону роста или снижения площади незначительно или совсем не изменились.

Согласно данным ESRI Land Cover, в рассматриваемый период сильнее всего изменился Зеленогорский ландшафт, а меньше всего — Судакско-Меганомский ландшафт.

Copernicus Global Land Cover. В рамках работы также был проведён факторный анализ для выявления роста и снижения площадей типов наземного покрова в динамике с 2015 по 2019 г. в пределах Юго-Восточного Крыма и отдельно в пределах ландшафтных контуров. Входными данными для анализа послужило количество пикселей в растровых слоях типов наземного покрова 2015 и 2019 гг. Факторный анализ показал, что в динамике типов наземного покрова базы данных Copernicus Global Land Cover роста и снижения площадей практические не происходит.

Чтобы визуализировать динамику изменений площадей типов наземного покрова, мы построили графики процентного соотношения типов наземного покрова базы данных Copernicus Global Land Cover на территории Юго-Восточного Крыма за 2015–2019 гг. За рассматриваемый временной отрезок, согласно набору данных Copernicus Global Land Cover, на территории Юго-Восточного Крыма не выявлены какие-либо изменения в типах наземного покрова как в отдельности по ландшафтным контурам, так и на рассматриваемой территории в целом.

Набор данных Land Cover CCI. В работе сравнивались изменения в площадях типов наземного покрова на изучаемой территории за период 1992–2020 гг. В качестве значений использовались площади типов наземного покрова, изменяющиеся из года в год: две сравниваемые между собой выборки — это площади типов наземного покрова за годы, следующие подряд.

С использованием базы данных типов наземного покрова Land Cover CCI тоже был проведён факторный анализ для выявления роста и снижения площадей типов наземного покрова в динамике с 1992 по 2020 г. в пределах Юго-Восточного Крыма и отдельно в пределах ландшафтных контуров. Входными данными для анализа послужило количество пикселей в растровых слоях типов наземного покрова 1992 и 2020 гг. На рисунке 9 представлены графики по результатам факторного анализа набора данных Land Cover CCI.

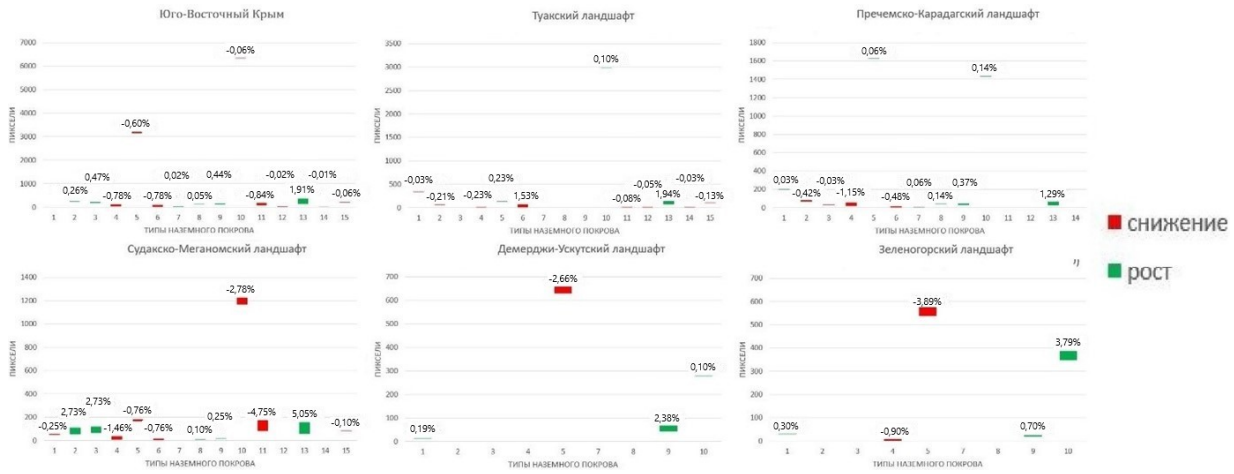

Рис. 9. Рост и снижение площадей типов наземного покрова, согласно набору данных Land Cover CCI, в динамике (1992–2020 гг.) на территории Юго-Восточного Крыма

На рисунке 9 видно, что в целом в пределах Юго-Восточного Крыма нет явных изменений в площадях типов наземного покрова, кроме роста типа наземного покрова «селитебные территории» (на 1,91 %). Более различимые изменения выявляются при переходе к каждому ландшафтному контуру отдельно.

В Туакском ландшафте наибольший рост показывает тип наземного покрова «селитебные территории» (на 1,94 %), а наибольшее снижение площади — «древесный покров, хвойный, вечнозелёный, густой или редкий (> 15 %)» (на 1,53 %). Изменения площадей остальных типов наземного покрова незначительны, а в типах наземного покрова: «древесный покров, смешанный тип листьев (широколиственный и хвойный)», «мозаичные деревья и кустарники (> 50 %) / травянистый покров (< 50 %)», «мозаичный травянистый покров (> 50 %) / деревья и кустарники (< 50 %)» — изменений совсем нет.

В Пречемско-Карадагском ландшафте также наибольший рост площади приходится на тип наземного покрова «селитебные территории» и составляет 1,29 %, а наибольшее снижение — на тип «мозаичная естественная растительность (деревья, кустарники, травянистый покров) (> 50 %) / пахотные земли (< 50 %)», который изменился на 1,15 %. Остальные типы наземного

покрова: «редкая растительность (деревья, кустарники, травянистый покров) (< 15 %)», «кустарниковый или травянистый покров, затопленный, пресная/соленая вода» и «голые участки» — незначительно меняются в площади или остаются без изменений.

В Судакско-Меганомском ландшафте происходит больше всего изменений по сравнению со всеми ландшафтами Юго-Восточного Крыма. Здесь наблюдается рост площадей типов наземного покрова «селитебные территории» (на 5,05 %), «травянистый покров» и «мозаичные пахотные земли (> 50 %) / естественная растительность (деревья, кустарники, травянистый покров) (< 50 %)» (на 2,73 % оба типа), а снижение — у типов «редкая растительность (деревья, кустарники, травянистый покров) (< 15 %)» (на 4,75 %), «луга» (на 2,78 %) и «мозаичная естественная растительность (деревья, кустарники, травянистый покров) (> 50 %) / пахотные земли (< 50 %)» (на 1,46 %). Другие типы наземного покрова изменяются в сторону роста или снижения незначительно или совсем не изменяются («древесный покров, смешанный тип листьев (широколиственный и хвойный)», «кустарниковый или травянистый покров, затопленный, пресная/солёная вода», «голые участки»).

В Демерджи-Ускутском ландшафте площадь типа наземного покрова «мозаичный травянистый покров (> 50 %) / деревья и кустарники (< 50 %)» изменяется в сторону роста на 2,38 %, а площадь типа «древесный покров, широколиственный, лиственный, густой или редкий (> 15 %)» — в сторону снижения на 2,66 %. Незначительно изменяются типы наземного покрова «пахотные земли» и «луга»: их площади растут на 0,19 и 0,10 % соответственно. Площади остальных типов наземного покрова, встречающихся в этом ландшафте, не меняются («травянистый покров», «мозаичные пахотные земли (> 50 %) / естественная растительность (деревья, кустарники, травянистый покров) (< 50 %)», «мозаичная естественная растительность (деревья, кустарники, травянистый покров) (> 50 %) / пахотные земли (< 50 %)», «древесный покров, смешанный тип листьев (широколиственный и хвойный)», «мозаичные деревья и кустарники (> 50 %) / травянистый покров (< 50 %)»).

В пределах Зеленогорского ландшафта в сторону роста площадей изменяются следующие типы наземного покрова: «луга» — на 3,79 %, «мозаичный травянистый покров (> 50 %) / деревья и кустарники (< 50 %)» — на 0,70 % и незначительно «пахотные земли» — на 0,30 %. В сторону снижения площадей изменяются типы наземного покрова: «древесный покров, широколиственный, лиственный, густой или редкий (> 15 %)» — на 3,89 % и «мозаичная естественная растительность (деревья, кустарники, травянистый покров) (> 50 %) / пахотные земли (< 50 %)» — на 0,90 %. Остальные типы наземного покрова, встречающиеся в ландшафте, не изменяются («травянистый покров», «мозаичные пахотные земли (> 50 %) / естественная растительность (деревья, кустарники, травянистый покров) (< 50 %)», «древесный покров, смешанный тип листьев (широколиственный и хвойный)», «мозаичные деревья и кустарники (> 50 %) / травянистый покров (< 50 %)»).

Набор данных Land Cover CCI в динамике (1992–2020 гг.) показал наибольшее увеличение селитебных территорий в Юго-Восточном Крыму (на 1,91 %), в основном за счёт увеличения их площади в Судакско-Меганомском на (5,05 %), Туакском (на 1,94 %) и Пречемско-Карадагском (на 1,29 %) ландшафтах. Наибольшее снижение площади определяется на территориях с редкой растительностью (деревья, кустарники, травянистый покров) (< 15 %) (на 4,75 %) и лугами (на 2,78 %) в Судакско-Меганомском ландшафте, а также на территориях с древесным покровом, широколиственным, лиственным, густым или редким (> 15 %) в Демерджи-Ускутском и Зеленогорском ландшафтах (на 2,66 и 3,89 % соответственно). В большей степени изменился Судакско-Меганомский ландшафт, и, напротив, наименьшие изменения коснулись Пречемско-Карадагского ландшафта.

На основе унифицированных до единой классификации данных о типах наземного покрова рассматриваемых баз спутниковых данных был проведён дисперсионный анализ (таблица 3) для сравнения баз данных между собой.

Сравнивались первые и последние доступные в базах данных годы (так как базы данных представляют разное временное покрытие, нет общего года для их сравнения).

Таблица 3

Дисперсионный анализ для первого и последнего доступного года в рассматриваемых базах данных

Ландшафт	Первый год в базе данных			Последний год в базе данных		
	критерий					
	P	F	F критическое	P	F	F критическое
Туакский	0,029	3,24	2,77	0,032	3,15	2,77
Пречемско-Карадагский	0,000001	19,45	2,77	0,000003	16,57	2,77
Судакско-Меганомский	$4*10^{-12}$	91,12	2,77	$7*10^{-10}$	49,4	2,77
Демерджи-Ускутский	0,000078	13,36	3,06	$2*10^{-7}$	34,1	3,06
Зеленогорский	$5*10^{-8}$	28,9	2,77	0,00036	8,17	2,77
Юго-Восточный Крым	0,00012	9,81	2,77	0,0092	4,33	2,77

Примечания: P — значение вероятности; F — критерий Фишера; F критическое — табличное значение критерия Фишера.

Так как P (значение вероятности того, что рассматриваемые базы данных в части данных, отображающих наземный покров территории Юго-Восточного Крыма и отдельных его ландшафтов, между собой сопоставимы и могут сравниваться в различных исследованиях) менее 1, критерий Фишера (F) можно считать значимым. При сравнении значения критерия Фишера (F) и табличного значения (F критическое) видно, что все рассчитанные критерии больше табличного значения. Это может говорить о том, что значения в сравниваемых базах данных отличаются от уровня вероятности P. Поскольку уровень вероятности P крайне мал, различия в базах данных носят случайный характер, следовательно, унифицированные базы данных вполне сопоставимы друг с другом и могут быть сравнимы при анализе динамики типов наземного покрова в разных исследованиях.

Выводы

Основные результаты отражают особенности распространения и изменения типов наземного покрова на территории Юго-Восточного Крыма.

Набор данных Globcover показал, что больше всего увеличилась площадь густого широколиственного леса, рост составил 12,06 %. Сильнее всего снизились площади мозаичной растительности (луга, кустарники, лес), мозаичного леса и кустарников (на 4,32 и 3,88 % соответственно). Площадь городских территорий, оголённых участков и водных объектов практически не изменилась.

По результатам факторного анализа площадей типов наземного покрова базы данных ESRI Land Cover отмечено, что площадь, занимаемая смесью небольших скоплений растений или одиночных растений, рассеянных по территории, в виде трав и кустарников, выросла в Юго-Восточном Крыму на 8,40 %. Площадь покрытия деревьями снизились на 8,78 %. Остальные типы наземного покрова изменились в сторону роста или снижения площади незначительно или совсем не изменились.

В результате факторного анализа временных данных площадей наземного покрова базы данных Copernicus Global Land Cover за представленный временной отрезок 2015–2019 гг. не выявлены существенные изменения в типах наземного покрова на исследуемой территории.

Факторный анализ базы данных Land Cover CCI показал в динамике (1992–2020 гг.) наибольшее (на 1,91 %) увеличение селитебных территорий в Юго-Восточном Крыму. Остальные типы наземного покрова имеют более значимые изменения при их факторном анализе в пределах ландшафтных контуров (если рассматривать данные крупномасштабно).

Каждая база данных имеет свои недостатки и преимущества. База данных Globcover [GlobCover] имеет ограничения во временном диапазоне (2005–2006 и 2009 гг.). В базе данных Land Cover CCI [Download CCI …], как и в Globcover [GlobCover], пространственное разрешение не позволяет увидеть мелкие элементы земельного покрова, которые важны для изучения более локальных процессов в ландшафтах, поэтому увидеть какие-либо изменения в типах наземного покрова можно только на региональном или глобальном уровнях. При этом Land Cover CCI имеет временное покрытие в несколько десятков лет.

Напротив, ESRI Land Cover [ESRI Land Cover] позволяет выявить локальные изменения в типах наземного покрова в силу своего разрешения космических снимков (10 м), но временной диапазон охватывает лишь 5 лет, за которые можно не выявить больших изменений в типах наземного покрова, если не было резких, аномальных изменений в погоде за этот период и большой антропогенной нагрузки на территорию (например, пожары, крупная застройка территории).

Copernicus Global Land Cover [Copernicus Global …] является усреднённым вариантом и по пространственному разрешению продуктов дистанционного зондирования, и по временному периоду, однако эта база данных не показала никакой изменчивости типов наземного покрова в течение рассматриваемого времени.

Дисперсионный анализ рассматриваемых баз данных показал, что унифицированные базы данных вполне сопоставимы друг с другом и могут быть сравнимы при анализе динамики типов наземного покрова в разных исследованиях. Однако надо иметь в виду, что тематические продукты, основанные на данных дистанционного зондирования, такие как тематические слои типов наземного покрова, в силу своей специфики (пространственное разрешение и временная периодичность данных) являются хорошим инструментом для использования их в целях экологического мониторинга изучаемой территории. Но каждая база спутниковых данных имеет свои ограничения, связанные с пространственным разрешением снимков, временным покрытием, классификацией типов наземного покрова, методами интерпретации спутниковых данных и датчиками для их приёма. Всё это имеет значение для картирования типов наземного покрова территории.

Оценка площади типов наземного покрова позволит выявить тенденции их динамики на конкретной территории, что, в свою очередь, позволит рационально использовать ресурсы территории лицам, ответственным за её устойчивое развитие. В конечном счёте карты типов наземного покрова можно использовать при решении вопросов для достижения целей устойчивого развития.

По результатам работы можно констатировать, что нет универсального продукта дистанционного зондирования, отражающего типы наземного покрова: каждая из рассматриваемых баз данных имеет свои преимущества и недостатки. Необходимо применять такие тематические карты исходя из отдельных задач исследования и критически относиться к тем или иным результатам.

Список литературы

1. *Багрова Л. А.* Особенности природы и освоения естественных рекреационных ресурсов Юго-восточного горного Крыма : дис. … канд. геогр. наук : 11.00.01. – Симферополь, 1974. – 206 с.
2. *Горбунова Т. Ю., Гапон С. В., Горбунов Р. В.* Картографирование типов наземных покровов субсредиземногорских низкогорных ландшафтов средствами геоматики (на примере Юго-Восточного Крыма) // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2017. – Т. 25, № 1. – С. 104–115. – https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-1-104-115
3. *Кочкин М. А.* Леса Крыма. – Симферополь : Крымиздат, 1952. – 102 с.
4. Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий / науч. ред. Е. А. Позаченюк. – Симферополь : Бизнес-Информ, 2009. – 668 с.
5. *Табунщик В. А., Горбунов Р. В.* Динамика типов наземного покрова (land cover) в пределах бассейнов рек северо-западного склона Крымских гор // Геология, география и глобальная энергия. – 2022. – № 3. – С. 78–88. – https://doi.org/10.54398/20776322_2022_3_78
6. Copernicus Global Land Cover Layers : CGLS-LC100 Collection 3. – URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_Landcover_100m_Proba-V-C3_Global (accessed: 20.09.2022).
7. Download CCI LC products // ESA. Climate Change Initiatiue / Europ. Space Agency. – URL: https://www.esa-landcover-cci.org/?q=node/164 (accessed: 20.11.2022).
8. GlobCover // DUE. Date user element / Europ. Space Agency. – URL: http://due.ESRIn.esa.int/page_globcover.php (accessed: 03.10.2022).
9. ESRI Land Cover // ESRI / Environmental Systems Research Inst. – URL: https://livingatlas.arcgis.com/landcover/ (accessed: 20.09.2022).
10. *Fritz S., See L., Perger C., McCallum I., Schill C., Schepaschenko D., Duerauer M., Karner M., Dresel C., Laso-Bayas J.-C., Lesiv M., Moorthy I., Salk C. F., Danylo O., Sturn T., Albrecht F., You L., Kraxner F., Obersteiner M.* A global dataset of crowdsourced land cover and land use reference data // Scientific Data. – 2017. – Vol. 4. – Art. 170075. – URL: https://www.nature.com/articles/sdata201775. – Publ.: 13.06.2017.
11. *Kaptue Tchuente A. T., Roujean J.-L., Faroux S.* ECOCLIMAP-II: An ecosystem classification and land surface parameters database of Western Africa at 1 km resolution for the African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA) project // Remote Sensing of Environment. – 2010. – Vol. 114, iss. 5. – P. 961–976. – https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.12.008
12. *Manakos I., Tomaszewska M., Gkinis I., Brovkina O., Filchev L., Gitas L. G. I. Z., Halabuk A., Inalpulat M., Irimescu A., Jelev G., Karantzalos K., Katagis T., Kupková L., Lavreniuk M., Mesaroš M., Mihailescu D., Nita M., Rusnak T., Stych P., Zemek F., Albrechtová J., Campbell P.* Comparison of global and continental land cover products for selected study areas in South Central and Eastern European region // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, iss. 12. – Art. 1967. – https://doi.org/10.3390/rs10121967. – Publ.: 06.12.2018.
13. *Potapov P., Hansen M. C., Pickens A., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Turubanova S., Zalles V., Li X., Khan A., Stolle F., Harris N., Song X.P., Baggett A., Kommareddy I., Kommareddy A.* The global 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the landsat archive: first results // Frontiers in Remote Sensing. – 2022. – Vol. 3. – Art. 856903. – URL: https://www.frontiersin.org/journals/remote-sensing/articles/10.3389/frsen.2022.856903/full. – Publ.: 13.04.2022.

14. *Saah D., Tenneson K., Matin M., Uddin K., Cutter P., Poortinga A., Nguyen Q. H., Patterson M., Johnson G., Markert K., Flores A., Anderson E., Weigel A., Ellenberg W. L., Bhargava R., Aekakkararungroj A., Bhandari B., Khanal N., Housman I. W., Potapov P., Tyukavina A., Maus P., Ganz D., Clinton N., Chishtie F.* Land cover mapping in data scarce environments: challenges and opportunities // Frontiers in Environmental Science. – 2019. – Vol. 7. – Art. 150. – URL: https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2019.00150/full. – Publ.: 05.11.2019.
15. *Singh S. K., Mustak S. K., Srivastava P. K., Szabó S., Islam T.* Predicting spatial and decadal LULC changes through cellular automata Markov chain models using Earth observation datasets and geo-information // Environmental Processes. – 2015. – Vol. 2, iss. 1. – P. 61–78. – https://doi.org/10.1007/s40710-015-0062-x
16. *Singh S., Singh C., Mukherjee S.* Impact of land-use and land-cover change on groundwater quality in the Lower Shiwalik hills: A remote sensing and GIS based approach // Open Geosciences. – 2010. – Vol. 2, iss. 2. – P. 124-131. – URL: https://www.degruyter.com/document/doi/10.2478/v10085-010-0003-x/html. – Publ.: 01.06.2010.
17. *Twisa S., Mwabumba M., Kurian M., Buchroithner M. F.* Impact of land-use/land-cover change on drinking water ecosystem services in Wami River basin, Tanzania // Resources. – 2020. – Vol. 9, iss. 4. – Art. 37. – https://doi.org/10.3390/resources9040037. – Publ.: 02.04.2020.
18. *Yang J., Huang X.* The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 // Earth System Science Data. – 2021. – Vol. 13, iss. 8. – P. 3907–3925. – https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021
19. *Venter Z. S., Barton D. N., Chakraborty T., Simensen T., Singh G.* Global 10 m land use land cover datasets: A comparison of dynamic world, world cover and ESRI land cover // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, iss. 16. – Art. 4101. – URL: https://www.mdpi.com/2072-4292/14/16. – Publ.: 21.08.2022.
20. *Wang J., Wei H., Cheng K., Ochir A., Shao Ya., Yao J., Wu Yu., Han X., Davaasuren D., Chonokhuu S., Zhou Ye., Zhang M., Cao X., Gao M., Zhu J., Li Yi., Li Q., Liang X., Li K.* Updatable dataset revealing decade changes in land cover types in Mongolia // Geoscience Data Journal. – 2022. – Vol. 9, iss. 2. – P. 341–354. – https://doi.org/10.1002/gdj3.149

SPATIAL AND TEMPORAL DYNAMICS OF LAND COVER TYPES FROM DIFFERENT SATELLITE DATABASES ON THE EXAMPLE OF SOUTH-EASTERN CRIMEA

Drygval A. V.[1,2,3], Drygval P. V.[1,2,4], Tabunschik V. A.[3], Gorbunova T. Yu.[3]

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

[2] *RUDN University, Moscow, Russian Federation,*

[3] *A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,*

[4] *FSE RTC RCSH, Moscow, Russian Federation,*

e-mail: drygval95@mail.ru

Abstract: This paper analyzes changes in the areas of land cover types of the South-Eastern Crimea (on the territory as a whole and separately by landscape contours) in dynamics. Thematic maps of land cover types were taken from open spatial databases: Globcover, ESRI Land Cover, Copernicus Global Land Cover, Land Cover CCI; advantages and disadvantages of their use are considered. It is shown that Land Cover CCI and Globcover having the lowest spatial resolution of all databases do not allow to see small elements of land cover, which are important for more local processes in landscapes, although Land Cover CCI has a wide temporal coverage of the territory (1992–2020). ESRI Land Cover is suitable for such a task because of its spatial resolution.

The Copernicus Global Land Cover database did not show any dynamics of land cover types. Factor analysis was conducted to identify changes in land cover types in South-Eastern Crimea in the direction of increasing or decreasing areas in the considered databases. In order to compare satellite databases among themselves, a variance analysis of the data on land cover types unified to a single classification was carried out.
Keywords: land cover types, satellite databases, South-Eastern Crimea, landscapes, factor analysis, analysis of variance

Сведения об авторах

Дрыгваль Анна Валерьевна — младший научный сотрудник лаборатории мониторинга климатически активных веществ Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН – филиала ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»; младший научный сотрудник лаборатории по разработке методологии геоэкологической оценки бассейнов горных рек ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация; ассистент департамента рационального природопользования Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы, drygval95@mail.ru

Дрыгваль Полина Валерьевна — старший преподаватель департамента рационального природопользования Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы; младший научный сотрудник лаборатории химической безопасности НТЦ радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России; младший научный сотрудник лаборатории мониторинга климатически активных веществ Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН – филиала ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», ул. Науки, 24, Феодосия, пгт Курортное, 298188, Российская Федерация, any-poly@mail.ru

Табунщик Владимир Александрович — научный сотрудник лаборатории ландшафтной экологии и геоматики, лаборатории по разработке методологии геоэкологической оценки бассейнов горных рек ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, tabunshchyk@ibss-ras.ru

Горбунова Татьяна Юрьевна — кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории ландшафтной экологии и геоматики, лаборатории по разработке методологии геоэкологической оценки бассейнов горных рек ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, gorbunovatyu@gmail.com

Поступила в редакцию 19.10.2024 г.
Принята к публикации 25.11.2024 г.

ПРОБЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ И МОРСКАЯ РАДИОХЕМОЭКОЛОГИЯ

УДК [594-147.124:546](262.5)

DOI: 10.21072/eco.2024.09.3.05

ТЯЖЁЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В РАКОВИНАХ МОЛЛЮСКОВ ЧЁРНОГО МОРЯ *

Дикарева Ю. Д., Капранова Л. Л., Капранов С. В., Рябушко В. И., Щуров С. В.

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

г. Севастополь, Российская Федерация,

e-mail: dikareva.julija@rambler.ru

Аннотация: Двустворчатые моллюски — мидия *Mytilus galloprovincialis* и гигантская устрица *Magallana* (=*Crassostrea*) *gigas* являются важными объектами марикультуры. К другим ценным промысловым моллюскам можно отнести анадару *Anadara kagoshimensis* и морского гребешка *Flexopecten glaber ponticus*, а также гастроподу *Rapana venosa*. В связи с разработкой пищевых добавок и экстрактов из раковин моллюсков необходимы сведения об их пищевой безопасности, в частности о содержании тяжёлых металлов (ТМ). В настоящее время данные о концентрации токсичных металлов в раковинах моллюсков, выращиваемых в морских хозяйствах Чёрного моря, отсутствуют. В данной работе с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой измерены концентрации Cd, Cu, As, Hg, Pb и Zn в раковинах пяти видов моллюсков, собранных в морском хозяйстве г. Севастополя (Чёрное море). В раковинах в наибольшей степени накапливаются Cu и Zn. Подтверждено специфическое концентрирование Cd гребешком, Cu и Zn — устрицей. Створки гребешка характеризуются высоким коэффициентом накопления Pb. Самые высокие концентрации Cu, Hg и As обнаружены в раковинах рапаны. Концентрация ТМ в раковинах анадары самая низкая, что делает продукты переработки её раковин (экстракты, порошки) безопасными для использования, в том числе в пищевой промышленности. Полученные результаты подчёркивают необходимость разработки стратегий утилизации створок моллюсков, соответствующих концепции «ноль отходов», чтобы минимизировать экологические риски и расширить возможности вторичного использования биомассы раковин.

Ключевые слова: кадмий, медь, мышьяк, ртуть, свинец, цинк, моллюски, раковины, аквакультура, Чёрное море

Введение

Аквакультура морских моллюсков — индустрия, обладающая большим потенциалом для производства пищевых и технических продуктов [Morris, Backeljau, Chapelle, 2019]. Двустворчатые моллюски — мидия *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 и устрица *Magallana* (=*Crassostrea*) *gigas* (Thunberg, 1793) являются важными объектами промысла в Чёрном море. Имеются и другие виды съедобных моллюсков, которые могут быть объектами аквакультуры: морской гребешок *Flexopecten glaber ponticus* (Bucquoy, Dautzenberg & Dollfus, 1889), анадара *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) и брюхоногий моллюск *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846).

Современные технологии переработки моллюсков предусматривают извлечение мягких тканей, а раковины, масса которых составляют до 60–80 % общей массы моллюсков, направляют в отходы, в то время как рациональное природопользование подразумевает максимальное

*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» (№ госрегистрации 124022400152-1).

использование при переработке добытого или выращенного сырья [Проскура, Паевская, Капустина, 2013]. В раковинах моллюсков концентрация ТМ может быть выше, чем в тканях [Демина и др., 2010; Брень, Домашлинец, 1998], поэтому скопление непереработанных раковин способно создавать определённые экологические проблемы, например загрязнение акватории ТМ. В природных условиях раковины моллюсков разрушаются за период от 10 до 20 лет, а в подкисленной воде ТМ могут непрерывно поступать в окружающую среду [Powell, Kraeuter, Ashton-Alcox, 2006]. Снижение pH воды увеличивает скорость разложения створок [Powell, Kraeuter, Ashton-Alcox, 2006], что негативно влияет на метаболическую регуляцию и способность образовывать карбонат кальция у морских организмов [Hoegh-Guldberg et al., 2018]. Высокие концентрации ТМ в моллюсках могут вызывать нарушение их роста, развития и репродуктивной функции, что приводит к снижению численности этих гидробионтов [Stankovic et al., 2012; Azizi et al., 2018; Stewart et al., 2021].

Аккумуляция ТМ в раковинах моллюсков при биоминерализации происходит как активно, в ходе метаболизма, т. е. за счёт их поглощения внутрь органоминеральной матрицы раковин [Schöne, 2008; Foster et al., 2008], так и пассивно, когда ТМ адсорбируются на внешних поверхностях раковин [Демина, Галкин, Дара, 2012; Васильев, 2003]. Даже близкородственные виды из одного биотопа могут проявлять разные стратегии накопления. Такие факторы, как питание, возраст моллюсков и их размер, определяют накопление элементов в раковинах [Rainbow et al., 2000; Piwoni-Piórewicz et al., 2021]. Раковины моллюсков являются лучшим показателем временных и пространственных изменений и параметров окружающей среды по сравнению с мягкими тканями [Yap, Ismail, Tan, 2003; Pourang et al., 2014].

Во многих странах содержание ТМ нормируется лишь для мягких тканей съедобных моллюсков [ТР ТС 021/2011; Commission Regulation ... , 2001; Resolução – RDC № 42; Food Regulations, 1985; Heavy metals regulations, 2003; National shellfish … , 2009; СанПиН 42-123-4089-86], хотя уже подтверждено использование раковин в качестве добавки к пище [Ekin, Şeşen, 2018; Патент 2816316]. Экстракты из раковин моллюсков обладают противовоспалительным, противомикробным, противораковым и иммуномодулирующим свойствами [Harris, Markl, 1999; Ahmad et al., 2018; Summer et al., 2020]. Порошок из раковин моллюсков добавляют в рацион домашнего скота и птицы, тем самым улучшая их здоровье и продуктивность [Tahamtani, Kittelsen, Vasdal, 2022]. Измельчённые створки используют для улучшения свойств почвы [Islam, Nishibori, 2021]. Однако объём отходов раковин велик, и на фоне глобального потепления и подкисления Мирового океана проблема их утилизации становится особенно актуальной [Figuerola et al., 2021].

В настоящее время отсутствуют сведения о концентрации токсичных ТМ в раковинах моллюсков, выращиваемых в морских хозяйствах Чёрного моря. Поэтому цель настоящей работы — определить концентрации токсичных элементов (Cd, Cu, As, Hg, Pb и Zn) и коэффициенты их накопления ($К_н$) в раковинах съедобных видов моллюсков, собранных в марихозяйстве г. Севастополя.

Материалы и методы

Район исследования. Для того, чтобы исключить влияние региональных неоднородностей распределения химических элементов в среде, моллюсков отбирали из одного биотопа — на ферме по разведению мидий и устриц в бухте Карантинной (г. Севастополь, Чёрное море) (рис. 1).

Объекты исследований. Для исследований использовали по 10 раковин каждого вида: мидии с размером раковин (54.1 ± 2.9) мм, анадары — (30.5 ± 1.0) мм, гребешка — (38.8 ± 5.1) мм, гигантской устрицы — (90.7 ± 10.3) мм, рапаны — с высотой раковины (84.7 ± 4.8) мм.

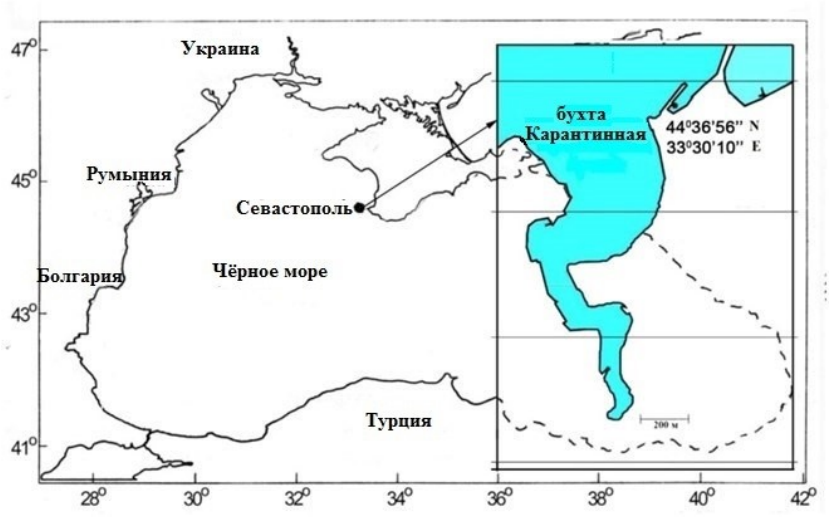

Рис. 1. Карта-схема расположения района исследования

Всех моллюсков собирали в октябре 2022 г. при температуре воды 21.4 °C и солёности 18.39 ‰. Двустворчатых моллюсков отбирали на морской ферме из садков с глубины 2–3 м. Возраст моллюсков составлял 2 года с момента оседания мидийного и устричного спата на коллектор. Гастропод собирали под коллекторами на глубине 18 м водолазным способом (температура воды 19 °C).

Подготовка проб. В лабораторию моллюсков доставляли в вёдрах с чистой морской водой, отобранной в месте обитания. После механической очистки раковин от обрастаний моллюсков ещё раз промывали в морской воде. С помощью скальпеля вскрывали створки двустворчатых моллюсков. Мягкие ткани рапаны также осторожно отделяли от раковины с помощью пластикового шпателя. Раковины высушивали при 105 °C. В каждой выборке, состоящей из 10 особей одного вида, определение ТМ производили индивидуально для каждого животного.

Количественный анализ. Количественный элементный анализ проводили в ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Plasma Quant MS Elite (Analytik Jena, Германия). Метрологические характеристики средства измерений указаны в описании типа 63680-16. Измерения проводили, как описано в работе С. В. Капранова с соавторами [Kapranov et al., 2021], а также руководствуясь [ГОСТ Р 56219-2014]. По 20 мг измельчённых в керамической ступке раковин переносили в пробирки, изготовленные из ПТФЭ. В каждую пробу добавляли 4 мл азотной кислоты (ХЧ, 63–65 %), предварительно очищенной в системе кислотной очистки DST-1000 (США). Выбор массы навески и объёма кислоты был подобран таким образом, чтобы избежать влияния ионов Ca и вспенивания материала створок при контакте с азотной кислотой. Закрытые пробирки оставляли на ночь, а затем выдерживали в автоклаве при температуре 120 °C и давлении 2 бар в течение 1.5 ч. После автоклавирования отбирали 1 мл содержимого пробирок и доводили до 10 мл деионизированной водой с удельным сопротивлением 18.2 Мом·см, полученной в деионизаторе «Д-301» (Россия). Из полученного раствора снова отбирали 1 мл и доводили до 10 мл деионизированной водой. Коэффициент разбавления — 1000 мл·г$^{-1}$ (в пересчёте на сухую массу).

Поток аргона в плазме составлял 9 л·мин$^{-1}$, глубина отбора пробы — 7 мм, ВЧ-мощность радиочастотного излучения — 1.25 кВт. Время пребывания для каждого элемента составляло 50 мс. Сканирования записывали в режиме скачкообразного изменения пиков. Дополнительное использование интерфейса реакции столкновения (CRI) в ИСП-МС-анализе позволило исключить многоатомные помехи и повысить линейность калибровочных кривых за счёт силы сигнала (чувствительности). В качестве скиммерного газа в CRI использовался газообразный водород (расход 40 мл·мин$^{-1}$).

Калибровочные кривые строили с помощью многоэлементного стандарта IV-ICPMS-71A-C для ИСП-спектроскопии (Inorganic Ventures, США, элементы: Ag, Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ho, K, La, Lu, Mg, Mn, Na, Nd, Ni, P, Pb, Pr, Rb, S, Se, Sm, Sr, Th, Tl, Tm, U, V, Yb, Zn, 10 мкг·мл$^{-1}$), а также для Hg (II) по [ГСО 7879-2001] (1 г·дм$^{-3}$). Стандарты разбавляли деионизированной водой таким образом, чтобы полученные концентрации попадали в калибровочный график: от 10 нг·л$^{-1}$ до 20 мкг·л$^{-1}$. Предел обнаружения элементов в пробах менее 10 мкг·кг$^{-1}$. Погрешность масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой PlasmaQuant MS Elite — согласно описанию типа (номер в ГРСИ РФ 63680-16).

Статистический анализ. Результаты измерений представлены в виде среднего значения плюс-минус стандартное отклонение, рассчитанное в программе MS Excel 2007. Статистическую обработку данных проводили в программе PAST 4.14. Нормальность распределения оценивали по критерию Шапиро — Уилка, однородность дисперсии — по критерию Левина. Для определения достоверности отличий между выборками применяли: в случае нормального однородного распределения — дисперсионный анализ по Фишеру, в случае неоднородного распределения — дисперсионный анализ по Уэлчу.

Результаты и обсуждение

Концентрации ТМ в створках у всех исследованных видов достоверно различаются (табл. 1). Концентрации Cu, Zn и Pb статистически значимо различались у всех исследуемых видов.

Таблица 1

Содержание тяжёлых металлов (мг·кг$^{-1}$ сух.) в раковинах моллюсков из Чёрного моря

Элемент	*Anadara kagoshimensis*	*Flexopecten glaber ponticus*	*Magallana gigas*	*Mytilus galloprovincialis*	*Rapana venosa*
Cu	**74.98 ± 36.88***	**89.44 ± 52.42***	**170.32 ± 73.34***	**77.10 ± 20.96***	**189.71 ± 76.87***
Zn	**8.85 ± 8.26***	**4.61 ± 3.27***	**21.09 ± 16.07***	**30.04 ± 15.36***	**6.81 ± 2.64***
As	1.58 ± 0.22^{C,M,R}	1.15 ± 0.15^{R}	2.28 ± 0.55^{A}	3.72 ± 4.54^{R}	24.13 ± 18.81^{A,F,M}
Pb	**0.77 ± 0.21***	**1.64 ± 1.48***	**1.02 ± 0.54***	**0.88 ± 0.33***	**0.74 ± 0.48***
Cd	0.19 ± 0.11*	14.12 ± 6.73*	0.88 ± 0.85*	0.58 ± 0.35^{A,C}	0.34 ± 0.32^{A}
Hg	0.01 ± 0.01*	0.03 ± 0.02^{A}	0.12 ± 0.05^{A,M}	0.03 ± 0.02^{A,C}	0.19 ± 0.10^{A}

Примечания: * — достоверные различия между всеми моллюсками; *A* — различия с анадарой; *F* — различия с гребешком; *C* — различия с устрицей; *M* — различия с мидией; *R* — различия с рапаной; (n = 10).

Поскольку концентрации ТМ в створках не нормируются, содержание ТМ в створках моллюсков сравним с санитарно-гигиеническими нормами для мягких тканей (мг·кг$^{-1}$ сух. массы), действующими в РФ [ТР ТС 021/2011], учитывая, что коэффициент усушки тканей в среднем составляет 80 % (рис. 2).

В раковинах моллюсков концентрации Cu и Zn имеют самые высокие значения. Концентрации этих элементов уменьшаются в следующем ряду: для Cu — *R. venosa* > *M. gigas* > *F. glaber ponticus* > *M. galloprovincialis* > *A. kagoshimensis*; для Zn — *M. galloprovincialis* > *M. gigas* > *A. kagoshimensis* > *R. venosa* > *F. glaber ponticus*.

Установлено, что в раковинах съедобных моллюсков из Чёрного моря концентрация Cu выше, чем концентрации других ТМ. Согласно [ТР ТС 021/2011] и [СанПиН 42-123-4089-86] (для Cu — во всех моллюсках) концентрации ТМ в створках превышают ПДК ТМ для мягких тканей (в пересчёте на сухую массу).

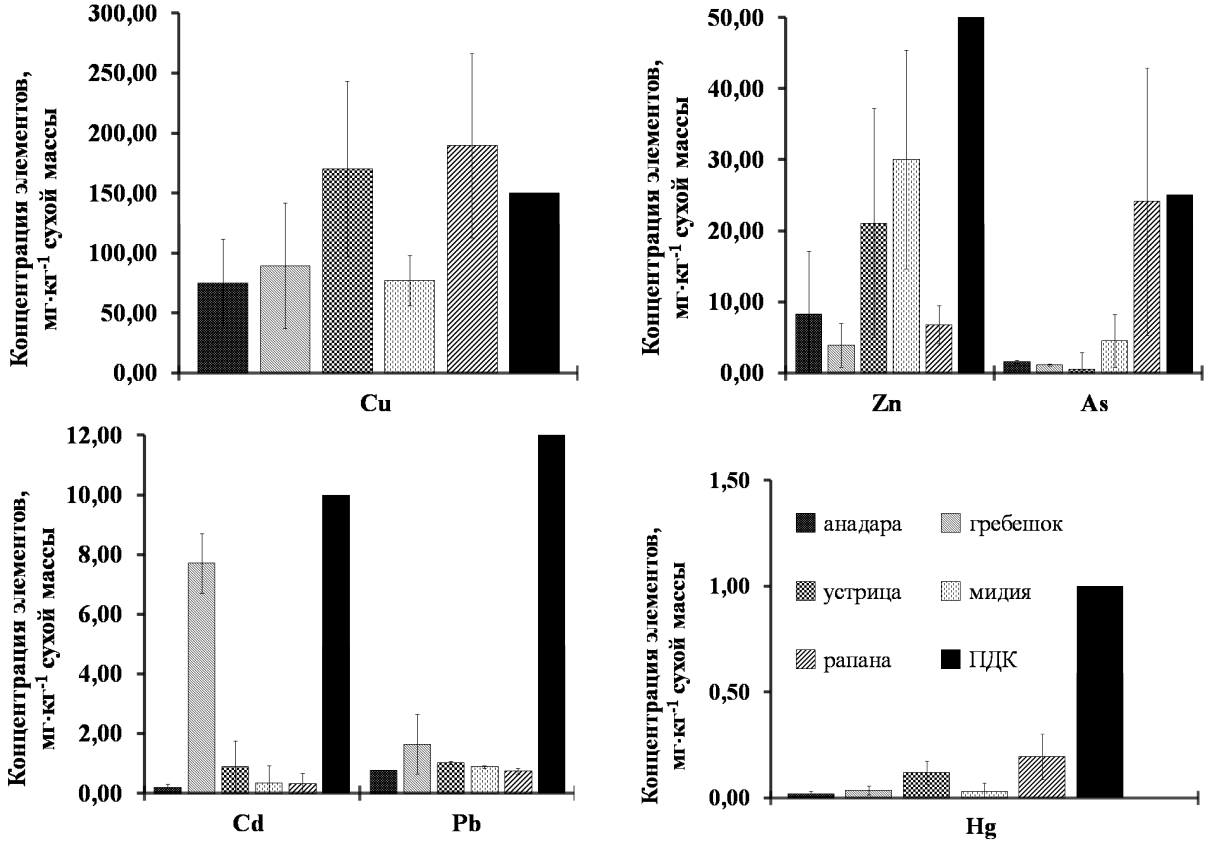

Рис. 2. Концентрация тяжёлых металлов (мг·кг$^{-1}$ сухой массы) в створках моллюсков из Чёрного моря и ПДК ТМ в пищевых продуктах [ТР ТС 021/2011]

Створки гребешка содержат более высокие концентрации кадмия (14.12 ± 6.73, мг·кг$^{-1}$) по сравнению с другими видами (табл. 1). Однако эти концентрации не превышают ПДК для пищевых продуктов (рис. 2). Также известно, что специфическим концентратором Cd являются мягкие ткани гребешка [Lukyanova, Belcheva, Chelomin, 1993].

Концентрация ТМ зависит от вида моллюска и от биотопа [Демина, Галкин, Дара, 2012]. Результаты наших исследований показывают, что концентрации ТМ в раковинах *Mytilus galloprovincialis* (табл. 1) отличаются от данных, представленных в табл. 2. Концентрация Cu, Cd и Hg в раковинах *Mytilus galloprovincialis* значительно выше ((77.10 ± 20.96), (0.58 ± 0.35) и (0.03 ± 0.02) мг·кг$^{-1}$ сух.), чем в табл. 2.

Таблица 2

Концентрация тяжёлых металлов в раковинах двустворчатых моллюсков из разных морей

Элемент	*Mytilus edulis*, Белое море [Демина, Галкин, Дара, 2012] *	*Mytilus galloprovincialis*, Чёрное море [Демина, Галкин, Дара, 2012] *
Cu	**1.24 ± 0.65**	**2.15 ± 1.52**
Zn	**3.4 ± 2.1**	**23.6 ± 11.2**
As	2.91 ± 2.05	1.75 ± 0.51
Pb	**0.021 ± 0.007**	**1.76 ± 0.04**
Cd	0.012 ± 0.006	0.024 ± 0.008
Hg	0.016 ± 0.004	0.007 ± 0.002

* Примечание: у авторов [Демина, Галкин, Дара, 2012] ошибочно указано, что *Mytilus edulis* обитает в Чёрном море, а *Mytilus galloprovincialis* — в Белом море.

Элементный состав раковин связан не только с условиями окружающей среды, но и контролируется самим организмом [Piwoni-Piórewicz et al., 2021], что обусловлено отличиями в органической матрице в процессах биоминерализации скелетного вещества у разных видов [Васильев, 2003]. Медь и кобальт в значительной степени ассимилируются биотой [Поспелова и др., 2022]. Высокие концентрации Cu, As и Hg отмечены в раковинах рапаны, что, вероятно, связано с особенностями её обитания в прибрежной зоне и питанием. *R. venosa* — хищник, питающийся в основном моллюсками-фильтраторами (мидии и устрицы) [Пиркова, Ладыгина, Щуров, 2023]. Происходит передача ТМ по трофической цепи. Тяжёлые металлы также способны адсорбироваться на внешних поверхностях раковин [Демина, Галкин, Дара, 2012]. На морском дне, среде обитания рапаны, легкодоступные формы металлов во взвешенном веществе и донных отложениях, способные переходить в раствор в процессе изменения физико-химических свойств воды (pH, окислительно-восстановительный потенциал), являются основным источником ТМ, которые адсорбируются на внешних поверхностях раковин моллюска [Чернова, Христофорова, 2008].

Следует отметить, что в настоящий момент нет единого мнения о связи элементного состава грунтов с аккумулированием ТМ в моллюсках [Макаренко, Коваль, 2014; Дудакова, Светов, 2017]. Концентрация Cu в раковинах мидий достоверно ниже, чем в створках устриц и рапаны. Однако известно, что устрица — аккумулятор меди и цинка. Обитая в условиях аквакультуры, мидии накапливают значительно более низкие концентрации меди не только в мягких тканях, но и в створках [Чернова, Христофорова, 2008].

Двустворчатые моллюски-фильтраторы извлекают Zn из морской воды [Eisler et al., 1978; Yap et al., 2008; Yap et al., 2011]. Zn выполняет защитную функцию против повреждений, вызванных Cd^{2+} и Cu^{2+}, снижая поглощение Cd и одновременно увеличивая поглощение Cu [Romeo et al., 2003]. Концентрация Zn в раковинах мидий и устриц значимо не различается (табл. 1), хотя известна способность устриц накапливать цинк в мягких тканях [Силкин и др., 2017].

Концентрации Zn, As, Cd, Hg и Pb в раковинах анадары не превышают ПДК в мягких тканях (рис. 2), что позволяет использовать экстракты из створок или измельчённые створки в качестве пищевой добавки. Для этих же целей раковины рапаны с высоким содержанием As или раковины гребешка, накапливающие Cd, можно использовать, добавляя к измельчённым створкам анадары, чтобы уменьшить долю токсичных ТМ. Многоцелевое использование раковин может способствовать дальнейшему развитию аквакультуры со значительным снижением воздействия на окружающую среду.

Биоаккумуляцию химических элементов в раковинах можно оценить с помощью коэффициента накопления ($К_н$, л·кг$^{-1}$), который характеризует концентрационную функцию организмов и рассчитывается как $К_н$ = Ci орган. / Ci вода, где Ci орган. — содержание i-го химического элемента в органе или целом организме (мг·кг$^{-1}$), а Ci вода — содержание i-го химического элемента в воде, т. е. отношение концентрации ТМ в раковинах моллюсков к средней концентрации ТМ в Чёрном море [Поликарпов, 1961; Демина, Галкин, Дара, 2012]. Средние концентрации микроэлементов в Чёрном море (мг·л$^{-1}$) составляют: Cu — 0.008, Pb — 0.006, As — 0.009, Zn — 0.002, Hg — 0.001 [Скопинцев, 1975; Митропольський, Насєдкін, Осокіна, 2006].

Устрицы и рапаны имеют самые высокие коэффициенты накопления меди (рис. 3). Тяжёлые металлы с высокими $К_н$ находятся в морской воде в наиболее биодоступной форме двухвалентных катионов [German, Von Damm, 2004], способных к изоморфному замещению ионов Ca в решётке кальцита или арагонита. В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению количества более токсичной ионной формы Cu в прибрежных водах, что связано с повышением температуры воды и её подкислением [Millero et al., 2009; Cui et al., 2024; Zitoun et al., 2019]. Раковины устриц, анадары и гребешка накапливают As в меньшей степени, чем раковины рапаны.

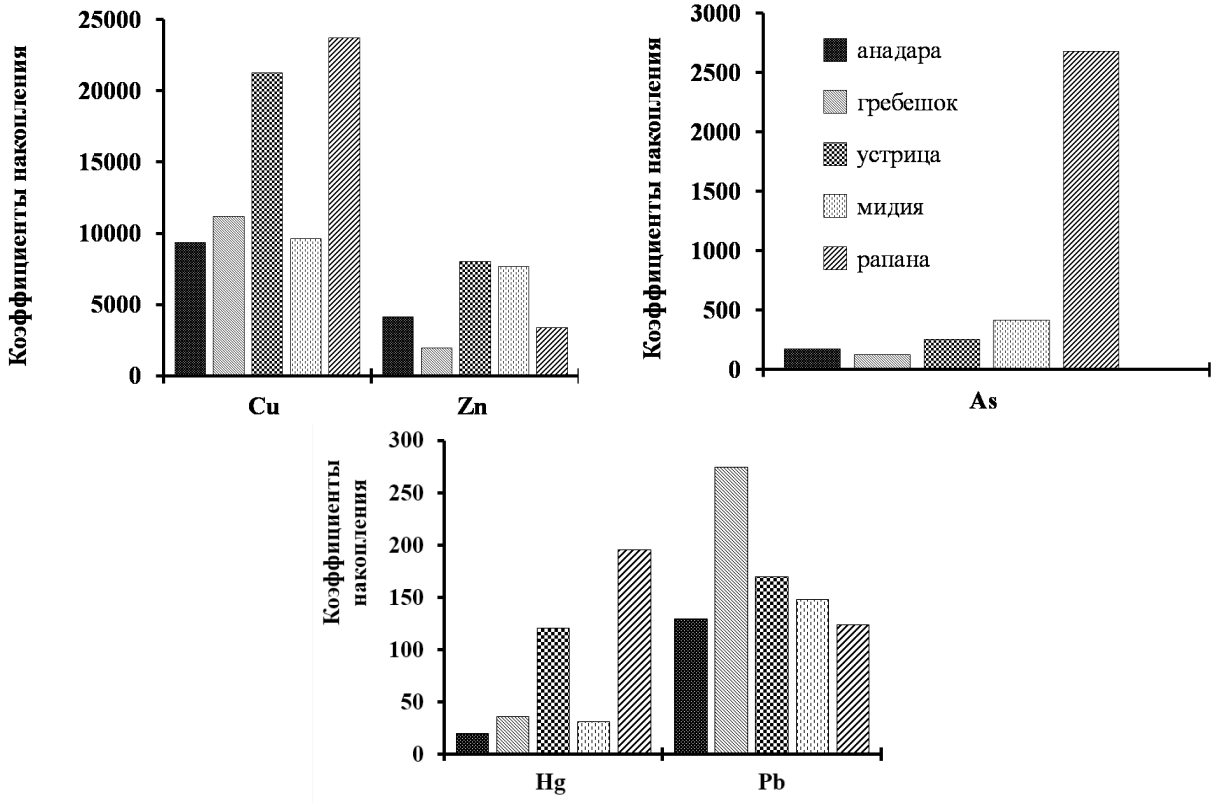

Рис. 3. Коэффициенты накопления ($К_н$) Cu, Zn, As, Hg и Pb в раковинах моллюсков

Коэффициент накопления ТМ в раковинах различается у разных видов моллюсков. У промысловых моллюсков выявлены самые высокие коэффициенты накопления Cu, Zn и As, а самые низкие — Hg и Pb. Самое высокое значение $К_н$ Pb отмечено в раковинах гребешка. Раковины анадары в наименьшей степени накапливают Cu, Zn, As. Коэффициент накопления Pb у анадары самый низкий, что делает продукты переработки её раковин наиболее безопасными для употребления в пищу [Патент 2816316].

Заключение

В данной работе изучены концентрации Cd, Cu, As, Hg, Pb и Zn в раковинах моллюсков Чёрного моря: *R. venosa*, *A. kagoshimensis*, *F. glaber ponticus*, *M. gigas* и *M. galloprovincialis*. Как и в мягких тканях, в раковинах устриц концентрация Cu и Zn выше, чем у других видов. В раковинах морских гребешков концентрация Cd выше, чем у других видов исследуемых моллюсков. В раковинах рапаны найдены более высокие концентрации As по сравнению с другими видами. Раковины анадары наиболее безопасны по содержанию наиболее токсичных элементов — As, Cd, Pb, Hg. Концентрационная функция раковин моллюсков по отношению к ТМ весьма существенная, о чём свидетельствуют высокие значения коэффициентов накопления ТМ, растворённых в воде. Сведения о концентрации химических элементов в раковинах моллюсков могут быть использованы для оценки экологических рисков, вызванных их скоплением. Поэтому, кроме утилизации раковин моллюсков, необходим поиск вариантов их промышленного применения, например получение экстрактов или композиций из измельчённых створок. Предприятиям, занимающимся аквакультурой моллюсков, следует придерживаться концепции zero waste или «ноль отходов». Вторичное использование раковин в различных сферах позволит снизить нагрузку на природную среду.

Список литературы

1. *Брень Н. В., Домашлинец В. Г.* Беспозвоночные как мониторы полиметаллического загрязнения донных отложений // Гидробиологический журнал. – 1998. – Т. 34, № 5. – С. 80–93.
2. *Васильев А. Н.* Скелетная биогеохимия моллюсков. – Харьков : Экограф, 2003. – 282 с.
3. ГОСТ Р 56219-2014. Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Кодекс : электрон. фонд правовых и норматив.-техн. док. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200115431 (дата обращения: 05.08.2024).
4. ГСО 7879-2001. Стандартный образец состава раствора ионов ртути (II) (НК-ЭК) // ОЕИ Аналитика : информ.-аналит. ресурс … «Metrology Cloud». – URL: https://oei-analitika.ru/kurilka/so_type_info.php?so_type_id=392106 (дата обращения: 05.08.2024).
5. *Демина Л. Л., Галкин С. В., Дара О. М.* Особенности накопления металлов в раковинах двустворчатых моллюсков глубоководных гидротермальных областей океана // Геохимия. – 2012. – № 2. – С. 147–163.
6. *Демина Л. Л., Гордеев В. В., Галкин С. В., Кравчишина М. Д., Алексанкина С. П.* Биогеохимия некоторых тяжёлых металлов и металлоидов на разрезе эстуарий реки Обь – Карское море // Океанология. – 2010. – Т. 50, № 5. – С. 771–784.
7. *Дудакова Д. С., Светов С. А.* Исследование микроэлементного состава раковин пресноводных моллюсков Ладожского озера с помощью LA-ICP-MS метода // Вода: химия и экология. – 2017. – № 11/12. – С. 146–153.
8. *Макаренко Т. В., Коваль Ю. В.* Тяжелые металлы в мягких тканях и раковинах пресноводных моллюсков разных классов // Актуальные проблемы сохранения биоразнообразия России и сопредельных стран : Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием, 28–30 апр. 2014 г. / Северо-Осетин. гос. ун-т им. К. Л. Хетагурова. – Владикавказ : СОГУ, 2014. – С. 129–132.
9. *Митропольський О. Ю., Наседкин [тобто Насєдкін] Є. І., Осокіна Н. П.* Екогеохімія Чорного моря. – Київ : Академперіодика, 2006. – 278 с.
10. Патент 2816316 Российская Федерация, МПК A23L 17/50 (2016.01). Способ получения пищевой минерально-протеиновой добавки, очищенной от липидных примесей, из двустворчатых моллюсков рода Anadara : № 2023104831 : заявл. 01.03.2023 : опубл. 28.03.2024, Бюл. № 10 / Капранова Л. Л., Рябушко В. И., Дикарева Ю. Д., Капранов С. В. ; патентообладатель(и) ФГБУН ФИЦ «Ин-т биологии юж. морей имени А. О. Ковалевского РАН» (ФИЦ ИнБЮМ).
11. *Пиркова А. В., Ладыгина Л. В., Щуров С. В.* Интенсивность питания самок и самцов рапаны *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) (Gastropoda, Muricidae) в Чёрном море // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2023. – № 61. – С. 134–150. – https://doi.org/10.17223/19988591/61/6
12. *Поликарпов Г. Г.* Материалы по коэффициентам накопления P^{32}, S^{35}, Sr^{90}, Y^{91}, Cs^{137}, Ce^{144} в морских организмах // Труды Севастопольской биологической станции. – Москва, 1961. – Т. 14. – С. 314–328. – URL: https://repository.marine-research.ru/items/bda4a5b1-e45e-4937-988b-f346211d8dfd (дата обращения: 05.08.2024).
13. *Поспелова Н. В., Егоров В. Н., Проскурнин В. Ю., Приймак А. С.* Взвешенное вещество как биогеохимический барьер для тяжёлых металлов в районах размещения морских ферм (Севастополь, Чёрное море) // Морской биологический журнал. – 2022. – Т. 7, № 4. – С. 55–69. – URL: https://marine-biology.ru/mbj/article/view/365/524 (дата обращения: 05.08.2024).

14. *Проскура Д. Ю., Паевская Е. В., Капустина Ю. Г.* Извлечение и переработка биологически ценного сырья из двустворчатых моллюсков // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2013. – Т. 30. – С. 152–159.
15. СанПиН 42-123-4089-86. Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах : утв. 31 марта 1986 г., № 4089-86 // Гарант. – URL: https://base.garant.ru/71169738/172a6d689833ce3e42dc0a8a7b3cddf9/ (дата обращения: 05.08.2024).
16. *Силкин Ю. А., Силкина Е. Н., Силкин М. Ю., Столбов А. Я., Силкина А. Ю.* Особенности накопления тяжелых металлов в мягких тканях средиземноморской мидии и гигантской устрицы, выращенных в прибрежной зоне Юго-Восточного Крыма // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2017. – № 4. – С. 99–109. – https://doi.org/10.35567/1999-4508-2017-4-8
17. *Скопинцев Б. А.* Формирование современного химического состава вод Черного моря. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1975. – 336 с.
18. ТР ТС 021/2011. О безопасности пищевой продукции : утв. 9 декабря 2011 г., № 880 // Кодекс : электрон. фонд правовых и норматив.-техн. док. – URL: https://docs.cntd.ru/document/902320560 (дата обращения: 05.08.2024).
19. *Чернова Е. Н., Христофорова Н. К.* Сравнительная оценка микроэлементного состава мидий Японского и Белого морей // Проблемы региональной экологии. – 2008. – № 1. – С. 64–68.
20. *Ahmad T. B., Liu L., Kotiw M., Benkendorff K.* Review of anti-inflammatory, immune-modulatory and wound healing properties of molluscs // Journal of Ethnopharmacology. – 2018. – Vol. 210. – P. 156–178. – https://doi.org/10.1016/j.jep.2017.08.008
21. *Azizi G., Akodad M., Baghour M., Layachi M., Moumen A.* The use of *Mytilus* spp. mussels as bioindicators of heavy metal pollution in the coastal environment : a review // Journal of Materials and Environmental Science. – 2018. – Vol. 9, iss. 4. – P. 1170–1181. – https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.4.129
22. Commission Regulation (EC) № 466/2001 of 8 March 2001 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs // Publication office of the Europian Union. – URL: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/52b2484d-39e0-4aa9-ba19-4b13a887bb1c (accessed: 05.08.2024).
23. *Cui L., Cheng C., Li X., Gao X., Lv X., Wang Y., Zhang H., Lei K.* Comprehensive assessment of copper's effect on marine organisms under ocean acidification and warming in the 21st century // Science of the Total Environment. – 2024. – Vol. 927. – Art. 172145. – https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172145
24. *Eisler R., Barry M. M., Lapan R. L., Telek G., Davey E. W., Soper A. E.* Metal survey of the marine clam *Pitar morrhuana* collected near a Rhode Island (USA) electroplating plant // Marine Biology. – 1978. – Vol. 45. – P. 311–317. – https://doi.org/10.1007/BF00391817
25. *Ekin İ., Şeşen R.* Molluscs: their usage as nutrition, medicine, aphrodisiac, cosmetic, jewelry, cowry, pearl, accessory and so on from the history to today // Middle East Journal of Science. – 2018. – Vol. 4, iss. 1. – P. 45–51. – https://doi.org/10.23884/mejs.2018.4.1.06
26. *Figuerola B., Hancock A. M., Bax N., Cummings V. J., Downey R., Griffiths H. J., Smith J., Stark J. S.* A review and meta-analysis of potential impacts of ocean acidification on marine calcifiers from the Southern Ocean // Frontiers in Marine Science. – 2021. – Vol. 8. – Art. 584445. – https://doi.org/10.3389/fmars.2021.584445
27. *Foster L. C., Finch A. A., Allison N., Andersson C., Clarke L. J.* Mg in aragonitic bivalve shells: Seasonal variations and mode of incorporation in *Arctica islandica* // Chemical Geology. – 2008. – Vol. 254, iss. 1/2. – P. 113–119. – https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.06.007

28. Food Regulations, 1985 : P. U. (A) 437/85 : [Malaisia] // Food and Agriculture Organization of the United Nations. – URL: https://faolex.fao.org/docs/pdf/mal27305.pdf (accessed: 05.08.2024).
29. *German C. R., Von Damm K. L.* Hydrothermal processes // Treatise on Geochemistry / eds H. D. Holland and K. K. Turekian. – Amsterdam [et al.] : Elsevier Pergamon, 2004. – Vol. 6. – P. 182–216.
30. *Harris J. R., Markl J.* Keyhole limpet hemocyanin (KLH): a biomedical review // Micron. – 1999. – Vol. 30, iss. 6. – P. 597–623. – https://doi.org/10.1016/S0968-4328(99)00036-0
31. Heavy metals regulations : Legal Notice № 66 of 2003 // Food and Agriculture Organization of the United Nations. – URL: https://faolex.fao.org/docs/pdf/eri42405.pdf (accessed: 05.08.2024).
32. *Hoegh-Guldberg O., Jacob D., Taylor M., Bindi M., Brown S., Camilloni I., Diedhiou A., Djalante R., Ebi K. L., Engelbrecht F., Zhou G., Guiot J., Hijioka Y., Mehrotra S., Payne A., Seneviratne S. I., Thomas A., Warren R.* Impacts of 1.5 ºC global warming on natural and human systems // Global Warming of 1.5 °C : an IPCC special report / Intergov. Panel on Climate Change. – Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2018. – Chap. 3 – P. 175–311. – URL: https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-3/ (accessed: 05.08.2024).
33. *Islam M. A., Nishibori M.* Use of extruded eggshell as a calcium source substituting limestone or oyster shell in the diet of laying hens // Veterinary Medicine and Science. – 2021. – Vol. 7, iss. 5. – P. 1948–1958. – https://doi.org/10.1002/vms3.544
34. *Kapranov S. V., Karavantseva N. V., Bobko N. I., Ryabushko V. I., Kapranova L. L.* Element contents in three commercially important edible mollusks harvested off the southwestern coast of Crimea (Black Sea) and assessment of human health risks from their consumption // Foods. – 2021. – Vol. 10, iss. 10. – Art. 2313. – URL: https://www.mdpi.com/2304-8158/10/10/2313. – Publ.: 29.09.2021.
35. *Lukyanova O. N., Belcheva N. N., Chelomin V. P.* Cadmium bioaccumulation in the scallop *Mizuhopecten yessoensis* from an unpolluted environment // Ecotoxicology of Metals in Invertebrates / ed. by R. Dallinger, Rainbow P. S. – Boca Raton [et al.] : Lewis publ., 1993. – P. 25–35.
36. *Millero F. J., Woosley R., DiTrolio B., Waters J.* Effect of ocean acidification on the speciation of metals in seawater // Oceanography. – 2009. – Vol. 22, no. 4. – P. 72–85. – https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.98
37. *Morris J. P., Backeljau T., Chapelle G.* Shells from aquaculture: a valuable biomaterial, not a nuisance waste product // Reviews in Aquaculture. – 2019. – Vol. 11, iss.1. – P. 42–57. – https://doi.org/https://doi.org/10.1111/raq.12225
38. National shellfish sanitation program (NSSP) : Guide for the control of molluscan shellfish : 2009 revision // U. S. Food and Drug Administration. – URL: http://wayback.archive-it.org/7993/20180126093326/https://www.fda.gov/downloads/Food/GuidanceRegulation/FederalStateFoodPrograms/UCM350004.pdf (accessed: 05.08.2024).
39. *Piwoni-Piórewicz A., Strekopytov S., Humphreys-Williams E., Kukliński P.* The patterns of elemental concentration (Ca, Na, Sr, Mg, Mn, Ba, Cu, Pb, V, Y, U and Cd) in shells of invertebrates representing different $CaCO_3$ polymorphs: a case study from the brackish Gulf of Gdansk (the Baltic Sea) // Biogeosciences. – 2021. – Vol. 18, iss. 2. – P. 707–728. – https://doi.org/10.5194/bg-18-707-2021
40. *Pourang N., Richardson C. A., Chenery S. R. N., Nasrollahzedeh H.* Assessment of trace elements in the shell layers and soft tissues of the pearl oyster *Pinctada radiate* using multivariate analyses: A potential proxy for temporal and spatial variations of trace elements // Environmental Monitoring and Assessment. – 2014. – Vol. 186, iss. 4. – P. 2465–2485. – https://doi.org/10.1007/s10661-013-3553-0

41. *Powell E. N., Kraeuter J. N., Ashton-Alcox K. A.* How long does oyster shell last on an oyster reef? // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2006. – Vol. 69, iss. 3/4. – P. 531–542. – https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.05.014
42. *Rainbow P. S., Wolowicz M., Fialkowski W., Smith B. D., Sokolowski A.* Biomonitoring of trace metals in the Gulf of Gdansk, using mussels (*Mytilus trossulus*) and barnacles (*Balanus improvisus*) // Water Research. – 2000. – Vol. 34, iss. 6. – P. 1823–1829. – https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00345-0
43. Resolução – RDC № 42, de 29 de Agosto de 2013 / Min. da Saúde [do Brasil], Agência Nac. de Vigilância Sanitária // Biblioteca Virtual em Saúde. – URL: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2013/rdc0042_29_08_2013.html (accessed: 05.08.2024).
44. *Romeo M., Hoarau P., Garello G., Gnassia-Barelli M., Girard J. P.* Mussel transplantation and biomarkers as useful tools for assessing water quality in the NW Mediterranean // Environmental Pollution. – 2003. – Vol. 122, iss. 3. – P. 369–378. – https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00303-2
45. *Schöne B. R.* The curse of physiology – Challenges and opportunities in the interpretation of geochemical data from mollusk shells // Geo-Marine Letters. – 2008. – Vol. 28. – P. 269–285. – https://doi.org/10.1007/s00367-008-0114-6
46. *Stankovic S., Jovic M., Stankovic A. R., Katsikas L.* Heavy metals in seafood mussels. Risks for human health // Environmental Chemistry for a Sustainable World / eds by E. Lichtfouse [et al.]. – Dordrecht [et al.] : Springer, 2012. – Vol. 1. – P. 311–373. – https://doi.org/10.1007/978-94-007-2442-6_9
47. *Stewart B. D., Jenkins S. R., Boig C., Sinfield C., Kennington K., Brand A. R., Lart W., Kröger R.* Metal pollution as a potential threat to shell strength and survival in marine bivalves // Science of the Total Environment. – 2021. – Vol. 755, pt. 1. – Art. 143019. – https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143019
48. *Summer K., Browne J., Liu L., Benkendorff K.* Molluscan compounds provide drug leads for the treatment and prevention of respiratory disease // Marine Drugs. – 2020. – Vol. 18, iss. 11. – Art. 570. – https://doi.org/10.3390/md18110570
49. *Tahamtani F. M., Kittelsen K., Vasdal G.* Environmental enrichment in commercial flocks of aviary housed laying hens: Relationship with plumage condition and fearfulness // Poultry Science. – 2022. – Vol. 101, iss. 4. – Art. 101754. – https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101754
50. *Yap C. K., Hatta Y., Edward F. B., Tan S. G.* Comparison of heavy metal concentrations (Cd, Cu, Fe, Ni and Zn) in the shells and different soft tissues of *Anadara granosa* collected from Jeram, Kuala Juru and Kuala Kurau, Peninsular Malaysia // Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science. – 2008. – Vol. 31, iss. 2. – P. 205–215.
51. *Yap C. K., Ismail A., Tan S. G.* Effects of total soft tissue and shell thickness on the accumulation of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in green-lipped mussel *Perna viridis* // Russian Journal of Marine Biology. – 2003. – Vol. 29, iss. 5. – P. 323–327. – https://doi.org/10.1023/A:1026313712052
52. *Yap C. K., Muhamad Azlan A. G., Cheng W. H., Tan S. G.* Accumulation and depuration of Cu and Zn in the blood cockle *Anadara granosa* (Linnaeus) under laboratory conditions // Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science. – 2011. – Vol. 34, iss. 1. – P. 75–82.
53. *Zitoun R., Clearwater S. J., Hassler C., Thompson K. J., Albert A., Sander S. G.* Copper toxicity to blue mussel embryos (*Mytilus galloprovincialis*): The effect of natural dissolved organic matter on copper toxicity in estuarine waters // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 653. – P. 300–314. – https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.263

HEAVY METALS IN MOLLUSK SHELLS OF THE BLACK SEA

Dikareva J. D., Kapranova L. L., Kapranov S. V., Ryabushko V. I., Shchurov S. V.

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

Abstract: The bivalve mussels *Mytilus galloprovincialis*, the giant oyster *Magallana* (=*Crassostrea*) *gigas*, and the gastropod *Rapana venosa* are important fisheries in the Black Sea. Other bivalve species, such as the ark shell *Anadara kagoshimensis* and the scallop *Flexopecten glaber ponticus*, are increasing in abundance and are potential aquaculture targets. Given the development of food additives and extracts from commercially important shellfish species, there is a need for information on their food safety, particularly in relation to heavy metal (HM) content. Currently, there are no data on the concentration of toxic metals in the shells of mollusks grown in marine farms of the Black Sea. However, their use as a potential food source has already been confirmed. In the present study, an inductively coupled plasma mass spectrometer was employed for the first time to analyse the concentration of cadmium, copper, arsenic, mercury, lead and zinc in the shells of five mollusk species from the Black Sea, including those grown in marine farms. The results demonstrated that copper and zinc accumulated to the highest extent in the shells of all species. Furthermore, the specific concentration of cadmium in the scallop shells and the concentration of copper and zinc in the oyster shells were confirmed. The shells of Rapana were found to be a potential source of secondary contamination of the environment with Cu, Hg and As, while scallop shells are characterized by a high Pb accumulation rate. The concentration of HMs in Anadara shells is the lowest, which makes their processed shells safe for food use. These results highlight the need to develop shellfish shell recycling strategies that are consistent with the Zero Waste concept in order to minimize environmental risks and increase the potential for recycling shell biomass.

Keywords: cadmium, copper, arsenic, mercury, lead, zinc, mollusks, shells, aquaculture, Black Sea

Сведения об авторах

Дикарева Юлия Дмитриевна	младший научный сотрудник отдела аквакультуры и морской фармакологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, dikareva.julija@rambler.ru
Капранова Лариса Леонидовна	кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела аквакультуры и морской фармакологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, lar_sa1980@mail.ru
Капранов Сергей Викторович	кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник отдела аквакультуры и морской фармакологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, sergey.v.kapranov@yandex.ru
Рябушко Виталий Иванович	доктор биологических наук, главный научный сотрудник, руководитель отдела аквакультуры и морской фармакологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, rabushko2006@yandex.ru
Щуров Сергей Вячеславович	научный сотрудник отдела аквакультуры и морской фармакологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, skrimea@mail.ru

Поступила в редакцию 10.06.2024 г.
Принята к публикации 25.11.2024 г.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ, БИОТЕХНОЛОГИЯ И АКВАКУЛЬТУРА

УДК 582.232:579.8.042.083.13 DOI: 10.21072/eco.2024.09.3.06

СОПУТСТВУЮЩАЯ МИКРОБИОТА КУЛЬТУРЫ *ARTHROSPIRA (SPIRULINA) PLATENSIS* В УСЛОВИЯХ СМЕНЫ ЛИМИТИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ *

Рылькова О. А., Дорошенко Ю. В., Лелеков А. С., Харчук И. А.

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

г. Севастополь, Российская Федерация,

e-mail: a.lelekov@ibss.su

Аннотация: В природных и в лабораторных условиях цианобактерии и микроводоросли сосуществуют с микробными сообществами, которые могут оказывать стимулирующее или ингибирующее воздействие на физиологию, рост и развитие альгокультур. Для оценки бактериальной контаминации и определения доли сопутствующей микробиоты в культуре *A. platensis* изучены количественный состав, разнообразие физиологических групп и морфологической структуры бактериального ассоциата в различных фазах роста накопительной и проточной культур цианобактерий. В работе использованы стандартные методы исследований накопления биомассы *A. platensis*, микробиологический, микроскопический и цитометрический подходы при исследовании сопутствующей микробиоты. Показано, что численность гетеротрофов, по данным проточной цитометрии, после окраски флуорохромом SYBR Green ($0{,}3\cdot10^8$–$1{,}6\cdot10^8$ кл.·мл$^{-1}$) превышала значения, полученные при посевах на твёрдых средах ($5\cdot10^6$–$1{,}3\cdot10^8$ КОЕ·мл$^{-1}$). Динамика изменений количественных показателей, полученная этими методами, была схожая: минимальные величины получены в экспоненциальной, а максимальные — в первой стационарной фазе роста. Проточная цитометрия значительно упрощала учёт бактериального ассоциата, однако при работе с культурой *A. platensis* необходима предварительная физико-химическая пробоподготовка. При минимальных количествах бактерий-спутников наблюдали как разнообразие физиологических групп, так и морфотипов сопутствующих микроорганизмов. На I стационарной стадии, на фоне высокой численности, при максимальном pH (11,8) доминировали алкалифильные микроорганизмы (98,8 %), представленные палочковидными бактериями различной длины (87 %). Развитие остальных физиологических групп, вероятно, ингибировалось высокой щёлочностью среды. На этапе II стационара, на фоне некоторого снижения pH и численности микробиоты, алкалифильная микробиота продолжала доминировать (82 %), однако возрастал (до 16 %) вклад дрожжей и грибов. Таким образом, pH культуральной среды при выращивании спирулины в значительной мере определяет и численность, и разнообразие бактериального сообщества. Несмотря на небольшой вклад, ассоциированная микрофлора может оказывать влияние на качество получаемой биомассы низших фототрофов при их промышленном выращивании. Проведённые исследования позволяют дать рекомендации по режимам культивирования и сбора биомассы *A. platensis*.

Ключевые слова: накопительная культура, продуктивность, лимитирующие факторы, бактерии, численность, физиологические группы, морфологическая структура, сопутствующая микробиота, ассоциированная микробиота

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Комплексное исследование экологических и физиолого-биохимических особенностей микроводорослей различных таксономических групп при адаптации к меняющимся условиям среды» (№ гос. регистрации 124021300070-2). Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемоэкологических процессов в экосистемах водоемов 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).

Введение

Цианобактерии, иногда называемые цианофитами или сине-зелёными водорослями, представляют собой большой и разнообразный тип фотолитотрофных прокариотических микроорганизмов, которые повсеместно распространены в пресной и морской воде. Некоторые виды вырабатывают токсины, а чрезмерный рост этих микроорганизмов в водоёмах представляет опасность для здоровья людей и животных. Другие виды можно собирать в качестве источника пищи или пищевой добавки — практика, известная как минимум с 16 века [Lafarga et al., 2020].

Микроводоросли используются для производства различных продуктов, таких как биотопливо, фармацевтические препараты, сырьё для аквакультуры [Azarpour et al., 2022; Borowitzka, 2013], а также для очистки сточных вод [Qin et al., 2024]. Сегодня двумя наиболее важными родами низших фототрофов, которые выращивают для потребления человеком и животными, являются цианобактерия Arthrospira и эукариотическая одноклеточная зелёная водоросль Chlorella [Muys et al., 2019]. Род Arthrospira насчитывает около тридцати пяти видов, из которых два, *A. platensis* и *A. maxima*, являются наиболее важными для коммерческого производства [Lafarga et al., 2020]. Среди широких слоёв населения оба вида известны как «спирулина». В биомассе спирулины содержится до 70 % белка, 10 % липидов, 13 % углеводов, 4 % нуклеиновых кислот, около 10 % составляет зольный остаток. Спирулина содержит практически все водо- и жирорастворимые витамины: B1 (тиамин), B2 (рибофлавин), B3 (пантотеновая кислота), B6 (пиридоксин), Bc (фолиевая кислота), C (аскорбиновая кислота), E (токоферол), H (биотин), PP (никотиновая кислота), инозит. Большинство (74 %) всех жирных кислот спирулины (пальмитолеиновая, олеиновая, линолевая, линоленовая) — ненасыщенные. Среди насыщенных жирных кислот преобладают лауриновая, миристиновая, пальмитиновая, маргариновая и стеариновая. Следует отметить, что в спирулине отсутствуют жирные кислоты, не усваиваемые организмом человека. В биомассе данной цианобактерии — 20 минеральных элементов, необходимых человеку, в том числе кальций, железо, магний, медь, йод и селен, в основном в форме органических соединений. Углеводы спирулины представлены главным образом сложными полимерами. Полисахариды входят в состав клеток, клеточных стенок и слизистых чехлов. При этом преобладают гемицеллюлозы и пектиновые вещества. Полисахариды, выделенные из клеток спирулины, содержат рамнозу, фруктозу, галактозу, ксилозу, маннозу, глюкуроновую и галактуроновую кислоты [Комиссарова, Икромова, 2020].

Как и в случае с сельскохозяйственными культурами, при работе с культурой низших фототрофов существует вероятность снижения скорости роста или качества биомассы вследствие бактериальной контаминации. В закрытых биореакторах в лабораторных условиях её появление возможно исключить или контролировать его с помощью тех или иных методов. Однако в системах открытых бассейнов или фотобиореакторов, используемых в промышленной альготехнологии, вероятность появления других микроорганизмов существенно повышается [Flynn, Kenny, Mitra, 2017]. Существует несколько возможных вариантов: заражение другими видами микроводорослей [Smith et al., 2005], инфекции, вызванные вирусами [Chroeder et al., 2003], бактериями и грибами [Strittmatter et al., 2016; AlSulaiman, 2011], и появление простейших или зоопланктона [Flynn, Kenny, Mitra, 2017].

Однако даже в отсутствие заражения культуры цианобактерий и микроводорослей, как в природных, так и в лабораторных условиях, обитают в окружении сложных микробных сообществ, которые оказывают стимулирующее или ингибирующее воздействие на физиологию, рост и развитие популяций водорослей. Существующий спектр взаимоотношений в альгобактериальном сообществе чрезвычайно широк и многообразен [Гольдин, 2013; Кублановская, 2019]. Важную роль при формировании альгобактериального сообщества и регулировании взаимоотношений

между его членами играют метаболиты, выделяемые водорослями и бактериями-спутниками в процессе своей жизнедеятельности [Игнатенко, Немцева, 2012]. Проведённые таксономические исследования бактерий-спутников для ряда видов водорослей показали, что во всех случаях гетеротрофный компонент альгобактериальных сообществ представлен несколькими видами микроорганизмов. Как правило, в ассоциации с водорослью обнаруживаются от 7 до 12 видов. Установлено, что одни из них прочно связаны ценотическими взаимодействиями с водорослью и являются постоянными (доминантными) её симбионтами, другие же входят в состав альгобактериального сообщества в качестве минорного компонента [Борисова, 1996; Игнатенко, Немцева, 2012]. Кроме того, в литературе [Борисова, 1996] приводятся сведения о том, что в процессе роста и развития культуры микроводорослей наблюдается естественная смена доминирующих бактерий-спутников. Однако данные о количественных и структурных изменениях в сопутствующей микробиоте *Arthrospira platensis*, выращиваемой в условиях интенсивной культуры, крайне ограничены. На сегодняшний день хорошо проработаны вопросы влияния различных факторов среды на продуктивность культуры низших фототрофов [Лелеков, 2023]. В частности, показано, что по характеру накопительной кривой можно определить лимитирующие факторы роста культуры и последовательность их действия. В процессе роста культуры обычно происходит смена лимитирующего фактора, что выражается в резком изменении продуктивности или продукции одного из биохимических компонентов биомассы, а также в «изломах» кривой роста. Очевидно, что различные типы лимитирования оказывают влияние на фотобиосинтез микроводорослей, что изменяет состав экскретируемых ими метаболитов. В неблагоприятных условиях клетки микроводорослей и цианобактерий утолщают оболочку и агглютинируют благодаря выделению во внешнюю среду экзаполисахаридов. Все эти процессы естественным образом влияют на развитие сопутствующей бактериальной составляющей. Поэтому первым шагом в исследовании развития альгобактериальных сообществ в искусственных экосистемах является получение первичных данных о численности и разнообразии гетеротрофной составляющей с учётом различных типов лимитирования роста культуры микроводорослей.

Цель работы — определить общую численность, численность различных физиологических групп, изучить морфологическую структуру сопутствующей микробиоты цианобактерии *Arthrospira platensis* в различных фазах роста накопительной и проточной культуры.

Материалы и методы

Условия культивирования. Культура *Arthrospira (Spirulina) platensis* Gomont была получена из коллекции ФИЦ ИнБЮМ. Культивирование осуществляли на среде Заррук [Zarrouk, 1966] в 1-литровом культиваторе плоскопараллельного типа в условиях круглосуточного одностороннего освещения люминесцентными лампами Philips Daylight мощностью 18 Вт. Средняя освещённость рабочей поверхности составляла 6,5 клк, что с учётом спектра лампы составляет 21 Вт·м$^{-2}$ или 98 мкмоль квантов м$^{-2}$·с$^{-1}$. Суспензию барботировали воздухом с помощью аквариумного компрессора, углекислый газ не добавляли. Температуру в эксперименте поддерживали на уровне (27 ± 1) °С. Сухое вещество (биомассу) определяли оптическим методом, измеряя в 1-сантиметровых кюветах на фотометре Unico-2100 поглощение суспензии при 750 нм, полученное значение оптической плотности умножали на эмпирический коэффициент 0,58 [Чекушкин, Авсиян, Лелеков, 2022]. На pH-метре И-160 Ми определяли pH культуральной среды.

Метод мониторинга микрофлоры. Для микробиологического мониторинга сопутствующих микроорганизмов пробы (5 мл) отбирали стерильными пипетками в стерильные пробирки и в течение 30 мин производили посев на твёрдые среды (ПТС). Учёт гетеротрофных бактерий (ГБРПА) проводили на рыбопептонном агаре (РПА), учёт дрожжей и грибов (ДГ) — на среде

Сабуро [Практикум … , 2005]. Для выявления алкалифильных бактерий (АБ) использовали среду следующего состава (г·л$^{-1}$): сахароза — 10, пептон — 5, дрожжевой экстракт — 5, KH_2PO_4 — 1, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ — 2, Na_2CO_3 — 20, агар-агар — 20 [Хаддад и др., 1990]. Посевы производили методом Голда в объёме 40 мкл в двух повторностях. Чашки Петри инкубировали 24–48 ч при 37 ºС (термостат ТС-80М, Украина). Колонии просматривали с помощью лупы и проводили подсчёт колоний образующих единиц (КОЕ) по стандартной методике [Родина, 1965].

Подготовка суспензии *A. platensis* для цитометрических и микроскопических исследований. Для минимизирования внешнего загрязнения все реактивы, используемые для обработки суспензии цианобактерий, фильтровались через фильтр с размером пор 0,2 мкм. Для дальнейшей работы использовали стерильные пробирки типа Eppendorff объёмом 15 и 2 мл. Аликвоту суспензии *A. platensis* (5–10 мл) фиксировали глутардиальдегидом в конечной концентрации 2,5 % и хранили в холодильнике при +4 °С не более двух недель.

Обработка суспензии *A. platensis* метанолом. В связи с тем, что трихомы спирулины могут достигать в длину 500 мкм, непосредственные исследования культуральной суспензии с помощью проточной цитометрии (ПЦ) невозможны, поэтому мы проводили предварительную физико-химическую обработку пробы. В пробирку с фиксированной *A. platensis* добавляли метанол до конечной концентрации в пробе 10 % и перемешивали 10–15 сек с помощью вортекса (Microspin FV-2400, Biosan, Латвия). Затем образцы выдерживали в ультразвуковой (УЗ) установке (Unitra unima 01SZTYN UM-4, VA140, V220, Hz50) в течение 15 мин при 35 °С, вновь перемешивали и центрифугировали (5 мин, 3000 об.·мин$^{-1}$) [Kallmeyer et al., 2008; Lunau et al., 2005]. Аликвоту супернатанта (старт) окрашивали флуорохромом и исследовали с помощью проточного цитометра, для осадка выполняли серию промывок (см. ниже).

Серия промывочных процедур. Для более полного высвобождения оставшихся микроорганизмов от трихом цианобактерий ко всему объёму осадка (после отбора аликвоты для начального определения численности (старт)) добавляли 1 мл стерильной среды Заррук, ресуспендировали с помощью вортекса и вновь центрифугировали 5 мин при 3000 об.·мин$^{-1}$. Аликвоту супернатанта окрашивали флуорохромом (SYBR Green I) и определяли численность бактерий с помощью проточного цитометра. Процедуру промывок повторяли от 3 до 10 раз.

Цитометрические исследования. Цитометрический анализ проб проводили в центре коллективного пользования «Спектрометрия и хроматография» Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН» на проточном цитометре MACS Quant Analazer (Miltenyi Biotec, Германия), оборудованном тремя лазерами (405, 488, 635 нм). Численность бактерий определяли в пробах, окрашенных SYBR Green I (Molecular Probes, США), с помощью гейтинга популяции клеток на 2-параметрических цитограммах прямого светорассеивания (FS) и флуоресценции SYBR Green I в зелёной области спектра (канал FL1, 525 нм) на безразмерных логарифмических шкалах. Окраску флуорохромом SYBR Green I проводили в соответствии с протоколами [Marie et al., 1997; Noble, Fuhrman, 1998]. Рабочие растворы флуорохромов готовили из расчёта 10 мкл на 1 мл стерильной Milli-Q воды и хранили при температуре –20 °С. Образцы прокрашивали с добавлением 10 мкл рабочего раствора на 1 мл пробы с последующей инкубацией в темноте в течение 40 мин непосредственно перед цитометрическими измерениями. Для обработки данных использовали программу FSC Express 7 Research Edition.

Расчёт численности бактерий по данным ПЦ. При расчётах общей численности бактерий учитывали объёмы растворов — фиксатора, вводимых реактивов. Численности микроорганизмов на старте и после промывочных серий суммировали. По полученным данным строили кумулятивные кривые, за 100 % десорбированных из суспензии *A. platensis* клеток принимали результаты, полученные после 10 промывок.

Микроскопические исследования. При подготовке образцов для сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) аликвоту (0,5–1 мл) *A. platensis* из надосадочной жидкости после химической и физической обработки пробы концентрировали на трековой мембране с диаметром пор 0,2 мкм (производства ОИЯИ, г. Дубна, Россия). Далее проводили дегидратацию, используя серию разведения этанола: 20, 30, 50, 75, 96, 100 % [Bratbak, 1993]. Для сушки образцов в критической точке (1,5–2,5 часа) применяли устройство Leica EM CPD300 (Германия), а для напыления (Au/Pd; 0,5–1,0 мин) — прибор Leica EM ACE200 (Германия). Просматривали образцы с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi SU3500 (Япония) при увеличении ×4000–10000.

Морфологические исследования, определение размеров клеток и расчёт биомассы бактерий. Размеры бактерий (по микрофотографиям СЭМ) определяли с помощью программы ImageJ 1.50i (National Institutes of Health, США, Java 1.6.0_20 (32-bit). Всего по СЭМ-изображениям измерено 275 клеток, определён вклад каждой из морфологических групп в общую численность. Расчёт биомассы был проведён с учётом численности бактерий (по данным ПЦ) и коэффициента $2{,}0 \cdot 10^{-14}$ г С·кл.$^{-1}$ [Lee, Furman, 1987].

Статистический анализ проводили в пакете STATISTICA (data analysis software system), версия 10 (StatSoft Inc., www.statsoft.com), построение графиков — в программах SigmaPlot 10.0 (SYSTAT Software Inc.), Surfer 11 (Golden Software Inc.) и Grapher 8 (Golden Software Inc.). Полученные данные обработаны с использованием параметрических критериев, данные представлены в виде средней арифметической (M) из пяти повторностей (n), стандартной ошибки и среднего (mM); статистическую значимость различий оценивали по t-критерию Стьюдента ($p < 0{,}05$).

Результаты и обсуждение

Влияние лимитирующих факторов на рост культуры *A. platensis* в накопительном и полупроточном режимах.

На начальном этапе эксперимента культуру *A. platensis* выращивали в накопительном режиме. На рисунке 1 представлена кривая роста и динамика pH культуральной среды. За девять суток биомасса увеличилась в 30 раз, достигнув максимального значенияе 1,55 г СВ л$^{-1}$ в первой стационарной фазе. Отметим, что первые трое суток наблюдался экспоненциальный рост с максимальной удельной скоростью роста 0,65 сут$^{-1}$. На третьи сутки, в связи с самозатенением клеток, экспоненциальный рост прекратился, культура перешла в фазу линейного роста, при этом максимальная продуктивность составила 0,2 г СВ л$^{-1}$ сут$^{-1}$.

Анализируя рисунок 1Б, можно заметить, что на шестые сутки эксперимента наблюдалось увеличение скорости роста pH культуры, что свидетельствует о смене лимитирующего фактора (со светового на углеродное обеспечение). Строго говоря, углерод является одним из ключевых факторов, определяющих форму кривой роста спирулины. Без дополнительной подачи углекислого газа в культуру единственным источником углерода являются гидрокарбонат-ионы. Из-за высокого начального содержания соды в питательной среде Заррук именно поглощение гидрокарбонат-ионов клетками определяет динамику pH в накопительной культуре. При высоких значениях pH среды (>11,7) углерод представлен в растворе только карбонат-ионами [Куприянова, Самылина, 2015], которые не поглощаются клетками спирулины. Это приводит к остановке роста культуры, что и произошло в нашем случае на девятые сутки эксперимента. Поскольку рост культуры остановился на 1,5 г СВ л$^{-1}$, а среда Заррук по основным биогенным элементам (углерод, азот, фосфор и др.) рассчитана примерно на 4,5 г СВ л$^{-1}$, то в среде осталось более половины всех питательны веществ.

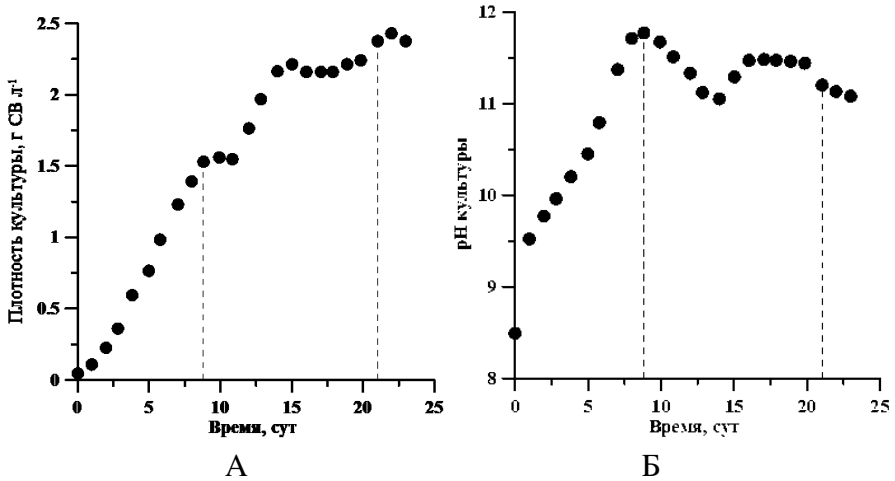

Рис. 1. Накопительная кривая роста (А) и динамика pH (Б) культуры *A. platensis*. Пунктирные линии показывают точки отбора микробиологических проб

В стационарной фазе роста pH культуральной среды достигал максимума, далее показатель снижался, что привело к смещению карбонатного равновесия в среде и появлению доступного гидрокарбонатного углерода. Это отразилось на динамике плотности культуры. Начиная с 11-х по 14-е сутки возобновился интенсивный линейный рост биомассы, при этом продуктивность культуры на данном участке, как и на первом линейном участке, составила 0,2 г СВ $л^{-1}$ $сут^{-1}$. Это свидетельствует об обратном переключении лимитирующего фактора (с углеродного на световое обеспечение). Подробно механизмы, лежащие в основе линейного роста культуры, приведены в [Лелеков, 2023]. Рост биомассы привёл к повторному защелачиванию среды, pH культуры на 16-е сутки достиг 11,5 единиц, культура вышла на новый стационарный уровень. Максимальное значение биомассы во второй стационарной фазе составило 2,43 г СВ $л^{-1}$.

Видовой состав сопутствующей микробиоты при культивировании спирулины довольно хорошо изучен и описан во многих работах [Борисова, 1996; Тархова, 2005]. Однако авторы рассматривают культуру, находящуюся в стационарной фазе роста, которая характеризуется высокими значениями pH культуральной среды, при которых рост спирулины лимитирован углеродом. В литературе не приводятся данные о численности и разнообразии гетеротрофов при экспоненциальном (неограниченном) росте спирулины. Отметим, что такой рост накопительной культуры возможен только на начальном этапе, когда световые условия и обеспеченность биогенными элементами находятся на оптимальном уровне. При запуске накопительной культуры сопутствующая микробиота будет во многом определяться теми видами, которые попали в фотобиореактор вместе с инокулятом, то есть во многом зависит от предыстории. Охарактеризовать бактериальную составляющую, сопутствующую спирулине при экспоненциальном росте, возможно только в условиях проточной (полупроточной) культуры.

На рисунке 2 представлена кривая роста *A. platensis* на протоке. Культуру в течение недели держали на 50%-ном обмене: ежедневно отбирали 500 мл суспензии и добавляли такой же объём питательной среды. В таких условиях плотность культуры находилась в диапазоне около 0,2–0,4 г СВ $л^{-1}$, pH культуральной среды — 9,2–9,6 единиц. Известно, что на протоке происходит селекция альгобактериального сообщества, то есть можно считать, что в культуре остаются микроорганизмы, являющиеся собственно спутниками спирулины при оптимальных условиях роста. Поэтому на восьмые сутки проточного культивирования были проведены количественный и качественный анализ бактериальной микробиоты, а также сравнение полученных результатов со стационарной фазой роста.

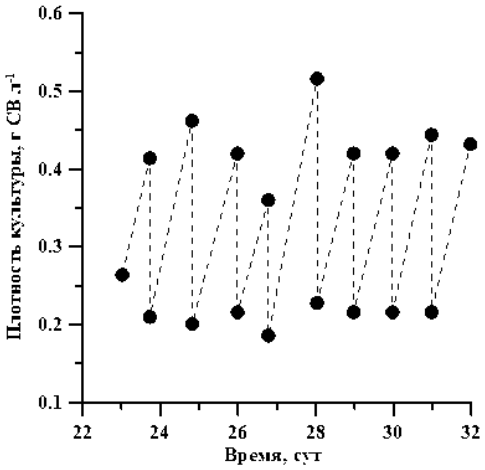

Рис. 2. Кривая роста полупроточной культуры *A. platensis*

Численность и морфологическая структура сопутствующей микробиоты в культуре *A. platensis* в различных фазах роста.

Численность и морфоструктуру сопутствующей микробиоты культуры *A. platensis* определяли в условиях протока, а также на девятые и двадцать первые сутки эксперимента, что соответствует экспоненциальному (неограниченному) росту и двум максимумам биомассы на накопительной кривой. Согласно данным микробиологических посевов количество КОЕ увеличилось в 20 раз на первом стационаре по сравнению с экспоненциально растущей культурой (см. рисунок 3). Минимальные величины были получены в период экспоненциальной фазы роста спирулины ($0{,}3 \cdot 10^8$ кл.·мл$^{-1}$ и $5 \cdot 10^6$ КОЕ·мл$^{-1}$ для ПЦ и ПТС соответственно). Известно, что в этой фазе роста биомасса *A. platensis* растёт в условиях отсутствия лимитирования по минеральному питанию и свету. В экспоненциальной фазе роста более 70 % экскретируемых альгокультурами веществ представлены низкомолекулярными соединениями, которые могут реутилизироваться самими микроводорослями, поэтому стимулирования роста бактерий-спутников не происходит [Игнатенко, Немцева, 2012]. Кроме того, выделяемые метаболиты фототрофов могут оказывать лимитирующее, бактериостатическое или бактерицидное воздействие на ассоциированную микробиоту [Дудниченко, 1999].

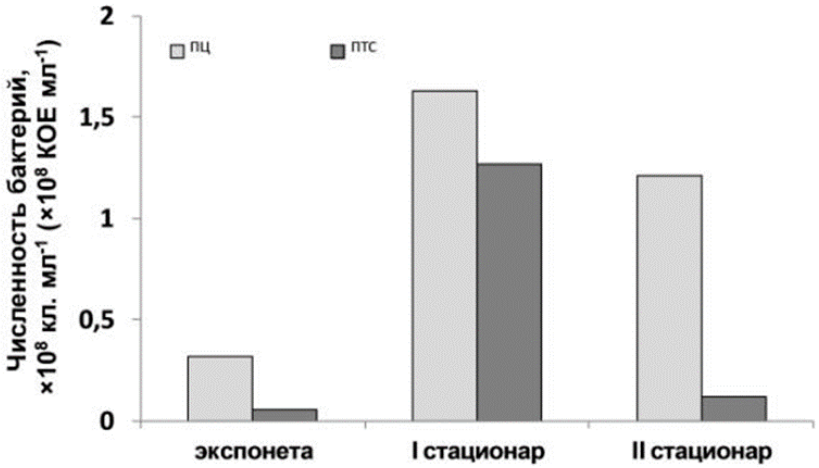

Рис. 3. Численность сопутствующей микробиоты на разных стадиях роста культуры *A. Platensis*, по данным проточной цитометрии (ПЦ) и микробиологических посевов на твёрдые среды (ПТС).

На I стационарной стадии роста *A. platensis* численность микробиоты значительно повышалась и достигала максимальных величин ($1{,}6 \cdot 10^8$ кл.·мл$^{-1}$ и $1{,}3 \cdot 10^8$ КОЕ·мл$^{-1}$ для ПЦ и ПТС соответственно). Согласно литературным данным, в стационарной фазе роста в культуральных средах присутствует большое количество высокомолекулярных соединений (ВМС), которые не могут усваиваться непосредственно микроводорослями. Происходит стимулирование активного развития сопутствующих бактерий, экзоферменты которых способны расщеплять ВМС до низкомолекулярных веществ [Тиберкевич, Сакевич, 1999]. В период II стационарной фазы роста *A. platensis* численность микроорганизмов несколько снижалась, но оставалась на достаточно высоком уровне ($1{,}2 \cdot 10^8$ кл.·мл$^{-1}$ и $0{,}1 \cdot 10^8$ КОЕ·мл$^{-1}$ для ПЦ и ПТС соответственно). Необходимо отметить, что численность ассоциированных микроорганизмов, определённая различными методами (посевы на твёрдые среды и проточная цитометрия), имела схожую тенденцию. Однако обращает на себя внимание, что при ПТС численность была ниже, это вполне согласуется с известными из литературы данными о том, что к росту на твёрдых средах способны не все микроорганизмы [Zobell, 1943].

Полученные нами данные по численности бактериального ассоциата *A. platensis* несколько превышают известные аналогичные показатели: $3 \cdot 10^4$–$6 \cdot 10^5$ КОЕ·мл$^{-1}$ для методов ПТС и $2{,}1 \cdot 10^6$–$1{,}3 \cdot 10^7$ кл.·мл$^{-1}$ при окраске флуорохромами и подсчёте с помощью люминесцентной микроскопии [Тархова, 2005; Хаддад и др., 1990; Falquet, Hurni, 2006; Wu, Pond, 1981; Shiraishi, 2015]. Вероятно, это можно объяснить различием исследованных штаммов цианобактерий, условиями культивирования, а также использованием нами проточной цитометрии, как более точного метода учёта микроорганизмов. Рост общего количества сопутствующей микробиоты при накопительном выращивании *A. platensis* мог быть связан с накоплением в культуральной среде органических веществ, которые поступают при их экскреции клетками спирулины, гибели клеток, потере клеточных структур при делении и пр. Кроме того, при проточном культивировании происходит вымывание из культиватора продуктов метаболизма клеток. Однако на бактериальное сообщество существенное влияние могут оказывать и физико-химические условия среды [Shiraishi, 2015].

Вклад различных физиологических групп в общую численность бактериального ассоциата в культуре *A. platensis*.

По данным посевов на твёрдые среды был определён вклад каждой физиологической группы ассоциированных микроорганизмов. На стадии экспоненциального роста соотношение вкладов ГБРПА и алкалитических бактерий был одинаковым — по 47,6 %, доля дрожжей и грибов составляла 4,8 %. На стационарных стадиях выявлено абсолютное доминирование АБ (98,8 и 82 % соответственно для I и II стационаров); доля ГБРПА была невелика (1 и 1,6 % соответственно для I и II стационаров); доля ДГ на II стационарной стадии составляла 16,2 %, что значительно превышает величину, полученную в экспоненциальной и I стационарной фазе.

Обнаружена высокая положительная корреляция ($R^2 = 0{,}98$) между вкладом доминирующих алкалифильных микроорганизмов и уровнем pH культуральной среды. Максимальный вклад АБ (98,8 %) наблюдали в I стационарной фазе роста спирулины при максимальном значении pH = 11,8. Высокая щёлочность оказывала ингибирующее воздействие на развитие дрожжей и грибов, растущих на среде Сабуро, и особенно гетеротрофных микроорганизмов, предпочитающих рыбопептонный агар.

Морфологическая структура сопутствующей микробиоты в культуре *A. platensis* в различных фазах роста. В морфологической структуре микробиоты, ассоциированной с культурой *A. platensis*, по данным СЭМ, нами выделены 3 основные группы: палочковидные, округлые и извитые формы (см. рис. 5).

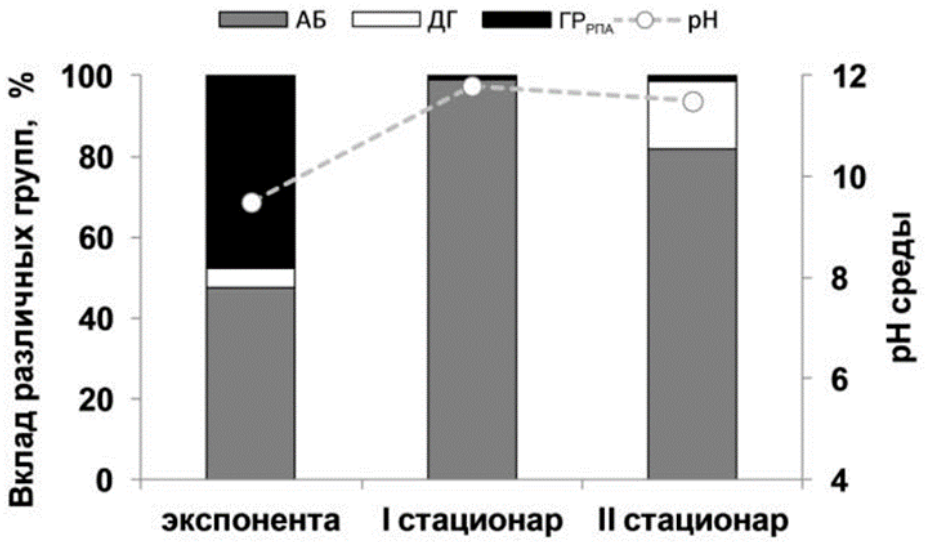

Рис. 4. Соотношение физиологических групп сопутствующей микробиоты на фоне изменения pH культуральной среды на разных стадиях роста культуры *A. Platensis*, по данным микробиологических посевов (АБ — алкалитические бактерии, ДГ — дрожжи и грибы, ГБРПА — гетеротрофные бактерии, растущие на РПА)

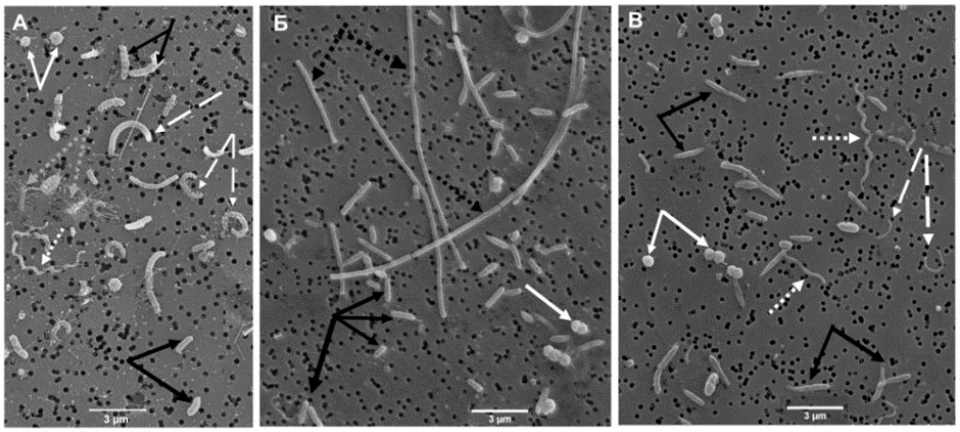

Рис. 5. Морфологические группы микроорганизмов, сопутствующих культуре *A. platensis* на разных стадиях роста (по данным СЭМ, увеличение ×4000, микроскоп Hitachi SU3500 (Япония)): А — экспонента, Б — I стационар, В — II стационар. Чёрными сплошными стрелками показаны небольшие палочки, чёрными пунктирными — длинные палочки, белыми сплошными — кокки и диплококки, белыми пунктирными — спирохеты, белыми штриховыми — вибрионы, серыми штриховыми — палочки с пиллями

Во всех пробах чаще всего регистрировали небольшие палочки (часто снабжённые пиллями) длиной от 0,94 до 1,72 мкм (в среднем (1,30 ± 0,17) мкм), шириной 0,25–0,01 мкм (в среднем (0,25 ± 0,01) мкм). Также встречались длинные палочки длиной от 3,65 до 6,55 мкм (в среднем (5,13 ± 0,87) мкм), шириной 0,19–0,38 мкм (в среднем (0,28 ± 0,07) мкм). Диаметр округлых форм (кокков) изменялся от 0,47 до 0,53 мкм (в среднем составляя (0,5 ± 0,02) мкм). Извитые формы были представлены спирохетами длиной 6,03–6,35 мкм (в среднем (6,19 ± 0,03) мкм), шириной 0,18–0,25 мкм (в среднем (6,22 ± 0,07) мкм) и вибрионами, имеющими вид запятых, длиной 1,4–2,71 мкм (в среднем (1,95 ± 0,67) мкм), шириной 0,09–0,10 мкм (в среднем (0,1 ± 0,002) мкм).

В экспоненциальной фазе роста культуры *A. platensis* доминирующей группой в ассоциированной микробиоте были небольшие палочковидные клетки (45 % от общего числа микроорганизмов). Достаточно часто встречались извитые формы, представленные вибрио (33 %), реже спирохетами (2 %). Вклад округлых форм составлял 20 %. К I стационарной фазе роста произошло перераспределение в составе сопутствующих бактерий. Доминировали также небольшие палочки, но их вклад заметно увеличился (до 60 %). Появились длинные палочковидные клетки, иногда соединённые в цепочки (27 %), несколько снизилась доля кокков (до 13 %), извитые формы отсутствовали. На II стационарной стадии роста продолжали доминировать небольшие палочковидные клетки (65 %), снизилась доля длинных палочек (до 6 %), вклад округлых клеток немного увеличился (до 15,5 %). Вновь были обнаружены извитые формы бактерий — реже вибрио (7 %), чаще спирохеты (10 %) (см. рис. 6).

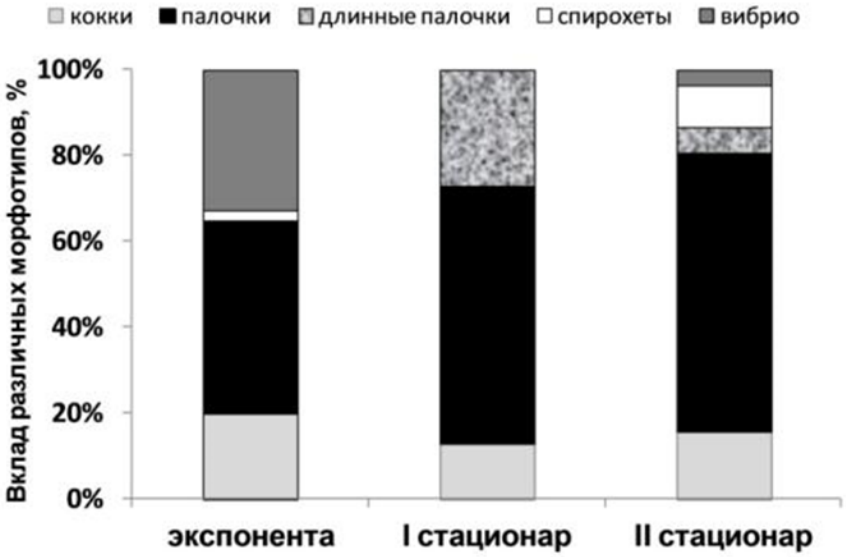

Рис. 6. Морфологические показатели сопутствующей микрофлоры в культуре *A. platensis* на разных стадиях роста, по данным сканирующей электронной микроскопии

Известно, что в «молодых» культурах микроводорослей встречается максимальное количество видов сопутствующей микрофлоры, однако по мере роста культуры состав бактериального ассоциата становится более однородным. Это, как правило, связано с негативным воздействием продуктов распада старых клеток водорослей, действием высокого окислительно-восстановительным потенциала и, возможно, другими причинами [Gorobets, Blinkova, Baturo, 2001]. В данном эксперименте в экспоненциальной фазе роста цианопрокариоты *A. platensis* при минимальных количествах бактерий-спутников наблюдали как разнообразие физиологических групп (рис. 4), так и морфотипов сопутствующих микроорганизмов (рис. 5, 6). На I стационарной стадии на фоне высокой численности, вероятно, основным лимитирующим фактором развития бактериального ассоциата стал водородный показатель культуральной среды. При максимальной pH = 11,8 доминировали алкалифильные микроорганизмы (98,8 %), представленные палочковидными бактериями различной длины (их суммарный вклад составил 87 %). Развитие остальных физиологических групп (ДГ, ГБРПА), вероятно, ингибировалось высокой щёлочностью среды. На этапе II стационара на фоне некоторого снижения pH и численности микробиоты алкалифильная микробиота продолжала доминировать (82 %), однако возрастал вклад дрожжей и грибов, растущих на среде Сабуро (до 16 %, максимум для всего периода исследований). Морфологическая структура ассоциата была максимально

разнообразна. Предполагается, что помимо воздействия щёлочности среды, за счёт большого количества выделенных клетками *A. platensis* метаболитов, изменился состав органического субстрата, что вызвало смену сопутствующей микрофлоры. Однако данная гипотеза требует дополнительных исследований.

Соотношение биомасс культуры *A. platensis* и сопутствующей микробиоты на различных стадиях роста.

Согласно данным проточной цитометрии, с учётом известных коэффициентов [Lee, Furman, 1987; Троицкий, Сорокин, 1967], в экспоненциальной фазе роста биомасса бактерий, ассоциированных с *A. platensis*, составляла 1,16 мг•л$^{-1}$ на 0,43 г СВ спирулины на литр или 0,27 %. (табл. 1).

Таблица 1

Биомасса бактерий, ассоциированных с культурой *A. platensis*

Стадия роста культуры	Численность бактерий, 10^8 кл.·мл$^{-1}$	Бактериальный углерод, мг С·л$^{-1}$	Сырая биомасса бактерий, мг·л$^{-1}$	Сухая биомасса бактерий, мг·л$^{-1}$
Экспоненциальная	0,3	0,64	5,82	1,16
I стационар	1,6	3,24	29,45	5,89
II стационар	1,2	2,42	22,00	4,40

В I стационарной фазе вклад бактерий достиг 5,89 мг•л$^{-1}$ на 1,55 г СВ·л$^{-1}$ или 0,38 %, а во II стационарной фазе — 0,18 %. Таким образом, биомасса бактерий на всей накопительной кривой была ничтожно мала по сравнению с биомассой спирулины. Следовательно, сопутствующая микробиота не оказывала существенного влияния на продукционные характеристики культуры *A. platensis*.

Заключение

В ходе данной работы были получены первичные данные о численности, биомассе, морфологической структуре, физиологических группах гетеротрофов, сопутствующих спирулине при её накопительном культивировании. Впервые сделана попытка исследования альгобактериального сообщества с учётом действия лимитирующих факторов. Установлено, что pH культуральной среды при выращивании спирулины в значительной мере определяет численность и разнообразие бактериального сообщества. Полученные данные необходимы для разработки алгоритмов управления структурой и продуктивностью замкнутых альгобактериальных сообществ. С практической точки зрения гетеротрофная составляющая оказывает влияние на качество получаемой биомассы низших фототрофов при их промышленном выращивании.

С методической точки зрения в данной работе установлено, что численность ассоциированных микроорганизмов, определённая различными методами, имела схожую динамику. Проточная цитометрия значительно упрощает исследования сопутствующей микробиоты, однако при работе с культурой *A. platensis* необходима физико-химическая пробоподготовка.

Список литературы

1. *Борисова Е. В.* Видовой состав бактерий, сопутствующий микроводорослям в культуре (Обзор литературы) // Альгология. – 1996. – Т. 6, № 3. – С. 303–313.
2. *Гольдин Е. Б.* Биологическая активность микроводорослей и ее значение в межвидовых взаимоотношениях // Экосистемы, их оптимизация и охрана. – 2013. – Вып. 9. – С. 49–76.
3. *Дудниченко Т. И.* Изучение взаимоотношений *Haematococcus pluvialis* Flotow et Wille (*Chlorophyta*) и сопутствующих бактерий // Альгология. – 1999. – Т. 9, № 2. – С. 47.
4. *Игнатенко М. Е., Немцева Н. В.* Механизмы взаимодействия автотрофного и гетеротрофного компонентов в альгобактериальных сообществах // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. – 2012. – № 3. – URL: http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2012-3%20/Articles/7IgnatenkoME.pdf. – Дата публ.: не указ.
5. *Комиссарова А. В., Икромова С. Б.* Микроводоросль спирулина: культивирование и особенности её биохимического состава // Аллея Науки. – 2020. – № 11, т. 1. – С. 186–190. – URL: https://alley-science.ru/domains_data/files/Collection_of_journals/Noyabr_1_tom2020.pdf. – Дата публ.: не указ.
6. *Кублановская А. А.* Микробные сообщества каротиногенной микроводоросли *Haematococcus lacustris* (Girod-Chantrans) Rostafinski (Chlorophyta) в природе и при культивировании : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.01. – Москва, 2019. – 24 с.
7. *Куприянова Е. В., Самылина О. С.* CO_2-концентрирующий механизм и его особенности у галоалкалофильных цианобактерий // Микробиология. – 2015. – Т. 84, № 2. – С. 144–159. – https://doi.org/10.7868/S0026365615010073
8. *Лелеков А. С.* Количественные закономерности роста микроводорослей в культуре и параметры управления процессом фотобиосинтеза : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 1.5.2. – Севастополь, 2023. – 45 с.
9. Практикум по микробиологии / под ред. А. И. Нетрусова. – Москва : Academia, 2005. – 603 с.
10. *Родина А. Г.* Методы водной микробиологии : практ. рук. – Москва : Наука, 1965. – 364 с.
11. *Тархова Э. П.* Микроорганизмы, сопутствующие *Spirulina platensis* в накопительной культуре // Экология моря / НАН Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. – Севастополь, 2005. – Вып. 70. – С. 49–52.
12. *Тиберкевич Н. Я., Сакевич А. И.* Коррелятивные связи между фотосинтезом и количеством бактерий-спутников в культурах водорослей // Альгология. – 1999. – Т. 9, № 2. – С. 141.
13. *Троицкий А. С., Сорокин Ю. И.* К методике расчёта биомассы бактерий в водоёмах // Труды Института биологии внутренних вод АН СССР. – Борок, 1967.– Вып. 15. – С. 85–90.
14. *Хаддад Р. И., Багдасарян С. Н., Давидян Т. С., Африкян Э. К.* Микроводоросль спирулина и ее микрофлора // Биологический журнал Армении. – 1990. – Т. 43, № 3. – С. 235–239.
15. *Чекушкин А. А., Авсиян А. Л., Лелеков А. С.* Продуктивность культуры A*rthrospira platensis* Gomont 1892 в условиях естественного освещения // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН. – 2022. – № 4. – С. 33–44. – https://doi.org/10.21072/eco.2022.24.02

16. *AlSulaiman M. A.* Microbiological quality of locally produced Spirulina in comparison with a commercial sample // Biosciences. Biotechnology Research. Asia. – 2011. – Vol. 8, nr 1. – P. 137–141. – https://doi.org/10.13005/bbra/835
17. *Azarpour A., Zendehboudi S., Mohammadzadeh O., Rajabzadeh A., Chatzis I.* A review on microalgal biomass and biodiesel production through co-cultivation strategy // Energy Conversion and Management. – 2022. – Vol. 267. – Art. 115757. – https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115757
18. *Borowitzka M. A.* High-value products from microalgae – their development and commercialization // Journal of Applied Phycology. – 2013. – Vol. 25, iss. 3. – P. 743–756. – https://doi.org/10.1007/s10811-013-9983-9
19. *Bratbak G.* Microscope methods for measuring bacterial biovolume: epifluorescence microscopy, scanning electron microscopy, and transmission electron microscopy // Handbook of Methods in Aquatic Microbial Ecology / ed. by P. F. Kemp [et al.]. – Boca Raton : Lewis Publ., 1993. – P. 309–316. – https://doi.org/10.1201/9780203752746
20. *Chroeder D. C., Oke J., Hall M., Malin G., Wilson W. H.* Virus succession observed during an Emiliania huxleyi bloom // Applied and Environmental Microbiology. – 2003. – Vol. 69, iss. 5. – P. 2484–2490. – https://doi.org/10.1128/AEM.69.5.2484-2490.2003
21. *Falquet J., Hurni J.-P.* Spiruline. Aspects Nutritionnels. – [S. l.] : Antenna Technologies, 2006. – 41 p.
22. *Flynn K. J., Kenny P., Mitra A.* Minimising losses to predation during microalgae cultivation // Journal of Applied Phycology. – 2017. – Vol. 29, iss. 4. – P. 1829–1840. – https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10811-017-1112-8
23. *Gorobets O. B., Blinkova L. P., Baturo A. P.* Effect of microalgae on viability of microorganisms in the natural and artificial environment // Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology. – 2001. – Iss. 1. – P. 104–108.
24. *Kallmeyer J., Smith D. C., Spivac A. J., D'Hondt S.* New cell extraction procedure applied to deep subsurface sediments // Limnology and Oceanography: Methods. – 2008. – Vol. 6, iss. 6. – P. 236–245. – https://doi.org/10.4319/lom.2008.6.236
25. *Lafarga T., Fernández-Sevilla J. M., González-López C., Acién-Fernández F. G.* Spirulina for the food and functional food industries // Food Research International. – 2020. – Vol. 137. – Art. 109356. – https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109356
26. *Lee S. S., Furman J. A.* Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton // Applied and Environmental Microbiology. – 1987. – Vol. 53, nr 6. – P. 1298–1303. – https://doi.org/10.1128/aem.53.6.1298-1303.1987
27. *Lunau M., Lemke A., Walther K., Martens-Habbena W., Simon M.* An improved method for counting bacteria from sediments and turbid environments by epifluorescence microscopy // Environmental Microbiology. – 2005. – Vol. 7, iss. 7. – P. 961–968. – https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2005.00767.x
28. *Marie D., Partensky F., Jacquet S., Vaulot D.* Enumeration and cell cycle analysis of natural populations of marine picoplankton by flow cytometry using the nucleic acid stain SYBR Green I // Applied and Environmental Microbiology. – 1997. – Vol. 63, nr 1. – P. 186–193. – https://doi.org/10.1128/aem.63.1.186-193.1997

29. *Muys M., Sui Y., Schwaiger B., Lesueur C., Vandenheuvel D., Vermeir P., Vlaeminck S. E.* High variability in nutritional value and safety of commercially available *Chlorella* and Spirulina biomass indicates the need for smart production strategies // Bioresource Technology. – 2019. – Vol. 275. – P. 247–257. – https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.059
30. *Noble R. T., Fuhrman J. A.* Use of SYBR Green I for rapid epifluorescence counts of marine viruses and bacteria // Aquatic Microbial Ecology. – 1998. – Vol. 14, iss. 2. – P. 113–118. – https://doi.org/10.3354/ame014113
31. *Qin L., Yin Z., Li Y., Tian L., Zhu L.* Exploring the way forward: current status and new upgrading trends of the research on microalgae-based wastewater treatment // Journal of Water Process Engineering. – 2024. – Vol. 64. – Art. 105581. – https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105581
32. *Shiraishi H.* Association of heterotrophic bacteria with aggregated *Arthrospira platensis* exopolysaccharides: implications in the induction of axenic cultures // Bioscience, Biotechnology and Biochemistry. – 2015. – Vol. 79, iss. 2. – P. 331-341. – https://doi.org/10.1080/09168451.2014.972333
33. *Smith V. H., Foster B. L., Grover J. P., Holt R. D., Leibold M. A., deNoyelles F.* Phytoplankton species richness scales consistently from laboratory microcosms to the world's oceans // Proceedings of the National Academy of Science of the USA. – 2005. – Vol. 102, iss. 12. – P. 4393–4396. – https://doi.org/10.1073/pnas.0500094102
34. *Strittmatter M., Guerra T., Silva J., Gachon C. M. M.* A new flagellated dispersion stage in *Paraphysoderma sedebokerense*, a pathogen of *Haematococcus pluvialis* // Journal of Applied Phycology. – 2016. – Vol. 28, iss. 3. – P. 1553–1558. – https://doi.org/10.1007/s10811-015-0700-8
35. *Wu J. F., Pond W. G.* Amino acid composition and microbial contamination of Spirulina maxima, a blue-green alga, grown on the effluent of different fermented animal wastes // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. – 1981. – Vol. 27, iss. 1. – P. 151–159. – https://doi.org/10.1007/BF01611001
36. *Zarrouk C.* Contribution a l'etude d'une cyanobacterie: influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthese de Spirulina maxima : PhD thesis. – Paris, 1966. – 138 p.
37. *Zobell C. E.* The effect of solid surfaces upon bacterial activity // Journal of Bacteriology. – 1943. – Vol. 46, no. 1. – P. 39–56. – https://doi.org/10.1128/jb.46.1.39-56.1943

ASSOCIATED MICROBIOTA OF *ARTHROSPIRA (SPIRULINA) PLATENSIS* CULTURE UNDER CHANGING LIMITING FACTORS CONDITIONS

Rylkova O. A., Doroshenko Yu. V., Lelekov A. S., Harchuk I. A.

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: a.lelekov@ibss.su

Abstract: In natural and laboratory conditions, cyanobacteria and microalgae coexist with microbial communities that can have a stimulating or inhibitory effect on the physiology, growth and development of algae cultures. To assess contamination and determine the proportion of associated microbiota in *A. platensis* culture, the quantitative composition, diversity of physiological groups and morphological structure of the bacterial association were studied at different growth phases of accumulation and flow-through cyanobacteria culture. Standard methods of *A. platensis* biomass accumulation studies, microbiological, microscopic and cytometric approaches were used in the study of associated microbiota. It was shown that the number of heterotrophs according to the data

of flow cytometry, after staining with SYBR Green fluorochrome ($0.3 \cdot 10^8$–$1.6 \cdot 10^8$ cell ml^{-1}) exceeded the data obtained by sowing on solid media ($5 \cdot 10^6$–$1.3 \cdot 10^8$ CFU ml^{-1}). The dynamics of changes in quantitative indices obtained by these methods was similar: minimum values were obtained at the exponential, maximum values at the first exponential phase of growth. Flow cytometry greatly simplified the bacterial association counting, but preliminary physicochemical sample preparation is necessary when working with *A. platensis* culture. With minimal amounts of companion bacteria, both the diversity of physiological groups and morphotypes of associated microorganisms were observed. In stationary stage I alkaliphilic microorganisms (98.8 %) represented by bacilliform bacteria of various lengths (87 %) dominated at high abundance at maximum pH (11.8). The development of other physiological groups was probably inhibited by the high alkalinity of the medium. At stationary stage II the some decrease in pH and microbiota abundance, alkaliphilic microbiota continued to dominate (82 %), but the contribution of yeasts and fungi increased (up to 16 %). Thus, the pH of the culture medium during spirulina cultivation largely determines both the abundance and diversity of the bacterial community. Despite the small contribution, the associated microflora can influence the quality of the obtained biomass of lower phototrophs during their industrial cultivation. The conducted studies allow us to give recommendations on the modes of cultivation and collection of *A. platensis* biomass.
Keywords: batch culture, productivity, bacteria, abundance, physiological groups, morphological structure

Сведения об авторах

Рылькова Ольга Александровна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, ol.rylkova@ibss-ras.ru

Дорошенко Юлия Валерьевна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, doroshenko_yuv@ibss-ras.ru

Лелеков Александр Сергеевич — доктор биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, a.lelekov@ibss.su

Харчук Ирина Алексеевна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Российская Федерация, kharchuk@ibss.su.

Поступила в редакцию 30.10.2024 г.
Принята к публикации 27.11.2024 г.

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН

УДК [581.526.4/.5:551.58](470.45) DOI: 10.21072/eco.2024.09.3.07

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ АРЧЕДИНСКО-ДОНСКИХ ПЕСКОВ

Кулик К. Д.[1], Широкова В. А.[2]

[1] *ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: kulik.k2000@gmail.com,*

[2] *ФГБУН «Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: shirocova@gmail.com*

Аннотация: В статье проведена оценка геоэкологических условий северной и восточной частей массива Арчединско-Донских песков. Сравнительный анализ фитоэкологической ситуации за 25 лет проведён с временным интервалом в два года с использованием полуавтоматической обработки данных дистанционного зондирования Земли в геоинформационных системах. Методами полевых исследований и ландшафтно-экологическим профилированием описаны два ключевых участка в границах северо-восточного сектора исследуемой территории. Описаны почвенный состав ключевых участков и видовой состав растительности, характерный для данной местности. Выявлены особенности развития растительного покрова в северной и восточной частях массива Арчединско-Донских песков. Обработан массив метеорологических и климатических данных, проведена оценка и выявление тенденций развития климата на исследуемой территории, указаны корреляции количественных метеорологических показателей с развитием растительного покрова.

Ключевые слова: песчаный массив, аридная зона, экологическая оценка, геоинформационные системы, растительный покров, ландшафтно-экологическое профилирование, вегетационные индексы

Введение

В современных условиях изменения климата значительно ускорились процессы изменения геоэкологических условий в различных экосистемах. Под такими условиями мы понимаем совокупность фитоэкологического состояния территории, метеорологические условия района исследования и их тенденции, динамику развития элементов рельефа на местности и состояние почвенных ресурсов исследуемого участка. Особую важность, как серьёзно влияющие на окружающую среду, представляют экстремальные ландшафты, аспекты и тенденции их развития. Процессы опустынивания в Волгоградской области также имеют большое значение ввиду аграрного потенциала региона: согласно сельскохозяйственной переписи 2016 года область занимает 4-е место по площади сельскохозяйственных угодий среди всех субъектов Российской Федерации [Основные итоги Всероссийской … , 2018]. Необходимо осуществлять постоянный мониторинг геоэкологических факторов, влияющих на состояние почвенных ресурсов в регионе высокой сельскохозяйственной значимости.

Арчединско-Донской песчаный массив представляет собой уникальный азональный пустынный ландшафт в степях Волгоградской области. Общая его площадь достигает 450 тыс. га. К основным особенностям данного массива относятся: фильтрационная способность, влияющая на очищение стока атмосферных осадков, а также фильтрацию стока грунтовых вод, попадающих

в Дон через исследуемый массив с прилегающих территорий, на которых ведётся сельскохозяйственная деятельность; рекреационные ресурсы уникальной аридной зоны, а также лесокультурное значение [Гаель, Смирнова, 1978]. Объектом исследования выступила северная часть массива Арчединско-Донских песков, актуальность изучения данной территории заключается в апробации методики мониторинга ключевых участков внутри общего крупного массива для детального анализа экологических условий. Другой примечательной особенностью является наличие на данном участке защитных лесных насаждений, как сплошных, так и полосных, состоящих преимущественно из сосны обыкновенной (*Pínus sylvéstris*) и ограниченно — из сосны крымской (*Pinus nigra* subsp. *pallasiana*) [Манаенков, 2018; Lihan et al., 2023].

В ходе проведения исследования в границах массива Арчединско-Донских песков был выделен северо-восточный участок площадью 640,14 км^2. Он заключён между хуторами Вилтов, Трактирским и селом Лог на юго-востоке, хутором Новая Паника на востоке, хутором Теркин на северо-западе и посёлком Арчединского Лесхоза на севере. Ближайший город — Фролово, он находится в 9 км к востоку от исследуемой территории. На севере исследуемый участок ограничен течением реки Арчеды и крупной посадкой сосны, которая протянулась на 10 км вдоль течения реки с запада на восток и имеет площадь 42,4 км^2. Ещё порядка 27,7 км^2 насаждений сосновых культур расположено внутри исследуемого массива, вдоль восточной его границы, и протяжённость их с севера на юг составляет порядка 17,4 км. Они также относятся к Арчединскому лесничеству (рис. 1).

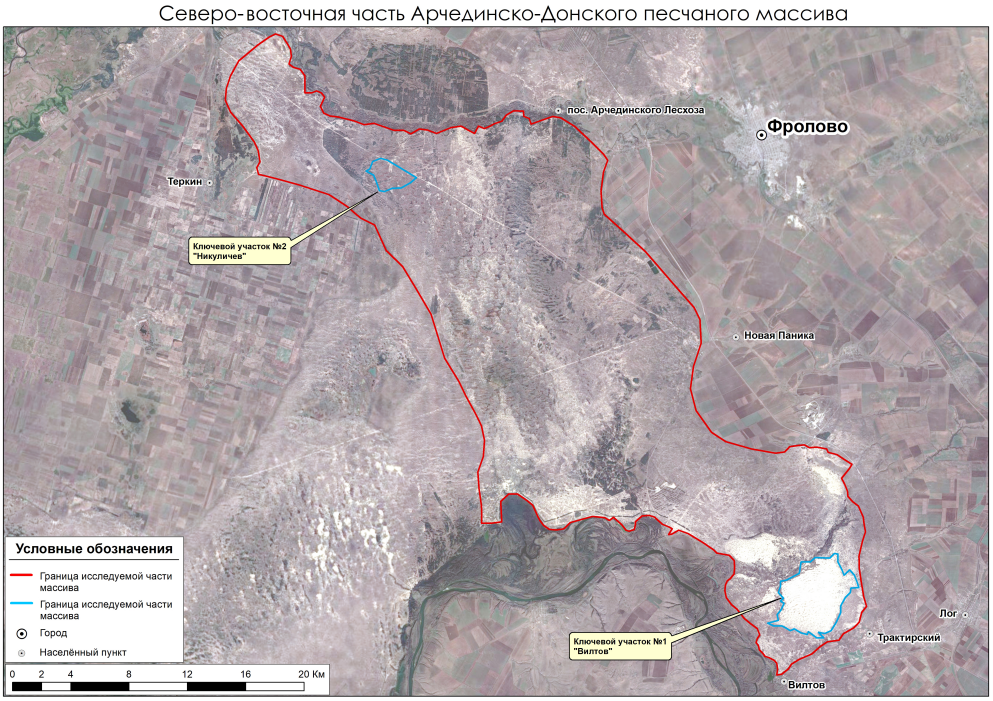

Рис. 1. Исследуемая северо-восточная часть Арчединско-Донских песков

Материалы и методы

Северо-восточная часть Арчединско-Донских песков была выбрана из-за наличия на данной территории ценных для изучения объектов, выделяющихся на общем фоне массива структурой рельефа, почвенными и фитоэкологическими условиями. На этих объектах были заложены два ключевых участка.

Исследование указанных участков Арчединско-Донских песков производилось в ходе полевых и камеральных работ весной — осенью 2024 года. На первом этапе с сайта программы EarthExplorer национальной геологической службы США были отобраны скорректированные по атмосферным условиям космоснимки второго уровня с каналами красного и инфракрасного спектров со спутников миссии Landsat (аппараты 5, 8 и 9) за период с 2000 по 2024 год с временным шагом в 2 года. Такая частота была выбрана для более точного анализа развития растительности на данной территории, так как в прошлых работах мы использовали временной интервал в 4 года — 6 лет. Под анализом развития растительности мы понимаем мониторинг и оценку общего покрытия растительных экосистем, выражаемого через площади, определяемые по вегетационному индексу. Стоит отметить отсутствие в выборке 2012 года, ввиду того что аппараты 8 и 9 были запущены после 2013 года, а Landsat 5 на тот момент уже завершил свою миссию. Использовать данные аппарата Landsat 7 не представлялось возможным из-за выхода из строя оптических приборов спутника (Scan Line Corrector) и артефактов, которые присутствуют на снимках с этого момента, перекрывая до 40 % поверхности снимка. После отбора снимков без облаков и следов песчаных взвесей от бурь, которые мешали бы проведению анализа, началась программная обработка полученного материала. Методами автоматического расчёта вегетационных и почвенных индексов модуля imagery в геоинформационной системе SAGA были получены файлы формата tiff с рассчитанными значениями NDVI (нормализованный относительный индекс растительности). Дальнейшая обработка производилась с использованием программного обеспечения ArcMap: в рамках изолинейного картографирования инструментами пространственного анализа Arctoolbox были выделены контуры со значением индекса >0,15, такое значение было выбрано для отражения общей площади растительности на исследуемой территории, для учёта как древесных форм, так и разреженной травянистой растительности. Достоверность использования такого низкого значения нормализованного вегетационного индекса была верифицирована на местности в ходе полевых изысканий. Сопоставление картографических материалов с рассчитанным NDVI с фактическим расположением растительного покрова травяных экосистем на местности дало понимание, что выделение NDVI на отметках 0,2 и 0,3 не отражает действительное положение средне- и сильнозаросших песков, где преобладающим видом растительности являются однолетние и многолетние травы. По результатам данного обследования было принято решение использовать значение 0,15 как наиболее подходящее для отображения действительной ситуации с развитием растительного покрова на выделенном участке. Было принято решение произвести отдельное оконтуривание значений NDVI >0,3, так как на указанной местности оно будет отображать куртины можжевельника казацкого *(Juníperus sabína)*, берёзу повислую (*Bétula péndula*), осину обыкновенную (*Pópulus trémula*), сосну обыкновенную (*Pínus sylvéstris)*, которая используется в данной местности для предотвращения опустынивания, и кустарники [Адамович и др., 2018].

Мониторинг погодно-климатических условий осуществлялся на основе данных с метеостанций, расположенных в трёх близлежащих городах: Фролово, Серафимовиче и Михайловке. В ходе сбора архивов из базы данных в сети Интернет были получены показатели средней температуры по месяцам и среднегодовой температуры, а также значения атмосферных осадков по месяцам и их годовая сумма. Метеорологические данные для Серафимовича и Фролово были доступны в полном объёме за весь исследуемый временной отрезок, а данные с метеостанции г. Михайловки доступны только начиная с 2012 года [Месячные и годовые … в Михайловке; Средние … в Михайловке; Месячные и годовые … в Серафимовиче; Средние … в Серафимовиче; Месячные и годовые … в Фролове; Средние … в Фролове]. Полученные данные обрабатывались с помощью ПО Excel несколькими способами. На первом этапе была создана единая диаграмма-график для трёх населённых пунктов с представлением суммы годовых осадков за все годы

исследования, графики в большой степени совпадают как по абсолютным, так и по процентным изменениям — близость городов (40–70 км) объясняет схожие метеорологические условия. На втором этапе была произведена углублённая обработка данных по атмосферным осадкам в их связи с температурами в весенний, летний и осенний сезоны. На основе этих значений в автоматическом режиме был рассчитан ежегодный гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК) для каждого населённого пункта. Данный показатель увлажнённости территории установлен советским климатологом Г. Т. Селяниновым. Определяется отношением суммы осадков (r) в миллиметрах за период со среднесуточными температурами воздуха выше 10 °С к сумме температур (∑t) за это же время, уменьшенной в 10 раз, то есть чем ниже ГТК, тем засушливее местность. Изолиния ГТК, равная 1, близка к северной границе степной зоны. Гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова используют при сельскохозяйственной оценке климата для выделения зон влагообеспеченности сельскохозяйственных культур [Сельскохозяйственный … , 1989]. С помощью ГТК выделяют следующие зоны: избыточного увлажнения или зону дренажа (ГТК >1,3), в которой количество выпадающих атмосферных осадков в среднем за многолетний период превышает величину испарения; зону обеспеченного увлажнения (1,0–1,3), где коэффициент увлажнения равен или незначительно превышает единицу, влажность почв оптимальна для большинства сельскохозяйственных культур, а дефицит увлажнения отсутствует; засушливую зону (0,7–1,0), в которой испаряемость за многолетний период уже превышает количество атмосферных осадков, к ней относят степную зону; зону сухого (0,5–0,7) или неустойчивого земледелия для возделывания растений в условиях дефицита атмосферного увлажнения почвы, оно базируется на выращивании засухоустойчивых культур и сортов, применении агротехники, способствующей накоплению, сохранению и рациональному использованию влаги [Сельское хозяйство … , 1998]; зону сухую или ирригации (ГТК <0,5), в которой возделывание растений возможно только при дополнительном орошении сельскохозяйственных угодий для ликвидации дефицита увлажнения почвы и улучшения водного режима растений.

Численность уникальных ландшафтных фаций и урочищ даже внутри одного ландшафта велика. Так, например, Арчединско-Донские пески крайне неоднородны: северная и центральная части изобилуют вымирающими колковыми лесами, которые представляют собой участки смешанного леса круглой, овальной или неправильной формы, состоящие из берёзы повислой (*Bétula péndula*), дуба черешчатого (*Quércus róbur*), осины (*Pópulus trémula*), сосны обыкновенной (*Pínus sylvéstris*); северо-восточная часть окружена защитными сосновыми насаждениями, а на юго-востоке выделяется крупный массив открытых песков. Необходимо принимать во внимание этот факт и понимать, что сплошное обследование такой территории большинством инструментов, кроме вегетационных индексов и анализа цифровых моделей рельефа, полученных со спутников, малоэффективно. В таких случаях необходимо пользоваться системой ключевых участков. Полигон представляет собой ограниченную территорию, типичную для данного региона по физико-географическим условиям, видам антропогенного воздействия и использованию природных ресурсов. По нашим представлениям, полигон должен отвечать следующим требованиям: быть надёжно опознаваем и ограничен на АКФ (аэрокосмических фотоснимках) и картах, оценён по физико-географическим и эколого-экономическим характеристикам, располагать фитоэкологическими ресурсами для создания эталонных объектов [Кулик, 2004].

При проведении полевых работ для определения геоэкологических показателей, к которым относятся видовой состав растительности, состав и состояние почвенных ресурсов, механическое нарушение ландшафтов человеческой деятельностью, использовался метод ландшафтно-экологического профилирования, который даёт комплексное представление о природных условиях на местности. Размеры профилей зависят от масштаба, тематики картографирования и применяемых для верификации местности аэрофотоснимков и космоснимков. На участке,

выбранном для профилирования, проводится тщательное и детальное изучение всех экологических компонентов, приводится список видов растительности, описывается почвенный состав, рельеф, морфоскульптуры, проводится съёмка высот геодезическим оборудованием. Важно, чтобы профиль характеризовал каждую комплексную географическую фацию с присущим ей растительным сообществом в её наиболее типичном проявлении [Методические указания … , 1985].

В ходе прохождения профилей местности производилось бурение почвы на нескольких пикетах, для этой цели использовался бур почвенный ручной скребковый (бур агронома), конструкция которого была разработана во Всероссийском НИИ агролесомелиорации [Патент № 137613]. Бур является наиболее успешным инструментом для бурения и взятия образцов почв и грунтов, включая сухие глинистые и мёрзлые отложения на конкретных глубинах. Во всех случаях бурение осуществляет один человек. Глубина бурения зависит от числа навинченных штанг. Образцы в буре хорошо просматриваются и удобны для отбора проб. Бур положительно оценили: Почвенный институт им. В. В. Докучаева, Центр агрохимической службы «Волгоградский», Волжский НИИ орошаемого земледелия, Институт сельского хозяйства Центрально-Чернозёмной полосы и др. Бур стальной, цилиндрический, двухлопастной, диаметр 6,3 см, высота 18 см, комплектуется со стальными или дюралевыми трубчатыми штангами длиной 140 см [Беляев, Плескачёв, Пугачёва, 2019].

На первом ключевом участке «Вилтов» предметом исследования выступает массив преимущественно открытых песков, расположенный к юго-востоку от балки Паницкой и к северу от хуторов Вилтов и Трактирского на левом берегу Дона (рис. 2).

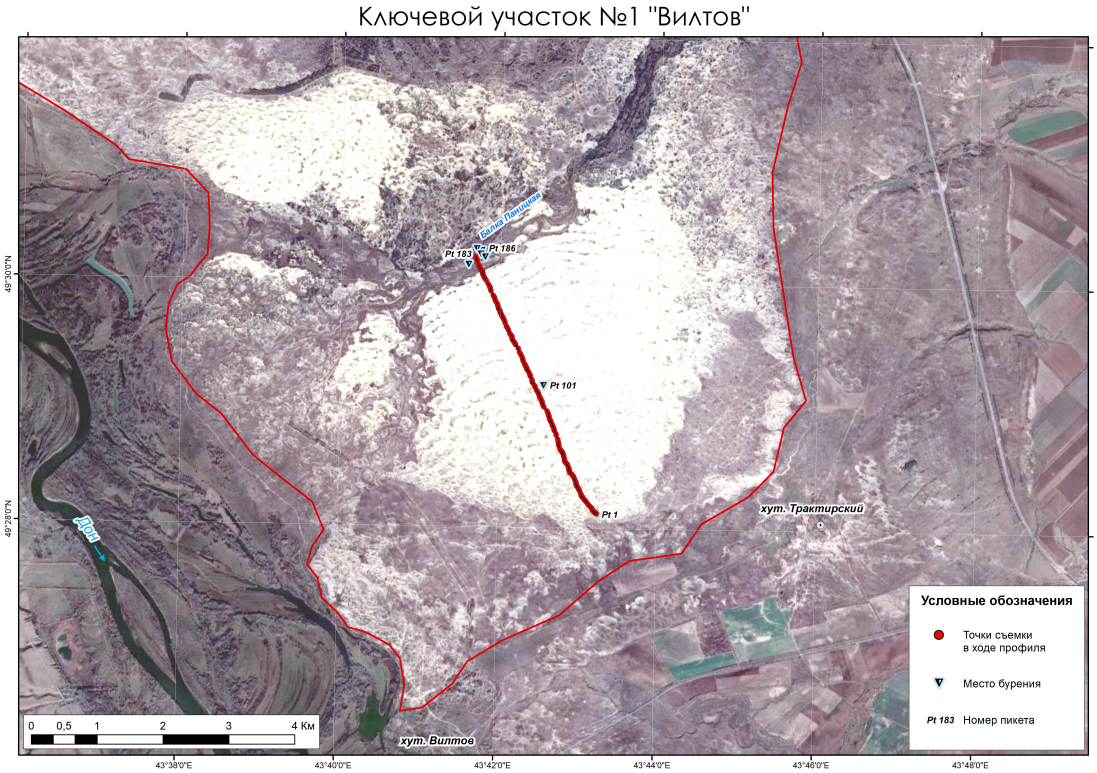

Рис. 2. Ключевой участок № 1 «Вилтов» с ходом профиля

Классификация песков на данной местности проводится на основании их геоморфологических и фитоэкологических показателей. По морфоструктуре здесь мы выделяем грядовые пески, расположенные продольно в юго-западном направлении, с грядами протяжённостью 300–1800 м. Бугристые пески подразделяем по размеру бугров на крупные (150–200 м) и средние (20–50 м).

К пологобугристым относятся разбитые пески различной протяжённости (от 10 до 150 м) с пологими склонами. По степени покрытия растительностью выделяют пески: незаросшие (разбитые), на которых имеются единичные растения или небольшие куртины, занимающие до 10 % площади; слабозаросшие, с частыми очагами дефляции, покрытие растительностью на 10–30 %; среднезаросшие, с единичными очагами дефляции, растительностью занято 30–50 % площади; заросшие, без очагов дефляции, с покрытием растительностью более 50 % площади [Справочник агролесомелиоратора, 1984]. Дешифрирование космоснимков производится по прямым дешифровочным признакам, к которым относятся форма, рисунок, размер, тон (цвет), тень изображения объектов. Большое значение при дешифрировании объектов имеет рисунок фотоизображения. Например, для песков волнистый, ячеистый, зернистый рисунки свидетельствуют о грядовом, барханном, бугристом рельефах соответственно [Кулик, 2004].

Ключевой участок заложен на грядовых, незаросших и слабозаросших, а также бугристых, разной степени заращенности песках. Космические снимки позволяют выделить здесь участки современных грядовых, преимущественно лишённых почвенно-растительного покрова и пологобугристых заросших песков. Также выделены крупно- и среднебугристые незаросшие, обарханенные, с отдельными куртинами можжевельника; среднебугристые средне- и слабозаросшие; среднебугристые заросшие; пологобугристые заросшие, обрамляющие юго-восточную часть массива, а также крупно- и среднебугристые, заросшие можжевельником. Почвы на этом участке примитивные песчаные, они являются следствием слабого зарастания открытых песков в естественном состоянии.

Второй ключевой участок «Никуличев» расположен в северной части массива, в 7 км к юго-востоку от одноимённого хутора, в 12 км к юго-западу от посёлка Арчединского Лесхоза. Данный участок характеризуется заросшими песками, большим числом деградирующих колковых лесов и среднебугристым рельефом.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты по рассчитанному нормализованному вегетационному индексу свидетельствуют об увеличении площади, занятой растительностью различных форм, на территории исследуемого массива за последние 25 лет. По контуру со значением NDVI >0,15 мы получили диаграмму динамики растительности с трендовой линией, демонстрирующей устойчивый рост данного показателя (рис. 3).

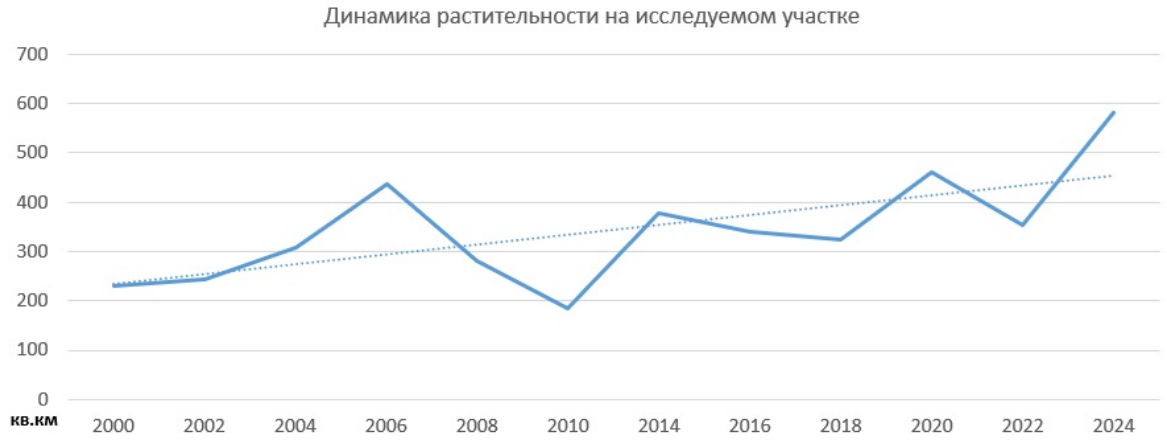

Рис. 3. Динамика площади растительности, оконтуренной по NDVI 0,15

Стоит отметить, что с 2010 года в периоды сокращения растительного покрова значения площадей растительности не падали ниже предыдущих минимумов. Минимальные значения в этот период составили 184,36 км^2 в 2010 г., а максимальные — 581,25 км^2 в 2024 г. Так, в 2010 году площадь растительного покрова составляла 184,36 км^2, а в период спада 2018 года она была больше — 323,27 км^2. В 2022 году, в котором произошло уменьшение площадей растительного покрова относительно 2020 года, площадь, занимаемая растительностью, была больше значений 2018 г. и составила 353 км^2. Таким образом, начиная с 2010 г. тренд является резко восходящим, что позволяет прогнозировать дальнейшее зарастание песков. Заметно резкое увеличение показателей NDVI в 2024 году: площадь, занятая растительностью, составила 581,25 км^2, что составляет 90,8 % площади выделенного северо-восточного участка Арчедино-Донских песков, рост к предыдущему временному отрезку в 2024 году составил 64,49 %. Мы связываем данное увеличение заросших площадей песков с практически рекордными атмосферными осадками июня (месяца, когда было отобрано наибольшее количество снимков): во Фролово — 97 мм, в Серафимовиче — 96 мм, в Михайловке — 61 мм.

На графике оконтуренных значений NDVI >0,3 мы выделяем 3 периода: A, B и C (рис. 4).

Рис. 4. Динамика площади растительности, оконтуренной по NDVI 0,3

В первый период, с 2000 до 2010 года, древесно-кустарниковая растительность занимает площадь от 20 до 53 км^2, максимальные значения за этот временной промежуток наблюдаются в 2004 и 2006 годах, что коррелирует с метеорологическими показателями, наблюдавшимися в первые 5 лет в двух близлежащих городах — Серафимовиче и Фролово. В 2004 году годовые осадки в первом городе составили 549 мм, в 2005 — 530 мм, что на 71–90 мм больше, чем в среднем за последние 24 года (рис. 5).

Во Фролово в 2004 году годовое количество осадков составило 526 мм, что на 66 мм больше среднегодового значения за последние 25 лет, а в 2005 и 2006 годах значения были близки к среднегодовым. Сокращение оконтуренных площадей в 2008 и 2010 годах коррелирует с уменьшением количества среднегодовых осадков, которое пришлось на период 2008–2012 годов. Так, в указанный временной отрезок во Фролово и Серафимовиче уровень атмосферных осадков держался на отметках менее 400 мм (кроме 2010 и 2011 годов в Серафимовиче, когда в первом случае осадки составили 440 мм, а во втором едва перешли границу 400 мм) при средних значениях в этих городах, составляющих 460 и 459 мм соответственно.

Второй выделяемый период — с 2014 по 2022 год, характеризующийся увеличением площадей относительно предыдущего этапа для контуров со значением 0,3. Растительность стала занимать в эти годы от 40 до 63 км^2, однако изменения площадей год от года были стабильными, без резких скачков. Мы связываем данные показатели с постепенным ростом осадков от 460–510 мм в 2013 году до 570–590 мм во всех анализируемых городах в 2016 году; тренд за временной промежуток 2012–2019 гг. — восходящий, сокращение площадей в 2020 году коррелирует с наименьшим количеством осадков в этом году за период исследования во всех трёх

Рис. 5. Среднегодовые осадки в трёх городах

городах. Третий этап развития растительности приурочен к 2022–2024 годам и примечателен резким ростом площадей в 2024 году — до 98,68 км^2. Как и в случае с травянистой растительностью, мы связываем данное увеличение заросших площадей песков с высокими значениями атмосферных осадков июня этого года.

На территории Фролово ГТК Селянинова демонстрирует тенденцию к уменьшению влагообеспеченности окрестностей за последние 25 лет. Полиномиальная трендовая и скользящее среднее коэффициента подтверждают его постепенное уменьшение: трендовые максимумы 1999 года так и не были превышены за последующие годы, а низкие значения 2010 года оказались обновлёнными в 2024. Распределение годов по разным зонам произошло почти поровну: 8 раз коэффициент был <0,5, соответствуя зоне ирригации; 7 раз — в диапазоне 0,5–0,7, соответствуя зоне сухого земледелия; в девяти случаях оказался в диапазоне 0,7–1,0, то есть в засушливой зоне; 2 раза, в 2000 и 2016 годах, коэффициент превысил 1,0, соответствуя зоне обеспеченного увлажнения (рис. 6).

На территории Серафимовича ГТК Селянинова демонстрирует стабильные значения на протяжении 23 лет, тренд незначительно направлен на снижение, во многом за счёт низких значений атмосферных осадков 2024 года. Распределение по зонам также равномерное: 7 лет — в ирригационной зоне, 7 лет — в зоне сухого земледелия, 8 — в засушливой зоне и два года, 2016 и 2021, — в зоне с обеспеченным увлажнением (рис. 7).

Коэффициент увлажнённости для Михайловки отличается не только меньшей выборкой по годам, но и трендовой, демонстрирующей рост на 0,06 ед. за 12 лет. Практически половина временного отрезка относится к зоне ирригации: 5 раз коэффициент был ниже значения 0,5, 4 года — в зоне сухого земледелия, 2 раза — в засушливой зоне и единожды, в 2016 году, показал влагообеспеченность (рис. 8).

Ландшафтно-экологический инструментальный профиль на первом ключевом участке имеет протяжённость 4400 м, проложен в направлении юго-восток — северо-запад последовательно через среднебугристые заросшие, среднебугристые средне- и слабозаросшие, современные грядовые незаросшие пески с окончанием в долине балки Паницкой и пересекает вторую надпойменную террасу Дона.

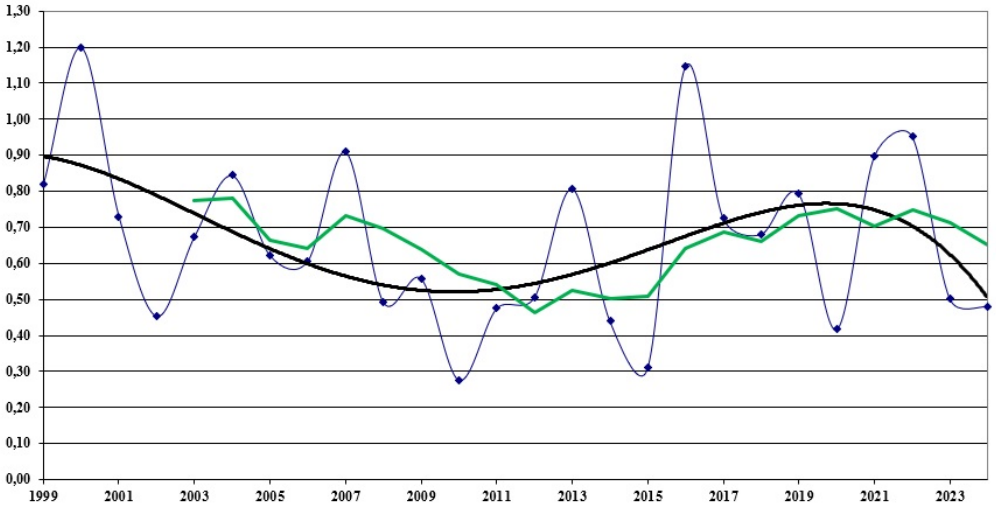

Рис. 6. ГТК Селянинова (по метеорологическим данным во Фролово)

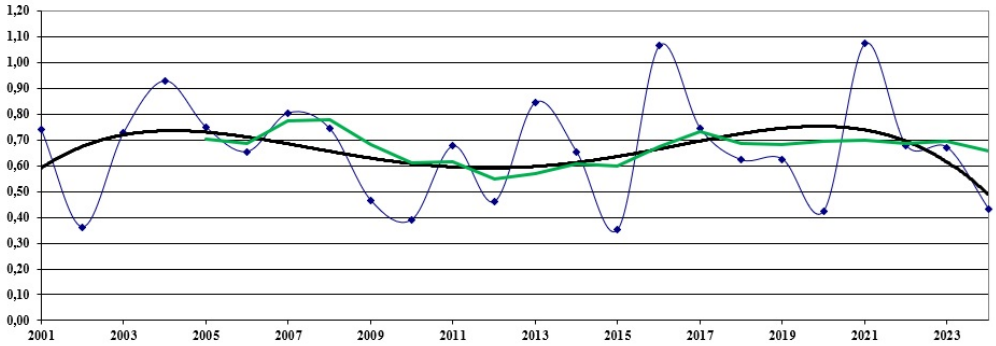

Рис. 7. ГТК Селянинова (по метеорологическим данным в Серафимовиче)

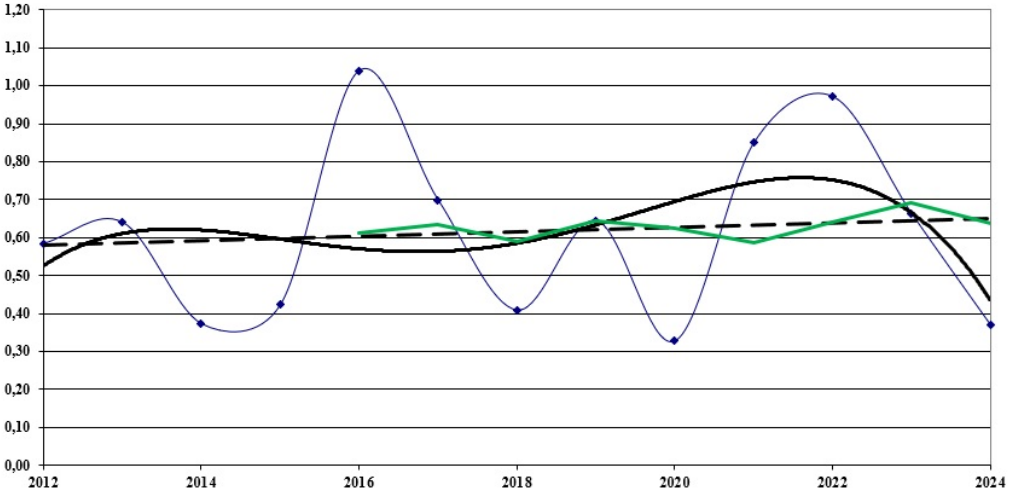

Рис. 8. ГТК Селянинова (по метеорологическим данным в Михайловке)

На протяжении первых 120 м рельеф спокойный, перепады высот между буграми составляют не более 2,5 м, в целом участок длиной 1090 м в первой части профиля характеризуется перепадами высот не более 5 м. Участок рельефа от отметки 300 до 2120 м характеризуется плавным повышением средней высоты местности относительно уровня моря: от 55,5 до 66 м в начале и в конце обозначенного участка соответственно. В центральной части профиля, на отметке 2120 м, относительная высота достигает 69,15 м, что делает данный участок массива самой высокой его частью. С этих же отметок начинаются современные грядовые формы незаросших песков. Вторая половина профиля расположена в диапазоне высот от 60 (в межгрядовых понижениях) до 69 м (на вершинах гряд и отдельных кочках), в то время как первая, бугристая, часть инструментального профиля расположена в диапазоне высот от 54 до 63 м. Оканчивается профиль в долине балки Паницкой, которая имеет протяжённость 200–600 м в границах ключевого участка. Она характеризуется пологим рельефом с минимальными перепадами высот, почвы песчаные, заросшие (рис. 9).

Рис. 9. Продольный профиль рельефа на ключевом участке № 1 «Вилтов»

По всей площади долины, которая расположена на равнинном участке и простирается от русла балки на 60–250 метров к северо-западу и 80–400 метров к юго-востоку (до открытых песков), размещены крупные куртины можжевельника казацкого, достигающие от 6 до 16 м в диаметре. Дно балки устлано песчаниками, которые подверглись процессу известкования и серьёзно окаменели, данный процесс происходит, когда песчаники становятся естественным препятствием на пути потока воды, на момент обследования вода на дне русла отсутствовала. В ходе полевых изысканий был описан видовой состав растительности на участке: цмин песчаный (*Helichrýsum arenárium*), овёс песчаный (*Avéna strigósa*), ракитник русский (*Chamaecýtisus ruthénicus*), ковыль перистый (*Stípa pennáta*), тысячелистник мелкоцветковый (*Achillea micrantha*), полынь полевая (*Artemísia campéstris*), ясменник пахучий (*Asperula graveolens*), можжевельник казацкий (*Juníperus sabína*), в межбугровых понижениях встречаются различные мхи.

В ходе прокладывания геоэкологического профиля были пробурены 5 скважин: 4 — в долине балки Паницкой и одна — на пикете № 101, на отметке 2180 м. Первая, вторая и третья скважины были пробурены в самых низких точках обследуемого участка — на дне балки Паницкой. На первой и второй скважинах, приуроченных к пикетам 183 и 184 (расстояния между точками на местности — 2 м), максимальная глубина бурения составила 50 см: на этой отметке бур застопорился о крайне прочные известкованные песчаники и дальнейшее прохождение не представлялось возможным. Третье бурение производилось также в русле балки, на расстоянии 51 м к югу от точки 184, бур наткнулся на известкованный песчаник на глубине 25 см. Четвёртое бурение было заложено на равнинной части долины и конуса выноса, на расстоянии 20 м к юго-востоку

от русла балки, ситуация оказалась идентичной предыдущим бурениям, и на глубине 225 см бур наткнулся на песчаники без возможности пройти дальше. Пятая скважина была пробурена на открытых песках в межгрядовом понижении, где на глубине 290 см в очередной раз было встречено непроходимое препятствие в виде камней.

На втором ключевом участке проложен ландшафтно-экологический профиль протяжённостью 1120 м, было снято 57 точек, приуроченных к границам колковых лесов, их центральным частям, выраженным перепадами высот на местности и местами произрастания древесных форм растительности. В трёх колках из пяти грунтовые воды находились на поверхности, создавая заболоченную местность с обилием сгнившей осоки и тростником; в колке № 5 грунтовые воды залегали близко к поверхности, на глубине 38–40 см. Для сравнительного анализа была пробурена скважина в 40-й точке, расположенной на пологом спуске, в 25 метрах от грунтовой песчаной дороги и 15 м от начала колки № 5. Глубина залегания грунтовых вод в данной точке составила 183 см (рис. 10).

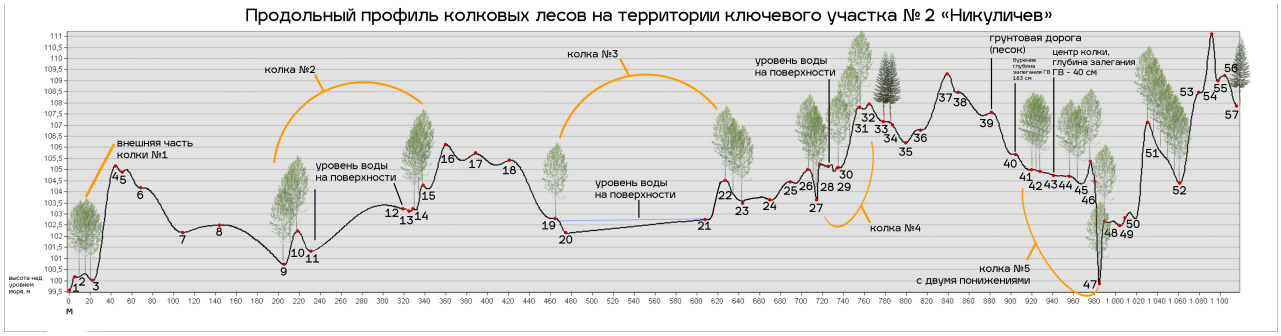

Рис. 10. Продольный профиль на ключевом участке № 2 «Никуличев»

Растительность в данной части Арчединско-Донских песков представлена берёзой, сосной обыкновенной (*Pínus sylvéstris)*, ракитником русским (*Chamaecýtisus ruthénicus*), осокой микели (*Carex michelii*), ковылём перистым (*Stípa pennáta*), тростником (*Phragmítes austrális*), типчаком (*Festúca valesiáca*), цмином песчаным (*Helichrýsum arenárium*). В центральных частях колок, в межбугровых понижениях, можно отметить смену лесного фитоценоза на болотно-луговой, с гниющими остовами осоки.

В ходе обсуждения результатов полевых работ была обозначена необходимость углублённого изучения следующих геоэкологических факторов для исследуемой территории: лесопригодность почв Арчединско-Донских песков, бонитет лесных насаждений — таксационная оценка потенциальной продуктивности и скорости роста древесной растительности.

Заключение и выводы

По результатам обработки космических снимков нормализованным дифференцированным вегетационным индексом можно сделать вывод о положительной динамике растительности в северо-восточной части Арчединско-Донских песков.

Стоит отметить чётко различимые контуры границ колковых массивов, не претерпевающих существенных изменений год от года. Древесная растительность на втором ключевом участке и в идентичных биоценозах его окрестностей вымокает достаточно медленно, так как на многих участках деревья остались только на склонах бугров, где уровень грунтовых вод не поднимается настолько близко к корневой системе. Также описываемые виды (берёза, осина) не могут

за несколько лет дать прирост зелёной массы такого порядка, какой имеется при сравнении площадей по значению NDVI 0,3. На основании изложенного мы приходим к заключению, что с небольшим временным шагом (2–3 года) между этапами исследования в аридных зонах значение индекса 0,3 отражает в первую очередь развитие кустарников и травянистых экосистем. На ключевом участке «Никуличев» такими зонами служат внутренние территории вымокших колок, образующие болотно-луговые фитоценозы и сильнозаросшие пески пастбищного типа на межбугровых равнинах и песчаных грядах. Данное положение также верифицируется при дешифрировании космоснимков северо-восточной части Арчединско-Донских песков в видимом спектре.

По метеорологическим условиям мы в первую очередь выделяем 2016 год, как наиболее влагообеспеченный по рассчитанному коэффициенту гидротермического увлажнения Селянинова и третий за период исследования по абсолютным значениям атмосферных осадков. Также климатически обращают на себя внимание 2001, 2007 и 2021, как годы с наибольшими осадками. Тем не менее суммарный тренд различных метрик климатических условий указывает на уменьшение влагообеспеченности и стагнацию абсолютных значений атмосферных осадков в годовом выражении.

Полевое обследование ключевых участков позволило уточнить такие геоэкологические условия, как состояние растительных экосистем, климатические и метеорологические условия последних 25 лет в исследуемом массиве. Первый участок «Вилтов» сохранил своё видовое разнообразие и геоморфологию с момента последнего крупного исследования данной территории в 1990-е годы [Кулик, 2004], тем не менее был обнаружен факт известкования песчаников на дне балки Паницкой, в её долине и конусе выноса. Данное открытие требует дальнейших полевых изысканий и построения сетки скважин для определения границ распространения этого явления. Второй участок — «Никуличев» — остановился в деградации колковых лесов, так как остовы берёзы располагаются на склонах бугров, где расстояние до грунтовых вод уже не вызывает их вымокания. В центральных частях большинства колок на поверхности присутствует вода, что вызывает образование здесь, на заросших песках, болотно-лугового фитоценоза.

Список литературы

1. *Адамович Т. А., Кантор Г. Я., Ашихмина Т. Я., Савиных В. П.* Анализ сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории государственного природного заповедника «Нургуш» // Теоретическая и прикладная экология. – 2018. – № 1. – С. 18–24.
2. *Беляев А. И., Плескачёв Ю. Н., Пугачёва А. М.* Каталог основных завершенных научных инновационных разработок, предлагаемых к внедрению. – Волгоград : ФНЦ агроэкологии РАН, 2019. – 80 с.
3. *Гаель А. Г., Смирнова Л. Ф.* «Извечно» развеваемые пески в донских степях // Геоморфология. – 1978. – № 1. – С. 36–45.
4. *Кулик К. Н.* Агролесомелиоративное картографирование и фитоэкологическая оценка аридных ландшафтов / Всерос. науч.-исслед. агролесомелиорат. ин-т. – Волгоград : ВНИАЛМИ, 2004. – 247 с.
5. *Манаенков А. С.* Лесомелиорация арен засушливой зоны. – Волгоград : ФНЦ агроэкологии РАН, 2018. – 428 с.

6. Месячные и годовые суммы выпавших осадков в Михайловке // Погода и климат : справ.-информ. портал. – URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/34352_2.htm (дата обращения: 02.11.24).
7. Месячные и годовые суммы выпавших осадков в Серафимовиче // Погода и климат : справ.-информ. портал. – URL: http://pogodaiklimat.ru/history/34357_2.htm (дата обращения: 02.11.24).
8. Месячные и годовые суммы выпавших осадков в Фролове // Погода и климат : справ.-информ. портал. – URL: http://pogodaiklimat.ru/history/34356_2.htm (дата обращения: 02.11.24).
9. Методические указания по изысканиям и проектированию мероприятий комплексного освоения песков юга и юго-востока Европейской части СССР / под общ. ред. В. Н. Виноградова, В. Н. Тарасюка. – Москва : ВАСХНИЛ, 1985. – 78 с.
10. Основные итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года по субъектам Российской Федерации / Федерал. служба гос. статистики ; редкол.: К. Э. Лайкам [и др.] – Москва : Статистика России, 2018. – 711 с. – (Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года ; т. 1, кн. 2).
11. Патент № 137613 Российская Федерация, МПК G01N 1/04 (2006.01). Бур почвенный ручной скребковый : № 2013116868/05 : заявл. 12.04.2013 : опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5 / Н. Ф. Кулик ; патентообладатель Н. Ф. Кулик.
12. Сельское хозяйство. Большой энциклопедический словарь / гл. ред. В. К. Месяц. – 2-е изд., репринт. – Москва : Большая рос. энцикл., 1998. – С. 529.
13. Сельскохозяйственный энциклопедический словарь / редкол.: В. К. Месяц [и др.]. – Москва : Сов. энцикл., 1989. – С. 490.
14. Справочник агролесомелиоратора / под ред. Г. Я. Маттиса [и др.]. – Москва : Лесн. пром-сть, 1984. – 248 с.
15. Средние месячные и годовые температуры воздуха в Михайловке // Погода и климат : справ.-информ. портал. – URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/34352.htm (дата обращения: 02.11.24).
16. Средние месячные и годовые температуры воздуха в Серафимовиче // Погода и климат : справ.-информ. портал. – URL: http://pogodaiklimat.ru/history/34357.htm (дата обращения: 02.11.24).
17. Средние месячные и годовые температуры воздуха в Фролове // Погода и климат : справ.-информ. портал. – URL: http://pogodaiklimat.ru/history/34356.htm (дата обращения: 02.11.24).
18. *Lihan C., Zhen S., Yuexin L., Chaoyue Y., Qingling L., Zhonghao Z., Yang G., Tiantian N.* Identification of driving forces for windbreak and sand fixation services in semiarid and arid areas: A case of Inner Mongolia, China // Progress in Physical Geography: Earth and Environment. – 2023. – Vol. 47, iss. 1. – P. 32–49. – https://doi.org/10.1177/03091333221105403

GEOECOLOGICAL CONDITIONS OF THE NORTH-EASTERN PART OF THE ARCHEDINSKO-DON SANDS

Kulik K. D.[1], Shirokova V. A.[2]

[1] *Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «State University of Land Use Planning», Moscow, Russian Federation, e-mail: kulik.k2000@gmail.com,*

[2] *Federal State Budgetary Scientific Institution «S. I. Vavilov Institute of the History of Natural Science and Technology of the RAS», Moscow, Russian Federation, e-mail: shirocova@gmail.com*

Abstract: The article assesses the geoecological conditions of the northern and eastern parts of the Archedinsko-Donskie Sands massif. A comparative analysis of the phytoecological situation for 25 years was carried out with a time interval of two years using semi-automated processing of remote sensing data in geographic information systems. Two key areas within the boundaries of the northeastern sector of the study area were described using field research methods and landscape-ecological profiling. The soil composition of the key areas and the species composition of the vegetation typical for this area were described. The features of the development of the vegetation cover in the northern and eastern parts of the Archedinsko-Donskie Sands massif were revealed. An array of meteorological and climatic data was processed, an assessment and identification of climate development trends in the study area were carried out, and correlations of quantitative meteorological indicators with the development of the vegetation cover were indicated.

Keywords: sand massif, arid zone, ecological assessment, geoinformation systems, vegetation cover, landscape-ecological profiling, vegetation indices

Сведения об авторах

Кулик Константин Дмитриевич	аспирант ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству», ул. Казакова, 15, Москва, 105064, Российская Федерация, kulik.k2000@gmail.com
Широкова Вера Александровна	доктор географических наук, профессор, руководитель отдела истории наук о Земле ФГБУН «Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН», ул. Балтийская, 14, Москва, 125315, Российская Федерация, shirocova@gmail.com

Поступила в редакцию 05.12.2024 г.
Принята к публикации 13.12.2024 г.

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

Свидетельство о регистрации средства 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 № 13 от 19.12.2024 г.).

Фото на обложке: Морфологические группы микроорганизмов, сопутствующих культуре *A. platensis* на стадии стационара (по данным СЭМ, увеличение ×4000, микроскоп Hitachi SU3500 (Япония)).

Подписано к печати: 18.02.2025 г.
Дата выхода: 20.02.2025 г.
Формат 60x84/8 Усл. печ. л. 10,9 Тираж: 100 экз.

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

Распространяется бесплатно

ISSN 2949-4583