

DOI: 10.37279/2309-7663-2020-6-4-154-169

УДК 911.3

Т. В. Панкеева¹,
Н. В. Миронова²,
Б. А. Новиков³

Опыт картографирования донной растительности (на примере бухты Ласпи, Чёрное море)

^{1,2}ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,

г. Севастополь, Российская Федерация

³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

г. Севастополь, Российская Федерация

e-mail: ¹tatyapankeeva@yandex.ru,

²dr.nataliya.mironova@yandex.ru, ³bober996@mail.ru

Аннотация. В статье показана возможность применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для картографирования донной растительности в прибрежной зоне моря, что позволяет оперативно и точно получать информацию о её пространственном распределении. Для картографирования макрофитобентоса в качестве модельного полигона выбрана бухта Ласпи. Бухта отличается биологическим разнообразием, обилием уникальных местообитаний донной растительности, где представлены сообщества морских трав и водорослей. В бухте проведены гидробиологические исследования и аэрофотосъёмка, выполненная при помощи БПЛА. На основе аэрофотосъёмки выделены границы распространения макрофитобентоса, тогда как его состав и структура фитоценозов определены по результатам гидробиологического изучения. Составлена карта распределения фитобентоса в бухте Ласпи. Показаны пространственные закономерности распределения доминирующих видов макрофитов (виды цистозиры, филофора курчавая, взморник морской и взморник Нольта) и даны их количественные характеристики.

Ключевые слова: донная растительность, беспилотный летательный аппарат, ортофотоплан, бухта Ласпи, Чёрное море.

Введение

В современных условиях состояние макрофитобентоса ухудшается вдоль всего черноморского побережья, изменяются его количественные характеристики и видовой состав, вследствие интенсивного развития различных типов природопользования в приморской зоне и морской акватории [1, 2]. В связи с этим, приобретают актуальность разработка и применение современных технологий в изучении пространственного распределения донной растительности. С появлением различных моделей радиоуправляемых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и по мере совершенствования программного обеспечения возрастает интерес к использованию качественных детальных аэрофотоснимков высокого разрешения как, в целом, для морских исследований, так и, в частности, для изучения макрофитов. Однако работ, посвященных картографированию донной растительности с использованием дистанционных методов, в том числе

для прибрежной зоны Чёрного моря, мало. К. М. Петровым (1989) [3] разработана методика применения аэрофотометодов к картографированию прибрежных ландшафтов и донных сообществ. Аэрофотоснимки используют для оценки запасов промысловых водорослей и морских трав [4]. В последние годы предприняты попытки применения космических методов в изучении фитобентоса. Например, на основе спутниковых фотоснимков успешно проведено исследование и картографирование макрофитобентоса коралловых рифов Австралии [5]. По материалам фотосъёмки, полученным при помощи БПЛА, выполнено комплексное картографирование прибрежной зоны литорали Карельского берега Белого моря [6]. На основе аэрофотосъёмки, выполненной с помощью БПЛА, разработана методика и создана карта высшей водной растительности Ореховатских прудов (г. Киев, Украина) [7]. В Чёрном море, при помощи БПЛА и стандартной гидрботанической съёмки, изучено пространственное распространение макрофитобентоса и составлена карта донной растительности бухты Круглая (г. Севастополь) [8].

В качестве модельного полигона исследования выбрана бухта Ласпи, которая расположена в юго-западной части Крымского полуострова между мысами Айя и Сарыч. Макрофитобентос, встречающийся в бухте, ранее был достаточно полно изучен на видовом [9, 10] и фитоценотическом [11] уровнях, дана оценка его ресурсного потенциала [12], приведены характеристики эколого-таксономического состава водорослей [13]. В статьях всех авторов показано, что в бухте Ласпи представлены фитоценозы цистозиры, филлофоры и зостеры, обладающие высоким охранным статусом как на государственном, так и международном уровнях. Таким образом, своеобразие донной растительности и её изученность обусловили выбор бухты Ласпи для картографирования макрофитобентоса с применением БПЛА и использованием ГИС-технологий в сочетании с гидрботаническими исследованиями.

Цель статьи состоит в картографировании и анализе пространственного распределения макрофитобентоса в бухте Ласпи.

Материалы и методы исследования

Для картографирования макрофитобентоса бухты Ласпи использованы материалы, полученные в ходе аэрофотосъёмки (летний период 2019 г) и гидрботанических исследований (2016–2019 гг.). Методика картографирования донной растительности включает следующие этапы [8]:

1 этап. Организация и проведение аэрофотосъёмки акватории. Аэрофотосъёмка акватории (0,54 км²) выполнена при помощи БПЛА *DJI Phantom 4 Advanced*. Квадрокоптер оснащён видеокамерой высокого разрешения (20 Мп) на гиростабилизированном подвесе, обеспечивающем стабильную ориентацию камеры, независимо от наклонов аппарата при манёврах или под воздействием ветра, и навигационным оборудованием (приёмником GPS).

Для формата фотографий выбран максимальный размер (соотношение сторон 16:9, с разрешением 5472 x 3078 пикселей). Съёмку бухты выполняли с высоты 100 м при скорости полета квадрокоптера 5 м·с⁻¹. Полёт дрона проходил в ручном режиме, контроль перекрытия осуществлялся с помощью выставления фиксированного интервала снимков в 2 секунды. Съёмку проводили при нулевой облачности с 12 до 13 часов. Эффективное время полёта составляло 8 минут. В

результате проведённой работы получено 198 снимков с разрешением в 2 см пиксель⁻¹. Снимки делали во время всего полёта аппарата при положении камеры строго в надир. При склеивании снимков продольное перекрытие составляло 70%, поперечное — 35-50%. Для фототопографической обработки снимков, на основе данных величин, рассчитано поперечное перекрытие в метрах на местности, которое составляет 90-153 м и продольное перекрытие — 350 м. Данные значения получены с учётом того, что один снимок в надир с высоты 150 м покрывает в плане условно прямоугольную зону размером 400 на 260 м. Полученные размеры вычислены методом подсчёта пикселей и их соотношением к расстоянию в реальности. Дальность полёта квадрокоптера составляла 1500–1600 м, что обусловлено отсутствием доступа (ограничение со стороны производителя) к радиоканалу на частоте 5 ГГц и помехами, вызванными сторонней аппаратурой. Тем не менее, данного расстояния хватило для охвата всей акватории бухты за один полёт, во время которого аппарат находился в воздухе 14 минут.

2 этап. Дешифрирование аэрофотоснимков. Обработку снимков производили в программе *Agisoft Metashape* (PhotoScan). После склейки снимков, ортофотоплан экспортирован в программу *QGIS*, в котором он был привязан по опорным точкам на берегу с известными координатами в системе СК-63 зоне X4, полученных с помощью GNSS приёмника *Geotax 25* с точностью до 0,2 см·м⁻². Таким образом, получен геопривязанный ортофотоплан в системе координат «СК-63 зона X4» (рис. 1).

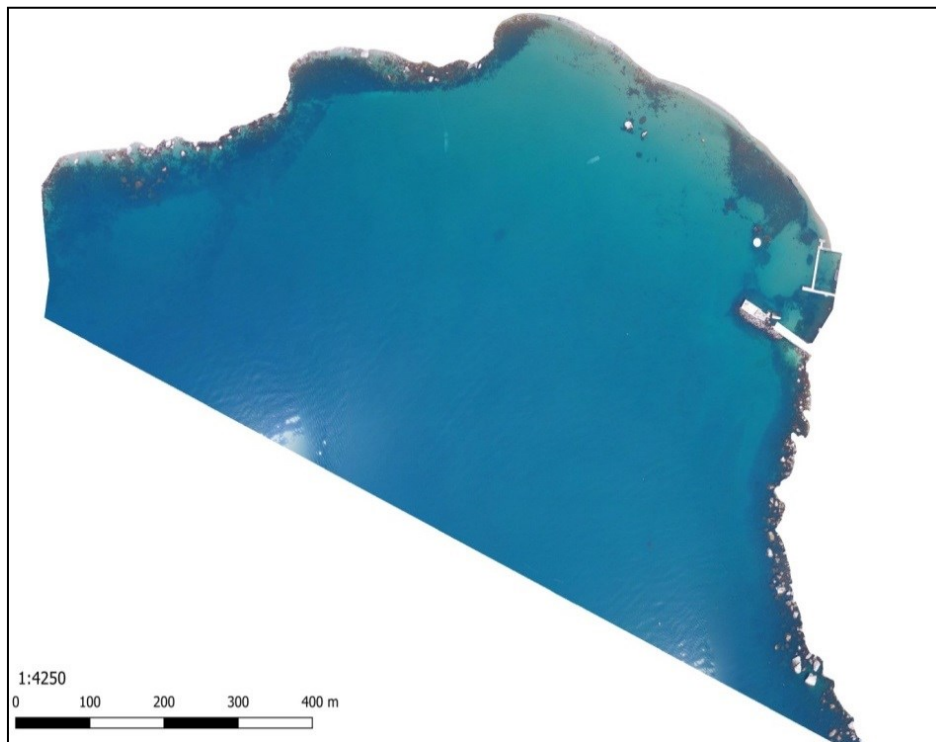


Рис. 1. Ортофотоплан бухты Ласпи, выполненный по аэрофотоснимкам, полученным с помощью БПЛА (квадрокоптер *DJI Phantom 4 Advanced*.)

Экспортированный файл в формате TIFF имел разрешение 22 714 на 24 084 пикселей и занимал более 2 Гб, что в случае дешифрирования могло

привести к большим временным затратам. Разрешение ортофотоплана уменьшено вручную до значения 7 680 на 4 320 пикселей. Для полуавтоматического дешифрирования использовали уменьшенный в размере файл, а исходный служил для последующего уточнения и корректировки результатов дешифрирования. На этом этапе использовали плагин для QGIS версии 2.18.12 “*Semi-automatic classification plugin*”, изначально предназначенный для дешифрирования космоснимков, полученных со спутников *Landsat-3* и *Sentinel*. В дальнейшем плагин позволил разделить снимок на три активных цветовых диапазона (красный, зеленый и синий). Для минимизации погрешностей, создаваемой толщиной воды, произведена замена синего диапазона зелёным и получена цветопара, состоящая из изображения в красном, зелёном и еще раз в зелёном цветовом диапазоне. Создан виртуальный растр, на котором выделены «примеры» блоков пикселей, что позволило плагину в автоматическом режиме выделить похожие блоки. Векторизация и последующая классификация полученных данных позволила выделить в отдельный векторный слой контуры границ распространения донной растительности в бухте Ласпи (рис. 2).

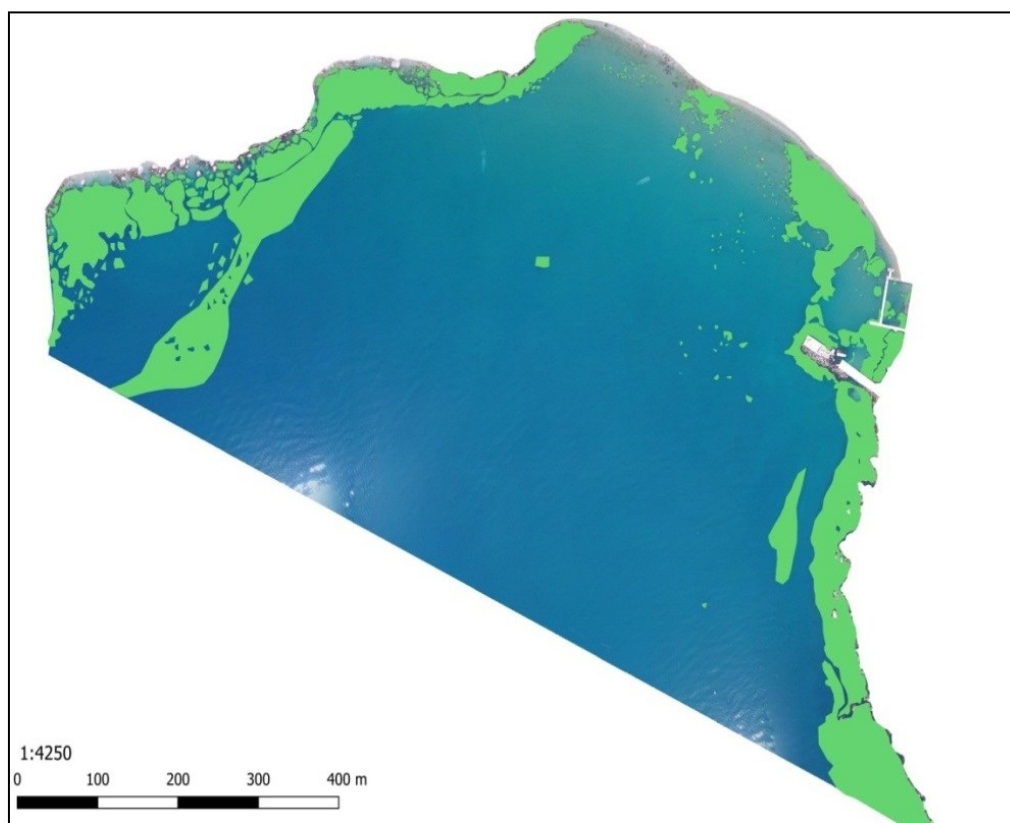


Рис. 2. Границы контуров донной растительности в бухте Ласпи, полученные в процессе дешифрирования аэрофотоснимков (ортоплана) с БПЛА
Составлено авторами

3 этап. Гидробиологические исследования донной растительности. Для изучения состава и структуры макрофитобентоса проведена гидробиологическая съёмка с применением лёгководлазной техники. В бухте заложено пять трансект (рис. 3).

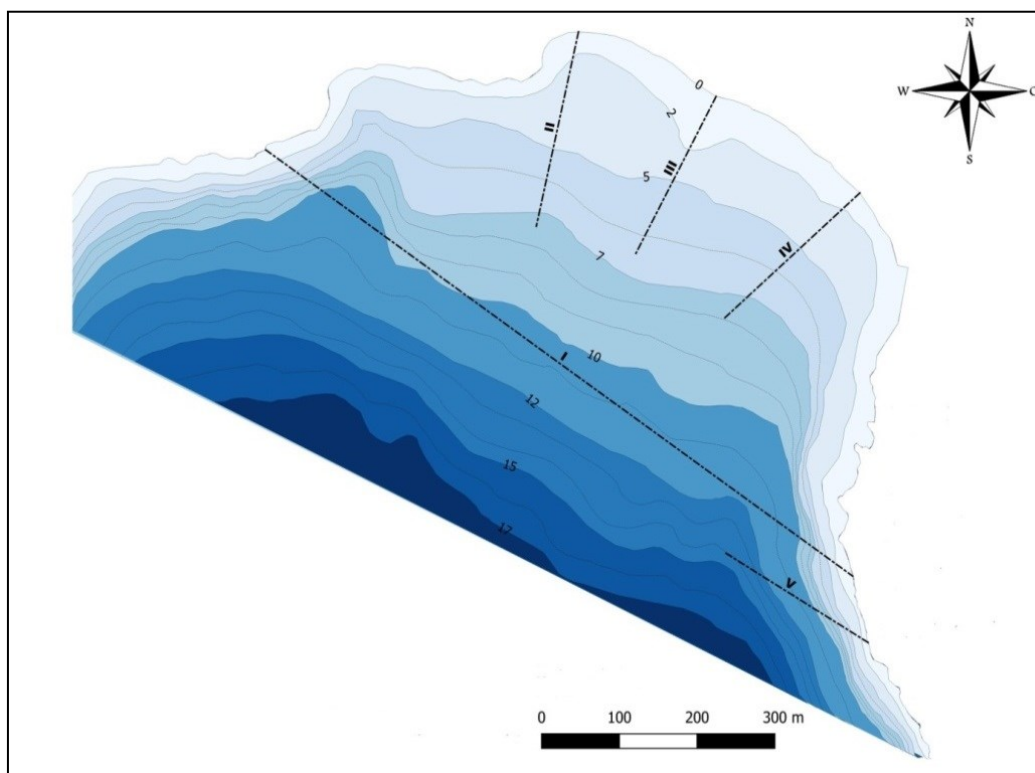


Рис. 3. Картограмма района исследований бухты Ласпи.

Примечание: I–V — номера гидробиотических трансект.

Составлено авторами

Дайвер-исследователь, снабжённый дайв-компьютером (*AERIS F10*), проходил вдоль мерной линии (трансекты), отмечая глубину смены растительности, нижнюю границу обитания макрофитобентоса (фиталь), визуально описывал донные отложения, при этом выполняя фото- и видеосъёмку. Привязку трансект осуществляли с помощью GPS-навигатора (*Oregon 650*).

Информацию о донных компонентах, полученную в ходе водолазного описания, оформляли графически в виде гидробиотических профилей. На батиметрической кривой различными условными обозначениями отражали литофациальные разности донных осадков и массовые виды макрофитов. Пример гидробиотического профиля в бухте Ласпи для трансекты I представлен на рисунке 4. На основе составленных профилей проведена классификация распространения массовых видов макрофитов и разработана легенда к карте донной растительности в бухте Ласпи. Выделение фитоценозов осуществляли согласно доминантной классификации по А. А. Калугиной-Гутник (1975) [14]. Определённые легендой единицы классификации фитоценозы макрофитобентоса стали объектами картографирования.

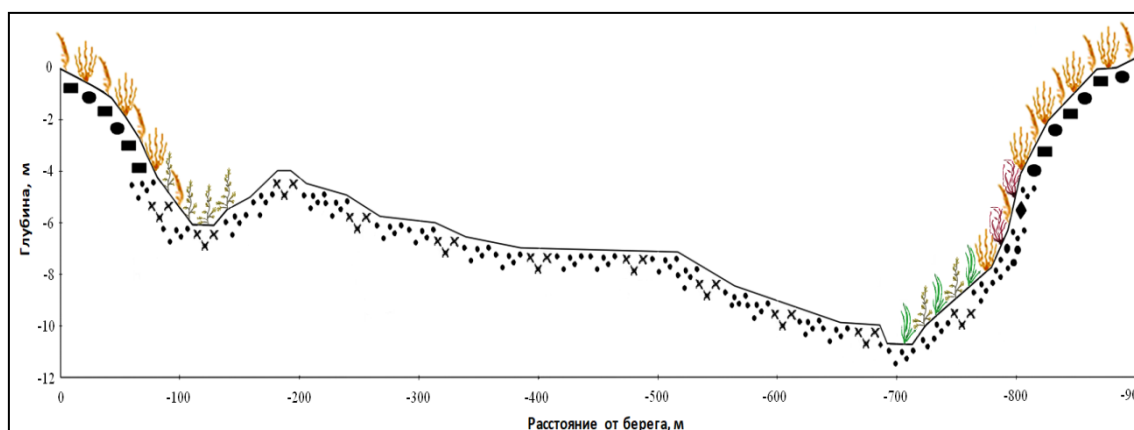


Рис. 4. Гидрботанический профиль бухты Ласпи (I-я трансекта)

Условные обозначения:  - *Cystoseira crinita*,  - *Cystoseira barbata*,
 - *Phylophora crispata*,  - *Zostera noltei*,  - *Zostera marina*.
 – валуны,  – глыбы,  – песок,  – выходы коренных пород,  – гравий,  – битая ракуша
 Составлено авторами

4 этап. Составление карты донной растительности. Ареалы массовых видов макрофитов, первоначально отрисованные на ортофотоплане, оцифрованы с помощью программного пакета *ArcGIS 10* и выполнены отдельным слоем. Одновременно с этим, формализованная информация по полевым описаниям занесена в сопровождающую атрибутивную таблицу слоя. Каждый слой имеет свой тип обозначения в виде цвета, которые отражены в легенде. При наложении слоёв получена карта распределения макрофитобентоса в бухте Ласпи (рис. 5).

Анализ пространственно-временных изменений донной растительности выполнен по материалам экспедиции, проведённой в бухте Ласпи летом 1983 г., в которой один из авторов принимал участие, при этом отбор проб осуществляли по одной и той же методике и на тех же выбранных участках бухты [15, 16].

Результаты и их обсуждение

На основе материалов, полученных в ходе аэрофотосъёмки, выполненной при помощи БПЛА, и гидрботанической съёмки, составлена карта распределения доминирующих видов макрофитов в бухте Ласпи. Выделены пять фитоценозов и даны их количественные характеристики (рис. 5).

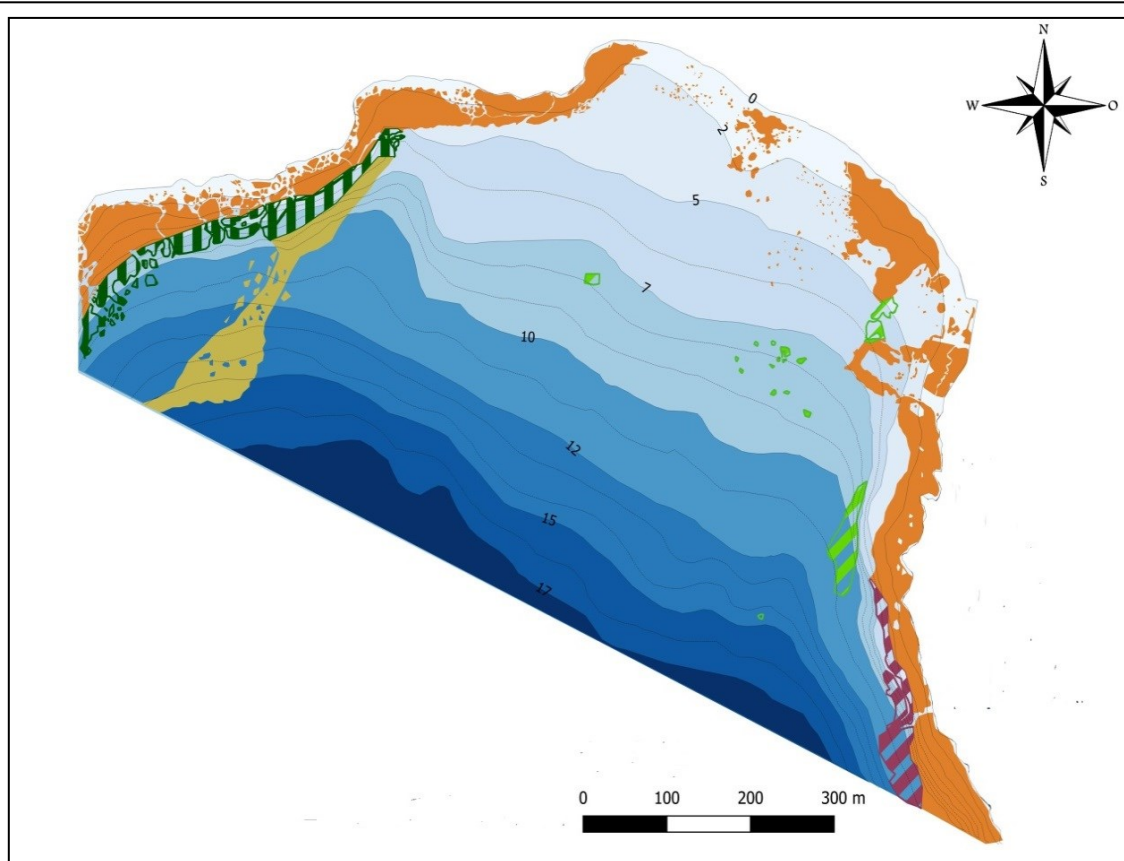







Рис. 5. Картограмма распределения фитоценозов макрофитобентоса в бухте Ласпи

Условные обозначения:		
1		Цистозировый фитоценоз на глыбово-валунном субстрате и выходах коренных пород
2		Цистозирово-филлофоровый фитоценоз, виды цистозирры на глыбово-валунном субстрате, а на гравийно-песчаных отложениях с битой ракушкой филлофора курчавая
3		Фитоценоз взморника морского на песчано-илистом грунте
4		Цистозирово-взморниковый фитоценоз, виды цистозирры на глыбово-валунном субстрате, а на алевроито-псаммитовом субстрате взморник морской
5		Фитоценоз взморника морского и взморника Нольта на песчано-илистом грунте

Составлено авторами

1. Фитоценоз, в состав которого входят виды цистозирры (*Cystoseira barbata* и *C. crinita*), характерен для валунно-глыбовой отмстки и подводного берегового склона, сложенного псефитовыми отложениями с выходами коренных пород (рис. 5). Он занимает наибольшую площадь, которая достигает 5,9 га, что составляет свыше 65% площади, занятой макрофитами в акватории бухты. Это альгосообщество расположено вдоль всей береговой линии на глубине 0,5–5 м, при этом нижняя граница его распространения существенно колеблется в разных

частях бухты: в северо-западной, восточной и юго-восточной части доходит до глубины 5 м. В центральной части (вершина бухты) цистозировый фитоценоз отмечен до глубины 3 м и приурочен к отдельно стоящим глыбам (диаметром 1–2 м). В вершине бухты до глубины 1 м располагается галечный бенч, где донная растительность отсутствует. Проективное покрытие дна макрофитами (ПП) при увеличении глубины в изучаемом диапазоне снижается в 10 раз (табл. 1). Биомасса цистозирового фитоценоза варьирует в широком интервале, при этом наибольшие количественные величины отмечены в верхней сублиторальной зоне (глубина 0,5–1 м), а наименьшие — в средней сублиторали (глубина 3–5 м). Доля видов цистозирисы высокая, снижается с увеличением глубины в 1,3 раза (табл. 1). В восточной и юго-восточной части бухты, начиная с глубины 3 м, изредка встречается *Phyllophora crispa*, доля её участия не превышает 2% общей биомассы макрофитов.

2. Цистозирово-филлофоровый фитоценоз зарегистрирован в юго-восточной части бухты на подводном береговом склоне, сложенным псефитовыми отложениями с фрагментами галечно-песчаных с битой ракушей отложений, на глубине от 5 до 10 м (рис. 5). Его площадь незначительна (0,5 га), почти в 12 раз ниже, чем этот показатель, где описан цистозировый фитоценоз. Подводный склон приглубый, характерен свал глубин. Значения ПП довольно высокие. Биомасса макрофитобентоса снижается более чем втрое при увеличении глубины (табл. 1). На глыбово-валунном субстрате встречаются *Cystoseira barbata* и *C. crinita*, вклад которых существенно выше, чем у *Phyllophora crispa*, обитающей на галечно-песчаных донных осадках. Доля видов цистозирисы уменьшается (в 1,2 раза), а филлофоры — возрастает (в 3,2 раза) в изучаемом интервале глубин (табл. 1).

Таблица 1

Изменение ПП, биомассы макрофитобентоса, доли доминирующих видов макрофитов в фитоценозах при увеличении глубины в бухте Ласпи

Фитоценоз	Год	Глубина, м	ПП, %	Биомасса макрофитов, г·м ⁻²	Доля, %		
					видов цистозирисы	Филлофоры курчавый	Взморника морского
1.	2016–2019	0,5–5	100–10	10399,3 ± 1385,5–600,5 ± 191,1	96–75	0–2	0
	1983	0,5–10	100–80	5271,1 ± 295,9–1796,3 ± 127,6	94–71	0–10	0
2.	2016–2019	5–10	90–80	3524,3 ± 723,6–1097,0 ± 136,6	57–47	9–29	0
	1983	10–15	70–80	2177,0 ± 933,6–2223,68 ± 436,04	1–36	1–91	0
3.	2016–2019	10–15	30–70	532,9 ± 31,9	0	0	78
	1983	5–10	50	1091,0 ± 105,6–716,6 ± 55,2	0	0	89–94
4.	2016–2019	5–10	55–65	4210,4 ± 360,0–928,9 ± 108,9	61–35	0	25

Примечание: нумерация фитоценозов соответствует условным обозначениям на рисунке 5.

Составлено авторами

3. Фитоценоз взморника морского (*Zostera marina*) зарегистрирован в северо-западной части бухты на глубине от 10 до 15 м (рис. 5). Рельеф представляет выровненную поверхность с илисто-песчаными донными осадками. Площадь, занятая фитоценозом морской травы, составляет 1,3 га, что почти в 5 раз ниже, чем площадь, где описан цистозировый фитоценоз (табл. 1). Значения ПП при увеличении глубины возрастают более чем в 2 раза (табл. 1). Биомасса фитоценоза невысокая, на долю его эдификатора приходится 78% общей биомассы макрофитов. Между растениями *Zostera marina* L. на грубообломочном субстрате и битой ракушке мозаично располагаются группировки водорослей, в состав которых входят *Ulva rigida* C. Ag., *Phyllophora crispa* и *Codium vermilara* (Olivi) Delle Chiaje.

4. Цистозирово-взморниковый фитоценоз распространен в северо-западной части бухты на глубине от 5 до 10 м (рис. 5). Площадь фитоценоза не превышает 0,9 га площади акватории бухты. Подводный склон приглубый, отмечен глыбовый навал. Нижняя часть склона относительно выровнена, сложена илисто-песчаными и песчаными отложениями с отдельно расположенными глыбами. На подводном береговом склоне, сложенном псефитовыми отложениями, преобладают виды цистозиреры (*Cystoseira crinita* и *C. barbata*), а на алеврито-псаммитовом субстрате встречается взморник морской (*Zostera marina*) Значения ПП относительно невысокие. На этом участке общая биомасса макрофитов с увеличением глубины снижается в 4,5 раза (табл. 1). На глыбовом субстрате доля участия видов цистозиреры при увеличении глубины в изучаемом диапазоне уменьшается в 1,7 раза. Морская трава *Zostera marina* произрастает фрагментарно и обитает в нижней части подводного берегового склона. Вклад взморника морского достигает 25% общей биомассы макрофитов.

5. Фитоценоз морских трав, представленных видами взморника (*Zostera marina* и *Z. noltei*), имеет дискретное распространение и зафиксирован в центральной и восточной части бухты на глубине от 5 до 15 м (рис. 5). Его площадь составляет 0,4 га площади акватории бухты. Рельеф представляет выровненную поверхность с илисто-песчаными донными осадками, характерны слабо выраженные знаки ряби (рифели). Заросли морских трав в этих частях бухты встречаются мозаично (рис. 5). Биомасса фитоценоза не превышает $143,1 \pm 55,8 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, где на долю первого вида приходится 80%, а второго — 11% общей биомассы макрофитов.

Показательно, что значительная площадь центральной части акватории бухты на глубине 3–10 м, представленная слабонаклонной аккумулятивной равниной, сложенной псаммитовыми отложениями с выраженными крупными знаками ряби (высота рифелей до 20 см), характеризуется отсутствием донной растительности (рис. 5).

Гидрботанические исследования бухты Ласпи, проведенные в 1983 г., показали, что бухта находилась в естественном или близком к нему состоянии, где поддерживалось экологическое равновесие береговой зоны [9]. В это время доминировали цистозировый, филлофоровый и взморниковый фитоценозы, которые имели поясное распространение вдоль побережья бухты и характеризовались высокими запасами фитомассы. Сравнительный анализ данных, полученных в 1983 г. и в период 2016–2019 гг., выявил существенную структурную перестройку видового состава, изменения в конфигурации границ и глубины распространения макрофитов [15, 16].

Фитоценоз с доминированием видов цистозеры является типичным для бухты Ласпи, как и для всего крымского побережья. Его выделяли вдоль побережья бухты в течение всего изучаемого периода. Однако, глубина и площадь цистозерного фитоценоза существенно изменялась. Так, глубина распространения этого фитоценоза в северо-западной и восточной части бухты поднялась до глубины 5 м в 2016–2019 гг., тогда как в 1983 г. он достигал глубины 10–15 м. Наиболее выраженные изменения произошли в вершине бухты, где цистозерный фитоценоз теперь приурочен лишь к отдельно стоящим глыбам, хотя в 1983 г. виды цистозеры произрастали сплошным поясом до глубины 3(5) м. В 60–70-х гг. прошлого столетия нижняя граница произрастания цистозеры у берегов Крыма и в регионе Севастополя была зафиксирована на глубине 18–20 м, то к настоящему времени на этих глубинах она почти полностью исчезла, при этом ширина цистозерного пояса сократилась от 1 км до 300–500 м [10, 14].

За сравниваемый период вдоль побережья бухты отмечено увеличение плотности зарослей цистозеры на глубине от 0,5 до 1 м, что соответственно привело к возрастанию их биомассы на этих глубинах (табл. 1). Биомасса макрофитов в 2016–2019 гг. на верхней границе сообщества возросла примерно вдвое, тогда как на нижней — снизилась втрое, хотя доля доминирующих видов цистозеры осталась высокой, по сравнению с этими же показателями в 1983 г. (табл. 1). Структура цистозерного фитоценоза на его нижней границе значительно усложнилась и, помимо количественных изменений, обнаружены и качественные. Так, в его составе зарегистрировано уменьшение роли видов 1 и 2-го ярусов, наряду со значительным повышением доли участия эпифитной синузии, где появились виды, предпочитающие районы, подверженные влиянию хозяйственно-бытовых стоков [2, 10, 14]. Сходные изменения зафиксированы на многих участках крымского и кавказского побережья [2, 10, 14, 17].

Более 35-ти лет назад биомасса цистозерного фитоценоза колебалась в широком интервале, при этом наибольшие количественные величины отмечены на глубине 0,5–3 м, а наименьшие — на глубине 5–10 м. Вдоль всего побережья вклад видов цистозеры был высоким, незначительно варьировал (табл. 1). В вершине бухты, в её восточной и юго-восточной части, начиная с глубины 3 м, встречалась *Phyllophora crispa*, доля её участия не превышала 10% общей биомассы макрофитов. Значения ПП при увеличении глубины в изучаемом диапазоне снижались в 1,2 раза, при этом они были значительно выше, чем эти показатели в 2016–2019 гг. (табл. 1). За прошедшие 36 лет резко уменьшились значения ПП на нижней границе фитоценоза. Такие изменения свидетельствуют о смещении эколого-фитоценотического оптимума цистозеры, который ранее был приурочен к глубине 3–5 м [14].

Цистозеро-филлофоровые фитоценозы являются характерными для черноморского побережья Крыма [14]. На существование «переходной полосы», где на одной глубине встречаются одновременно несколько фитоценозов, обращала внимание А. А. Калугина-Гутник (1975) ещё в конце прошлого века. Эта промежуточная зона ранее простиралась на глубине 15–(18) 20 м. По данным У. В. Симаковой (2009) [18] эти участки представляют «экоклин» — зону с постепенным изменением состава донной растительности вдоль градиента освещённости. В настоящее время эта зона сместилась на глубину 7–10 м.

В 1983 г. цистозеро-филлофоровый фитоценоз был зарегистрирован в восточной части бухты на глубине от 10 до 15 м. Значения ПП составляли 70–80%.

Биомасса фитоценоза достигала свыше 2-х кг·м⁻². В сложении биомассы макрофитов доминировали виды цистозиры, по сравнению с этим показателем филлофоры (табл. 1). В 2016–2019 гг. фитоценоз зарегистрирован на меньших глубинах, соответственно возросли значения ПП, общая биомасса макрофитов и вклад доминирующих видов водорослей (табл. 1).

За прошедшие 36 лет (1983–2019 гг.) в цистозирово-филлофоровом фитоценозе также произошли существенные структурные изменения. Значительно сузились границы фитали, и отмечен подъём нижней границы произрастания многих глубоководных видов водорослей. Такие изменения были зарегистрированы ранее на многих участках крымского побережья [14]. В цистозирово-филлофоровом фитоценозе также резко возросла роль эпифитных синузий, при этом среди эпифитов доминируют виды, свидетельствующие о повышении степени эвтрофирования изучаемой акватории [2].

За последние годы известны многочисленные сведения о поднятии нижней границы произрастания филлофоры вдоль кавказского и крымского шельфа. Этот вид стал встречаться на меньших глубинах, вместо ранее характерных глубин 25–30 м, при этом отмечено снижение плотности его популяций в 1,5–2 раза, запасов — более чем втрое [2, 10, 14, 17]. В 1983 г. филлофоровый фитоценоз был зарегистрирован вдоль всей бухты на глубине от 5(10) до 20(25) м: в северо-западной и центрально-восточной части он был распространён на глубине свыше 10 м, а в юго-восточной — на глубине свыше 5 м. Значения ПП составляли 90–100%. Биомасса макрофитов при увеличении глубины возрастала в 1,8 раза (с 3127,9 ± 305,8 до 5741,2 ± 962,7 г·м⁻²), вклад филлофоры достигал 74–97%, при этом доля участия видов цистозиры резко снижалась от 14 до 1% общей биомассы.

Наиболее существенные изменения характерны для фитоценоза морских трав. За сравниваемый период он значительно изменял границы контура и глубину простираения. В 1983 г. фитоценоз с преобладанием взморника морского (*Zostera marina*) занимал центральную часть бухты на глубине от 5 до 10 м, где значения ПП не превышали 50%. Биомасса макрофитов при увеличении глубины снижалась в 1,5 раза (табл. 1). Доминирующая роль принадлежала эдификатору фитоценоза. В 2016–2019 гг. фитоценоз взморника морского описан в северо-западной части на глубине от 10 до 15 м, при этом биомасса макрофитов в изучаемом диапазоне глубин снизилась в 1,3–2 раза (табл. 1). Для центральной и восточной части бухты отмечен фитоценоз морских трав, для которого характерно увеличение доли взморника Нольта (*Zostera noltei*). Фитоценоз *Zostera marina*+*Z. noltei* распространён мозаично, впервые был зарегистрирован в 2019 г. Пространственно-временные изменения фитоценоза морских трав, вероятно, связаны с нарушением гидродинамического режима бухты, в связи со строительством гидротехнического сооружения в конце 90-х годов прошлого века. Известно, что строительство гидротехнических и берегозащитных сооружений вызывает перестройку гидродинамических процессов, снижение уровня волновой динамики, затухание вдольбереговых течений, при этом существенно уменьшается степень их включённости в систему прибрежной циркуляции, вследствие чего происходит перераспределение участков абразии и аккумуляции [19]. По мнению В. В. Преображенского с соавторами (2000) [19], к изменениям в структуре донной растительности рыхлых грунтов, приводит, в первую очередь, нарушение гидродинамического режима акватории. Например, в заливе Петра Великого отмечено значительное сокращение площадей взморника,

вызванное проведением берегозащитных мероприятий в приурезовой зоне, строительством молов, причалов и других гидротехнических сооружений.

Цистозирово-взморниковый фитоценоз впервые был описан в 2016 г. Он расположен в северо-западной части бухты на глубине от 5 до 10 м. За 2017–2019 гг. его расположение и глубина простирались сохранились. Следует отметить, что для черноморского побережья совместное произрастание цистозир и взморников является нетипичным. Подобный состав и структура макрофитобентоса в этой части бухты обусловлены аккумуляцией песчаных отложений, что также свидетельствует об изменении гидродинамического режима в акватории.

Таким образом, за прошедшие 36 лет (1983–2019 гг.) в бухте отмечена негативная трансформация донной растительности, которая, вероятно, связана с увеличением антропогенной нагрузки на береговую зону. Строительство объектов рекреационной инфраструктуры и гидротехнических сооружений в прибрежной зоне привело к увеличению общего объёма береговых стоков, возросшему эвтрофированию вод бухты, изменению конфигурации берега и подводного берегового склона, активизации гравитационных процессов, нарушению направлений вдольбереговых течений [15].

Совместное применение традиционных гидробиологических исследований и аэрофотосъёмки с помощью БПЛА значительно расширяют возможности обоих методов изучения донной растительности. Так, использование БПЛА позволяет оперативно и точно получать информацию о распределении макрофитобентоса в прибрежной зоне. Проведение аэрофотосъёмок донной растительности может быть необходимым элементом комплексных мониторинговых исследований.

Выводы

Показана возможность применения современных технологий для картографирования донной растительности в прибрежной зоне моря, которая позволяет оперативно и точно получать информацию о её распределении. На основе материалов, полученных в ходе аэрофотосъёмки и гидробиологических исследований, выделены пять фитоценозов и составлена карта распространения макрофитобентоса в бухте Ласпи. Выявлены пространственные закономерности распределения доминирующих видов макрофитов (виды цистозир, филофора курчавая, взморник морской и взморник Нольта) и даны их количественные характеристики. Как показали результаты наблюдений, за более чем 35-летний период (1983–2019 гг.) в бухте отмечены изменения не только в конфигурации границ и глубины распространения контуров макрофитобентоса, но и выявлена существенная структурная перестройка растительной компоненты.

Проведённые исследования донной растительности могут быть использованы для разработки научно-практических основ оптимизации морского природопользования. В дальнейшем мониторинг и постоянный контроль за распределением макрофитобентоса, играющего ведущую роль в стабилизации прибрежных экосистем, с помощью БПЛА позволит получать оперативные репрезентативные данные о состоянии черноморской шельфовой зоны и давать рекомендации по созданию морских охраняемых акваторий, которые будут способствовать сохранению ландшафтного и биологического разнообразия региона. Однако применение БПЛА в изучении донной растительности, требует дальнейших научно-методологических разработок.

Отбор проб и первичная обработка макрофитобентоса в 2016 г. проведена в рамках госзадания ФГБУН ИМБИ № 1001-2014-0014, в которой, помимо авторов, принимали участие сотрудники лаборатории фиторесурсов. Работа выполнена в рамках госзадания ФИЦ ИНБЮМ по теме госзадания № АААА-А18-118021350003-6.

Литература

1. Мильчакова Н. А. Макрофитобентос // Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма (черноморский сектор). Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. С. 152–208.
2. Мильчакова Н. А., Миронова Н. В., Рябогина В. Г. Морские растительные ресурсы. // Промысловые биоресурсы Чёрного и Азовского морей / ред.: В. Н. Еремеев, А. В. Гаевская, Г. Е. Шульман, Ю. А. Загородняя. Севастополь, 2011. Гл. 4. С. 117–139.
3. Петров К. М. Подводные ландшафты: теория, методы исследования. Л.: Наука, 1989. 126 с.
4. Блинова Е. И., Пронина О. А., Штрик В. А. Методические рекомендации по учету запасов промысловых морских водорослей прибрежной зоны // Методы ландшафтных исследований и оценки запасов донных беспозвоночных и водорослей морской прибрежной зоны. Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки. М.: Изд-во ВНИРО, 2005. Вып. 3. С. 80–127.
5. Joyce, K. E., Phinn, S. R., Roelfsema, C. M., Neil, D. T., Dennison, W. C., 2004. Combining Landsat ETM+and Reef Check classifications for mapping coral reefs: a critical assessment from the Southern Great Barrier Reef // Coral Reefs, 2004. Vol. 23 iss. 1. P. 21–25.
6. Барымова А. А., Кокорин А. И. Применение БПЛА для аэрофотосъемки с целью комплексного картирования прибрежных зон на примере литорали Карельского берега Белого моря // Материалы научной сессии УНБ «Беломорская». Санкт-Петербургский государственный университет, 2018. С. 31–32.
7. Дворецкий Т. В., Дьяченко Т. Н., Гулевец Д. В., Савченко С. А. Опыт изучения высшей водной растительности с использованием БПЛА (на примере Ореховатских прудов (г. Киев)). // Полевые и экспериментальные исследования биологических систем. Ишим: Изд-во ИПИ им. П.П. Ершова (филиал). ТюмГУ, 2019. С. 9–11.
8. Панкеева Т. В., Миронова Н. В., Новиков А. Б. Картографирование донной растительности бухты Круглая (г. Севастополь, Черное море). // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря, 2019. № 3, С. 61–71. DOI: 10.22449/2413-5577-2019-3-61-71
9. Калугина-Гутник А. А. Изменение видового состава фитобентоса в бухте Ласпи за период 1964–1983 гг. // Экология моря, 1989. Вып. 31. С. 7–12.
10. Мильчакова Н. А. Макрофитобентос // Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма (черноморский сектор). Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. С. 152–208.

11. Мильчакова Н. А., Петров А. Н. Морфофункциональный анализ многолетних изменений структуры цистозировых фитоценозов (бухта Ласпи, Черное море) // Альгология. 2003. Т. 13. № 4. С. 355–370.
12. Миронова Н. В., Мильчакова Н. А., Александров В. В. Фитомасса и запасы макрофитов как показатели состояния макрофитобентоса (б. Ласпи, Черное море) // Современные проблемы эволюции и экологии. Ульяновск, 2015. С. 412–419.
13. Евстигнеева И. К. Танковская И. Н. Макроводоросли перифитона и бентоса прибрежья бухты Ласпи (Крым, Черное море) // Экология моря, 2010. Вып. 81. С. 40–49.
14. Калугина-Гутник А. А. Фитобентос Чёрного моря. К.: Наукова думка, 1975. 248 с.
15. Pankeeva T. V., Mironova N. V. Spatiotemporal Changes in the Macrophytobenthos of Laspi Bay (Crimea, Black Sea) // Oceanology, 2019. Vol. 59, iss. 1. P. 86–98. DOI:10.1134/S0001437019010168
16. Панкеева Т. В., Миронова Н. В. Пространственное распределение макрофитобентоса с учетом ландшафтной структуры дна в бухте Ласпи (Черное море) // Вестник Удмуртского ун-та. Серия Биология. Наука о Земле, 2019. 29 (1), С. 111–123.
17. Максимова О. В., Лучина Н. П. Современное состояние макрофитобентоса у побережья северного Кавказа: реакция фитали на эвтрофикацию черноморского бассейна // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 297–308.
18. Симакова У. В., Влияние рельефа дна на сообщества цистозире Северокавказского побережья Черного моря // Океанология, 2009. Вып. 49. № 5. С. 72–680.
19. Преображенский Б. В., Дубейковский В. В. Жариков Л. В. Основы подводного ландшафтоведения: (Управление морскими экосистемами). Владивосток: Дальнаука, 2000. 352 с.

T. V. Pankeeva¹,
N. V. Mironova²,
B. A. Novikov³

Experience in mapping bottom vegetation (for example of Laspi Bay, Black Sea)

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation
Sevastopol State University,
Sevastopol, Russian Federation
e-mail: ¹tatyanapankeeva@yandex.ru,
²dr.nataliya.mironova@yandex.ru, ³bober996@mail.ru

Annotation. *The article covers the possibility of applying digital technologies for mapping seafloor vegetation for coastal sea zone. Submitted method allows promptly and accurately receive information about distribution of algae species. Laspi bay is distinguished by biological diversity, an abundance of unique habitats of seafloor vegetation, where sea grass and algae communities are represented. Based on these qualities it was chosen as a model region for mapping macrophytes distribution. Aerial photography using an unmanned aerial vehicle (UAV) and hydro-botanical studies were conducted in the summer of 2019 year. The distribution map of macrophyte made based on aerial photos, while composition and structure were determined though hydro-botanical surveys. Five transects were laid in the bay, hydrobotanical profiles were compiled. Five seafloor plant communities identified for mapping. Digitized*

boundaries were set using software package QGIS version 2.18.12. Based on boundaries distribution map was made. The spatial patterns of the distribution of dominant macrophyte species (*Cystoseira*, *Phyllophora* and *Zostera noltei*) mapped along with quantitative characteristics.

Keywords: bottom vegetation, unmanned aerial vehicle (drone), orthophotoplan, Laspi Bay, Black Sea.

References

1. Mil'chakova N. A. Makrofitobentos // *Sovremennoe sostoyanie bioraznoobraziya pribrezhnyh vod Kryma (chernomorskiy sektor)*. Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2003. S. 152–208 (In Russian).
2. Mil'chakova N. A., Mironova N. V., Ryabogina V. G. Morskie rastitel'nye resursy. // *Promyslovye bioresursy CHyornogo i Azovskogo morej* / red.: V. N. Eremeev, A. V. Gaevskaya, G. E. SHul'man, YU. A. Zagorodnyaya. Sevastopol', 2011. Gl. 4. S. 117–139 (In Russian).
3. Petrov K. M. *Podvodnye landshafty: teoriya, metody issledovaniya*. L.: Nauka, 1989. 126 s. (In Russian).
4. Blinova E. I., Pronina O. A., SHtrik V. A. Metodicheskie rekomendacii po uchetu zapasov promyslovyh morskikh vodoroslej pribrezhnoj zony // *Metody landshaftnyh issledovaniy i ocenki zapasov donnyh bespozvonochnyh i vodoroslej morskoy pribrezhnoj zony. Izuchenie ekosistem rybohozyajstvennyh vodoemov, sbor i obrabotka dannyh o vodnyh biologicheskikh resursah, tekhnika i tekhnologiya ih dobychi i pererabotki*. M.: Izd-vo VNIRO, 2005. Vyp. 3. S. 80–127 (In Russian).
5. Joyce, K. E., Phinn, S. R., Roelfsema, C. M., Neil, D. T., Dennison, W. C., 2004. Combining Landsat ETM+ and Reef Check classifications for mapping coral reefs: a critical assessment from the Southern Great Barrier Reef // *Coral Reefs*, 2004. Vol. 23 iss. 1. P. 21–25 (In English).
6. Barymova A. A., Kokorin A. I. *Primenenie BPLA dlya aerofotos'emki s cel'yu kompleksnogo kartirovaniya pribrezhnyh zon na primere litorali Karel'skogo berega Belogo morya* // *Materialy nauchnoj sessii UNB «Belomorskaya»*. Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet, 2018. S. 31–32 (In Russian).
7. Dvoreckij T. V., D'yachenko T. N., Gulevec D. V., Savchenko S. A. *Opyt izucheniya vysshej vodnoj rastitel'nosti s ispol'zovaniem BPLA (na primere Orekhovatskikh prudov (g. Kiev))*. // *Polevye i eksperimental'nye issledovaniya biologicheskikh sistem*. Ishim: Izd-vo IPI im. P.P. Ershova (filial). TyumGU, 2019. S. 9–11 (In Russian).
8. Pankeeva T. V., Mironova N. V., Novikov A. B. *Kartografirovanie donnoj rastitel'nosti buhty Kruglaya (g. Sevastopol', CHernoe more)*. // *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon morya*, 2019. № 3, S. 61–71. DOI: 10.22449/2413-5577-2019-3-61-71 (In Russian).
9. Kalugina-Gutnik A. A. *Izmenenie vidovogo sostava fitobentosa v buhte Laspi za period 1964–1983 gg.* // *Ekologiya morya*, 1989. Vyp. 31. S. 7–12 (In Russian).
10. Mil'chakova N. A. Makrofitobentos // *Sovremennoe sostoyanie bioraznoobraziya pribrezhnyh vod Kryma (chernomorskiy sektor)*. Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2003. S. 152–208 (In Russian).

11. Mil'chakova N. A., Petrov A. N. Morfofunkcional'nyj analiz mnogoletnih izmenenij struktury cistozirovyh fitocenozov (бухта Ласпи, Чёрное море) // *Ал'гология*. 2003. Т. 13. № 4. С. 355–370 (In Russian).
12. Mironova N. V., Mil'chakova N. A., Aleksandrov V. V. Fitomassa i zapasy makrofitov kak pokazateli sostoyaniya makrofitobentosa (b. Ласпи, Чёрное море) // *Sovremennye problemy evolyucii i ekologii*. Ul'yanovsk, 2015. С. 412–419 (In Russian).
13. Evstigneeva I. K., Tankovskaya I. N. Makrovodorosli perifitona i bentosa pribrezh'ya бухты Ласпи (Крым, Чёрное море) // *Экология моря*, 2010. Vyp. 81. С. 40–49 (In Russian).
14. Kalugina-Gutnik A. A. Fitobentos Чёрного моря. К.: Naukova dumka, 1975. 248 s (In Russian).
15. Pankeeva T. V., Mironova N. V. Spatiotemporal Changes in the Macrophytobenthos of Laspi Bay (Crimea, Black Sea) // *Oceanology*, 2019. Vol. 59, iss. 1. P. 86–98. DOI:10.1134/S0001437019010168 (In English).
16. Pankeeva T. V., Mironova N. V. Prostranstvennoe raspredelenie makrofitobentosa s uchetom landshaftnoj struktury dna v бухте Ласпи (Чёрное море) // *Vestnik Udmurtskogo un-ta. Seriya Biologiya. Nauka o Zemle*, 2019. 29 (1), S. 111–123.
17. Maksimova O. V., Luchina N. P. Sovremennoe sostoyanie makrofitobentosa u poberezh'ya severnogo Kavkaza: reakciya fitali na evtrofikaciju chernomorskogo bassejna // *Kompleksnye issledovaniya severo-vostochnoj chasti Чёрного моря*. М.: Nauka, 2002. С. 297–308 (In Russian).
18. Simakova U. V., Vliyanie rel'efa dna na soobshchestva cistoziry Severokavkazskogo poberezh'ya Чёрного моря // *Okeanologiya*, 2009. Vyp. 49. № 5. С. 72–80 (In Russian).
19. Preobrazhenskij B. V., Dubejkovskij V. V., ZHarikov L. V. Osnovy podvodnogo landshaftovedeniya: (Upravlenie morskimi ekosistemami). Vladivostok: Dal'nauka, 2000. 352 s. (In Russian).

Поступила в редакцию 20.11.2020 г.