

И.К. Евстигнеева, И.Н. Танковская

ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН», ikevstigneeva@gmail.com

БИОМАССА МАКРОФИТОБЕНТОСА И ЕЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВДОЛЬ ЗАПАДНОГО БЕРЕГА КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА (ЧЕРНОЕ МОРЕ)

В статье приведены результаты исследования биомассы макрофитобентоса на шести участках западного побережья Крыма (акватории мысов Тюбек, Лукулл, Вай-Вай, Маргопуло, Немецкой и Языковой балок). Показано, что в сообществах данного региона ключевым продуцентом среди отделов является Ochrophyta, среди видов – *Vertebrata subulifera*, *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata*, *Ceramium diaphanum* и *Phyllophora crispa*. Отмечено неравномерное распределение биомассы видов и фитобентоса на участках с разной степенью проявления естественных береговых процессов и антропогенного воздействия. Определены особенности распределения биомассы водорослей трех отделов по глубинам. Установлено, что батиметрические изменения фитомассы происходят интенсивнее, чем от участка к участку. Для оценки разнообразия и выравненности видов по биомассе выполнен расчет индексов Шеннона и Пиелу. Показано, что на охраняемых территориях индекс Пиелу гораздо ближе к 1, чем на участках с высокой антропогенной нагрузкой. Среднее для исследованной части фитали значение индекса Шеннона свидетельствует о некоторой равномерности распределения видов по абсолютной фитомассе на разных глубинах. С привлечением t-критерия Стьюдента определена статистическая значимость различий фитомассы на разных участках и глубинах. На основе данных об относительной фитомассе (%) и с учетом шкалы Е.Л. Любарского оценена степень количественного доминирования видов.

Ключевые слова: макрофитобентос; биомасса; пространственная изменчивость; западный берег Крыма; Черное море.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.1.28.37>

Введение

В современных условиях, когда увеличение антропогенного пресса на прибрежную зону приводит к нарушению ландшафтного и биологического разнообразия как на охраняемых, так и на лишенных охранного статуса участках моря, возникает необходимость составления прогнозов воздействия на эту зону при создании и реализации проектов ее освоения (Горячкин, Долотов, 2019). При этом авторы прогнозов сталкиваются со сложностью, вызванной как отсутствием регулярных и масштабных наблюдений для многих прибрежных участков Черного моря, так и необходимостью актуализации имеющихся данных. Решение этих проблем позволило бы сформировать объективное представление о современном состоянии бентосной флоры, в частности, у западных берегов Крымского полуострова, обладающих высокой рекреационной привлекательностью. Для данного региона разрабатываются и осуществляются проекты по развитию инфраструктуры, благоустройству береговой зоны и пляжей. В 2018 г. были проведены исследования, позволившие рекомендовать территорию от устья

реки Бельбек до мыса Маргопуло для развития марихозяйств (Рябушко и др., 2020). Спустя год здесь была создана мидийная ферма. В настоящее время часть берега занята дачными и жилыми постройками, а в районе Немецкой балки организовано террасирование территории и фактически начал работу карьер по добыче и вывозу гравийно-галечного материала, что могло стать причиной прекращения естественной подпитки пляжей. Для западного побережья характерны процессы береговой абразии, обвалы и оползни в подошве клифа (Горячкин и др., 2020). В середине июня 2021 г. в районе Немецкой балки произошел сход мощного оползня. Негативное влияние на морскую экосистему на западе полуострова могут оказать аварийные выпуски сточных вод с низким качеством механической и биологической очистки, действующие в районе мыса Маргопуло и поселка Кача (Немецкая балка), а также мидийные хозяйства, функционирование которых приводит к накоплению продуктов жизнедеятельности моллюсков. Специалистами высказывается мнение, что подобное освоение территории, прилегающей непосредственно к береговым об-

рывам, способно привести к усилению деструктивных гидродинамических процессов и к уничтожению береговых ландшафтов (Панкеева и др., 2021; Евстигнеева, Танковская, 2021).

Гидролого-гидрохимические исследования прибрежной акватории г. Севастополя (Рябушко и др., 2020) выявили высокую обеспеченность среды кислородом, низкие значения БПК₅ и типичные для незагрязненных прибрежных вод концентрации биогенов. При этом известно, что на побережье от мыса Лукулл до мыса Сарыч функционируют 35 выпусков сточных вод различной степени очистки, а расположенные здесь реки зачастую принимают стоки организованных и неорганизованных источников (Грузинов и др., 2019). В период наших работ в районе мыса Лукулл было зарегистрировано существенное превышение ПДК по БПК₅ (Дьяков и др., 2020). К этому моменту воды рек Бельбек и Кача уже отличались высоким уровнем загрязнения металлами и нефтепродуктами. Очевидно, что дальнейшее наращивание объемов загрязнения и активное освоение берегов в районе исследований в будущем может негативно сказаться на качестве среды обитания гидробионтов на охраняемых и сопредельных им участках моря. Такая трансформация среды, как правило, влечет за собой изменения структурно-функциональных характеристик прибрежных экосистем, в том числе и их биомассы.

У западных берегов Крымского полуострова имеются четыре охраняемых объекта, включающих морскую акваторию (Мильчакова и др., 2015). К ним относится особо охраняемая природная территория (ООПТ) «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Лукулл», в границах которой находятся акватории мысов Тюбек, Лукулл и Вай-Вай. К ООПТ примыкают акватории мыса Маргопуло, Немецкой и Языковой балок. Протяженность изученной части западного берега составила 17.1 км. Береговая линия изрезана слабо и ее выравненность нарушается вследствие формирования мысов. Подводный склон отмельный и образован песчаными отложениями. В прибрежной акватории от уреза до глубины 10 м образуются выступы дна и отдельные банки за счет нагромождения плит и глыб конгломерата. Динамика береговой линии и рельефа детерминирована вдольбереговым перемещением прибрежно-морских наносов, которое определяется ветро-волновым режимом на прилегающей акватории (Горячкин и др., 2020).

Данные о флористическом составе и таксономической структуре фитобентоса на этих участках были опубликованы ранее (Евстигнеева, Танковская, 2021, 2022). Для полной характеристики

фитоценозов большое значение имеют и сведения о биомассе, формируемой растениями, а также о дифференциации видов по участию в этом процессе. Отсюда целью настоящей работы стали исследование биомассы макрофитобентоса и количественная оценка роли видов в ее формировании на разных участках западного побережья Крымского полуострова (горизонтальная изменчивость) и в зависимости от глубины обитания (вертикальная изменчивость).

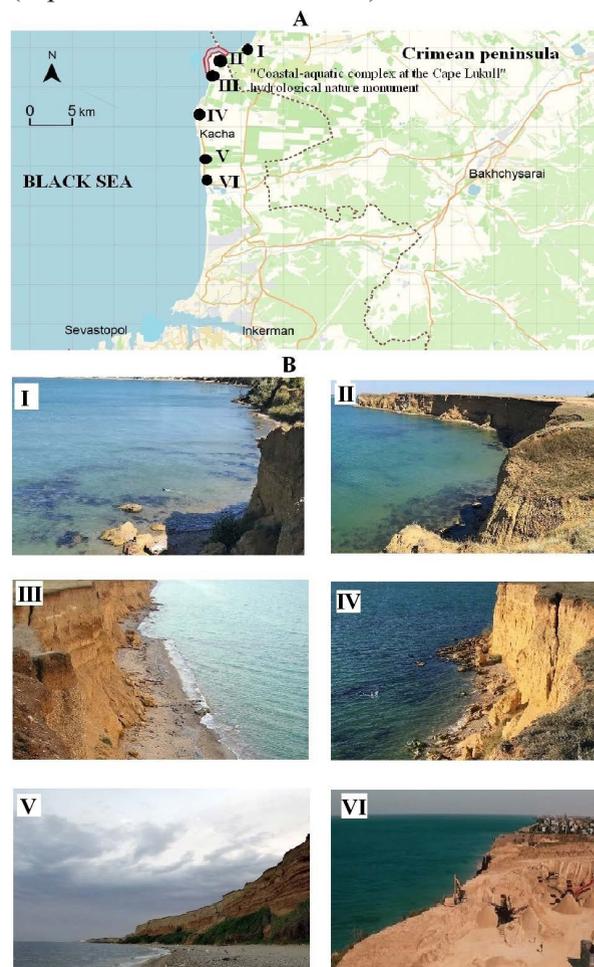


Рис. 1. Карта района альгологических работ у Западного берега Крымского полуострова (Севастопольский регион)

Здесь и далее: В. Районы исследования: I – мыс Тюбек (N 44°50.483' E 33°33.642'); II – мыс Лукулл (N 44°50.411' E 33°33.274'); III – мыс Вай-Вай (N 44°50.061' E 33°32.996'); IV – мыс Маргопуло (N 44°42.878' E 33°32.665'); V – Немецкая балка (N 44°45.225' E 33°32.758'); VI – Языковая балка (N 44°47.383' E 33°32.115')

Fig. 1. A map of algological survey area off the Crimean Peninsula western coast (Sevastopol region) Here and further: B. Study areas: I – Cape Tubek (northern latitude 44°50.483', eastern longitude 033°33.642'); II – Cape Lukull (northern latitude 44°50.411', eastern longitude 033°33.274'); III – Cape Vai Vai (northern latitude 44°50.061', eastern longitude 033°32.996'); IV – Cape Margopulo (northern latitude 44°42.878'; eastern longitude 033°32.665'); V – Nemetskaya Balka (northern latitude 44°45.225'; eastern longitude 033°32.758'); VI – Yazykovaya balka (northern latitude 44°47.383'; eastern longitude 033°32.115')

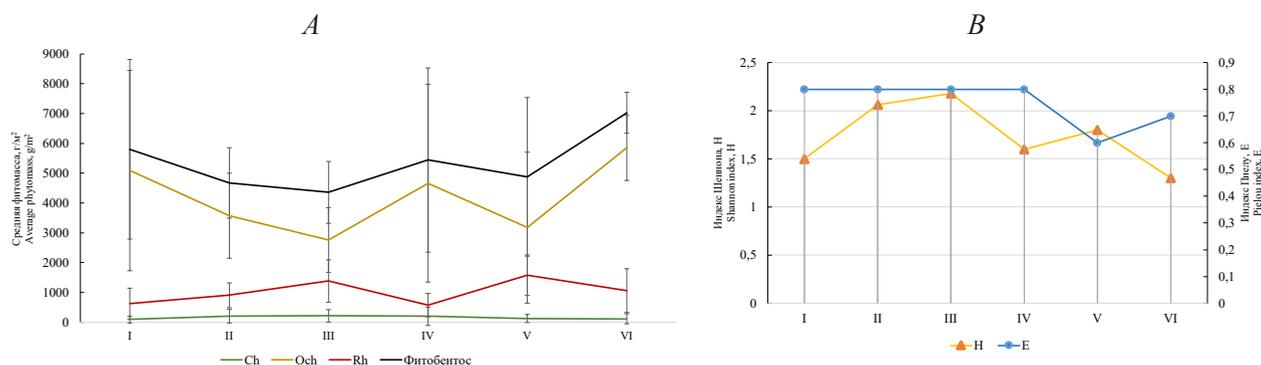


Рис. 2. Пространственное изменение значений средней фитомассы (А), индексов Шеннона и Пиелу (В) на разных участках района исследований

Fig. 2. Spatial change in average phytomass values (A), Shannon and Pielou indices (B) in different parts of the study area

Материалы и методы исследования

Гидрботанические исследования проводили летом 2020 г. в период массовой вегетации водорослей. Район альгологических работ включал акватории мысов Тюбек, Лукулл, Вай-Вай, Маргопуло, Немецкой и Языковой балок (рис. 1).

Отбор проб проводили с помощью водолаза на глубинах 0,5, 1, 3, 5, 10 и 15 м до границы распространения водорослей в четырехкратной повторности с применением учетных площадок размером 25×25 см (Калугина, 1969). Всего было собрано 120 количественных и 30 качественных проб. Их первичная обработка проходила в лабораторных условиях, где определяли видовой состав водорослей с применением микроскопа «Армед XS-90» и сырую биомассу – на лабораторных электронных весах «ВК-600». Идентификацию видов проводили по базовому определителю (Зинова, 1967) с учетом последних номенклатурных изменений (Guiry M., Guiry G., 2022). Разнообразие и выравненность видов по биомассе оценивали по индексам Шеннона (H) и Пиелу (E) (Розенберг, 2010). По индивидуальной фитомассе и с применением шкалы количественного доминирования Е.Л. Любарского, базирующейся на сведениях об относительной фитомассе видов, определяли группы малозначимых и второстепенных видов, содоминантов и доминантов разных категорий (Баканов, 2005).

Для описания изменчивости характеристик фитобентоса определяли лимиты, размах их вариации и среднее значение с доверительным интервалом (Жукова, Минец, 2019). С учетом величины коэффициента вариации (C_v) устанавливали степень изменчивости признаков по шкале Г.Н. Зайцева (верхне- и нижненормальная, значительная, большая, очень большая, аномально высокая) (Зайцев, 1990). С помощью t-критерия Стьюдента оценивали значимость различий фитомассы на

разных глубинах в акватории шести участков Западного берега Крыма (Боровиков, 2013).

Результаты и их обсуждение

Особенности горизонтального распределения фитомассы. Установлено, что в каждом из шести районов ключевыми продуцентами среди отделов являются бурые водоросли Ochrophyta (Och). Их фитомасса, в среднем для изученных районов ($4205 \pm 963 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$), составляет 78% от этого показателя для всего альгоценоза. На таких участках, как Языковая балка, мысы Тюбек и Маргопуло, вклад бурых водорослей достигает 83–88%. Крайние значения средней фитомассы у каждого отдела разнесены в пространстве. При этом максимальная фитомасса Och и Rhodophyta (Rh) приходится на участок, где у Chlorophyta (Ch) ее уровень минимален (Языковая балка). Совпадение пространственной локации максимума и минимума фитомассы Och и всего альгоценоза подтверждает роль бурых водорослей в качестве его базового продуцента на Западе Крыма. Ход изменений фитомассы Och и сообщества от района к району носит идентичный характер (рис. 2).

Кривые пространственных вариаций средней фитомассы у Rh и Och зеркальны по отношению друг к другу. Несомненно, пики в динамике биомассы водорослей на уровне отделов и сообщества макроводорослей обусловлены как морфофизиологическими и онтогенетическими особенностями видов, входящих в их состав, так и характером их взаимодействия со средой обитания. По силе проявления пространственные изменения фитомассы отделов между участками исследованной акватории относятся к умеренным и по шкале Г.Н. Зайцева – к верхненормальным ($C_v = 29\text{--}40\%$).

Результаты проверки статистической достоверности различий фитомассы на разных участ-

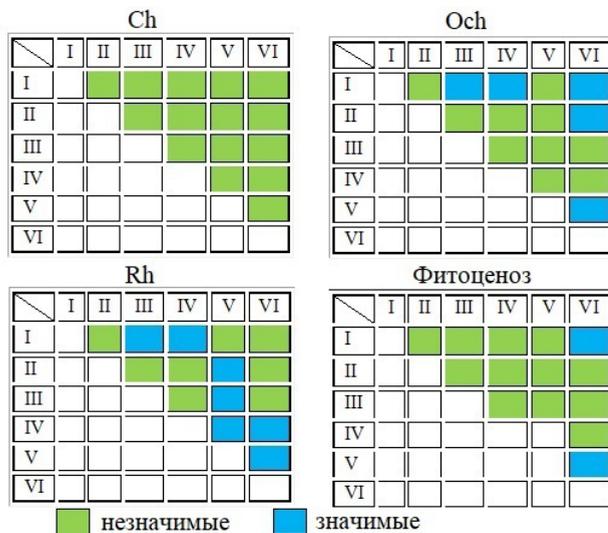


Рис. 3. Статистическая оценка различий в выборке данных по фитомассе на разных участках Западного берега Крыма

Fig. 3. Statistical evaluation of differences in the sample of phytomass data in different areas of the Western coast of Crimea

ках на западе Крымского полуострова с помощью t-критерия Стьюдента (уровень значимости $L=0.05$, число степеней свободы $f=34$, $t_{кр}=2.032$; $f=38$, $t_{кр}=2.024$; $f=42$, $t_{кр}=2.018$; $f=46$, $t_{кр}=2.013$) показали их недостоверность у Ch и в большинстве случаев у фитобентоса (рис. 3).

Для зеленых водорослей, помимо объема и качества выборки данных, это скорее обусловлено широкой экологической валентностью большинства их видов, позволяющей занимать разнообразные по экологическим условиям местообитания. Виды других отделов проявляют повышенную чувствительность к качеству среды обитания, поэтому зона значимости различий средней фитомассы у Och и особенно у Rh распространяется на участки с разной степенью проявления естественных береговых процессов и антропогенного воздействия. Особенности условий в районе Языковой балки, большей частью связанные с антропогенным влиянием, предопределяют флористическую обособленность обитающих тут водорослей. В конце 2021 г. на берегу балки вновь началась несанкционированная выемка грунта и визуальные наблюдения свидетельствовали о повышении мутности воды не только вблизи берега, но и на расстоянии от него. Активизация оползневых процессов на участке от мыса Лукулл до мыса Тюбек, орографические и гидродинамические особенности в районе мыса Тюбек приводят к накоплению глинистых отложений, затрудняющих функционирование макроводорослей. Кроме того, на глубине ниже 5 м формируется слабонаклонная аккумулятивная равнина,

сложенная песчаным грунтом, препятствующим закреплению пропагул водорослей. Около мыса Тюбек обрывы отступают от уреза воды, образуя песчано-галечные пляжи, активно посещаемые в период рекреации. Все это не может не сказаться на составе макрофитобентоса (Евстигнеева, Танковская, 2021; Панкеева, Миронова, 2021; Горячкин и др., 2020). Из шести обследованных участков западного побережья, акватории мыса Тюбек и Языковой балки отнесены нами к территориям с экологическими рисками. Очевидно, с этим связана значимость различий средней фитомассы красных и бурых водорослей, обитающих в районе мыса Вай-Вай и упомянутых участков.

Для оценки структуры сообщества путем сопоставления некоторых характеристик входящих в него видов были применены индексы Шеннона (H) и Пиелу (E) (рис. 2). Отметим, что на охраняемых территориях побережья (I–III), а также в переходной зоне между ними (IV) и сопредельными участками (V и VI) величина индекса Пиелу наиболее близка к 1 (0.8) и свидетельствует о примерно равном распределении видов по такому признаку, как фитомасса. На сопредельных территориях, испытывающих высокую антропогенную нагрузку и влияние активных оползневых процессов, индекс выравненности видов снижен и его изменения являются зеркальными по отношению к таковым у индекса Шеннона. Среднее значение индекса H варьирует от 1.3 ± 0.5 в Языковой балке до 2.2 ± 0.3 в районе мыса Вай-Вай. Величина коэффициента C_v (14–47%) свидетельствует о том, что динамичность индекса в основном соответствует «норме» по шкале Г.Н. Зайцева.

С учетом относительной фитомассы (в %) и с привлечением шкалы количественного доминирования виды в каждом районе распределены на 3–5 групп. Максимальное разнообразие групп обнаружено в акватории мыса Тюбек. В районе мыса Вай-Вай отсутствуют представители субдоминантной и абсолютно доминантной групп (рис. 4).

Эта же система видов у мыса Маргопуло и в Языковой балке не включает доминанты, а у мыса Лукулл и в Немецкой балке – абсолютные доминанты. Среди всех групп преобладают виды малозначимой категории (77–85% от общего числа видов в каждом районе), фитомасса которых составляет менее 1% от данного показателя у всего альгоценоза. Второстепенных видов больше всего в акватории мысов Лукулл и Вай-Вай (15 и 16%), на остальных участках побережья их в половину меньше. В группу видов высоких категорий доминирования входят представители бурых водорослей – *Ericaria crinita* (Duby) Molinari et

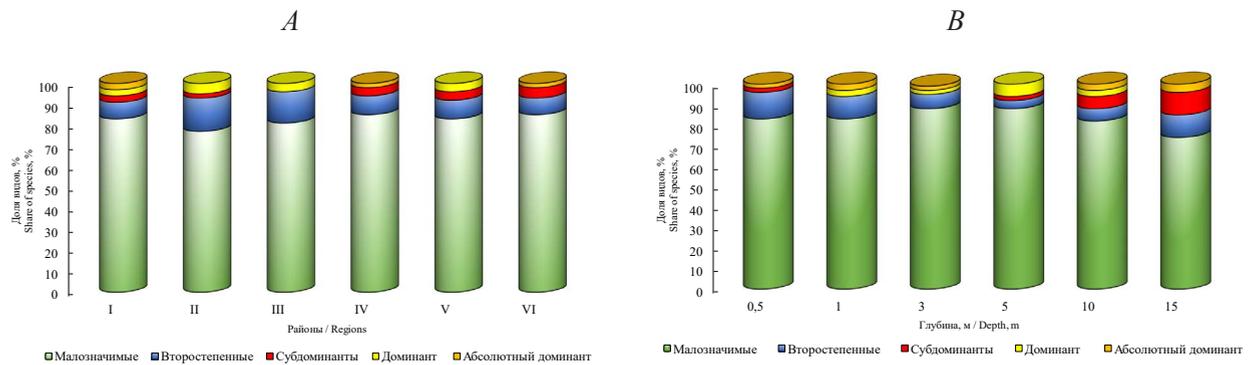


Рис. 4. Группы количественного доминирования видов на разных участках (А) и глубинах (В)
Fig. 4. Groups of quantitative species dominance at different sites (А) and depths (В)

Guiry, *Gongolaria barbata* (Stackh.) Kuntze и красных – *Vertebrata subulifera* (C. Agardh) Kuntze, *Ceramium diaphanum* (Lightf.) Roth, *Phyllophora crispa* (Huds.) P.S. Dixon, которые являются ведущими элементами черноморского фитобентоса и, за исключением *C. diaphanum*, типично морскими и олигосапробными водорослями. *E. crinita*, *G. barbata* и *Ph. crispa* к тому же известны в качестве доминантов ассоциаций, господствующих в растительном покрове Черного моря и формирующих всю зону фитали (Калугина-Гутник, 1975). Межвидовое распределение функций ключевых видов-продуцентов выглядит следующим образом: роль содоминанта и доминанта выполняет *E. crinita*, что позволяет отнести ее к факультативным доминантам, доминанта и абсолютного доминанта – *G. barbata*, исключительно содоминанта – *Ph. crispa*, *V. subulifera* и *C. diaphanum*. На рисунке 5 изображены кривые изменений абсолютной фитомассы двух ключевых видов-продуцентов черноморского фитобентоса, отражающие характер их межвидовых взаимодействий. На всех участках, кроме одного, количественно доминирует *G. barbata*. Особенно велика разница фитомассы *G. barbata* и *E. crinita* (в 3 и 8 раз) в акватории мысов Тюбек и Маргопуло, в Языковой

балке. В целом, кривые пространственных изменений анализируемой характеристики *G. barbata* и *E. crinita* имеют взаимообратный характер.

Уровень индекса Шеннона напрямую зависит от наличия видов такой категории, как абсолютный доминант. С его отсутствием связано высокое значение индекса Н (2.1 и 2.2) в фитоценозах у мысов Лукулл и Вай-Вай, на остальных участках прибрежной зоны при наличии абсолютных доминантов, на долю которых приходится 61–73%, оно ниже и варьирует от 1.3 в акватории Языковой балки до 1.8 – Немецкой.

Особенности вертикального распределения фитомассы. Анализ полученных данных показал, что на всех глубинах, кроме 15 м, основным продуцентом среди отделов являются бурые водоросли. На 15 м первая позиция принадлежит Rh, где средняя общая фитомасса отдела достигает 85% от средней фитомассы альгоценоза. На 0.5 м уровень анализируемой характеристики у Rh совпадает с таковым у Ch. В остальных случаях красные водоросли занимают вторую позицию. Для зеленых водорослей установлена обратная зависимость между глубиной обитания и величиной фитомассы. Наибольшее развитие Ch получают в условиях малых глубин, где световой режим

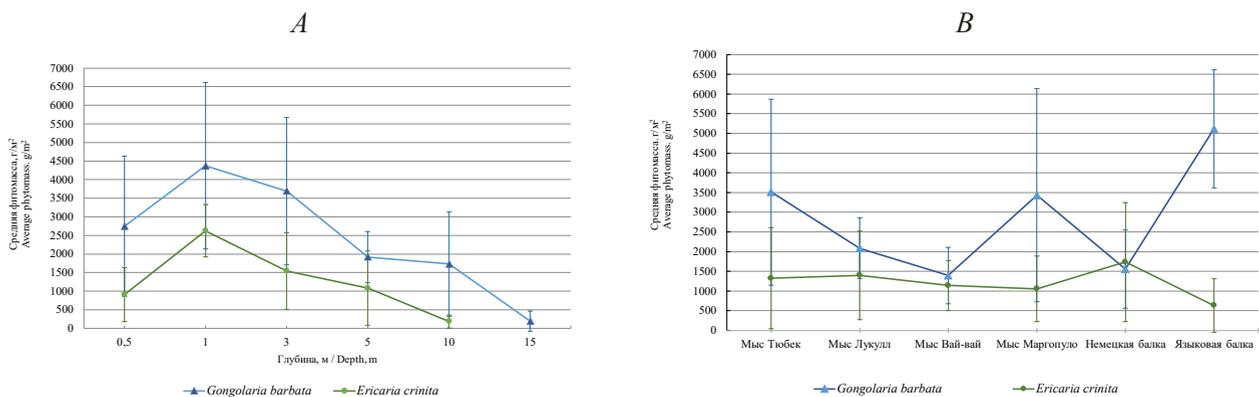


Рис. 5. Изменение абсолютной фитомассы ключевых видов-продуцентов черноморского фитобентоса по районам (А) и глубинам (В)
Fig. 5. Changes in the absolute phytomass of key producer species of the Black Sea phytobenthos by area (А) and depth (В)

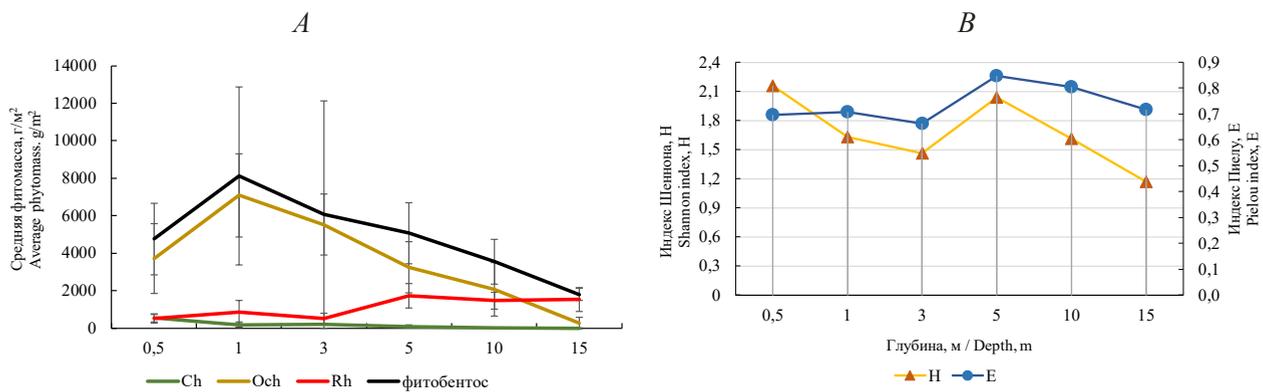


Рис. 6. Пространственное изменение средних значений фитомассы (А), индексов Шеннона и Пиелу (В) на разных глубинах в районе исследований

Fig. 6. Spatial variation of average values of phytomass (A), Shannon and Pielou indices (B) at different depths of the study area

соответствует качественному составу их свето-чувствительных пигментов (Калугина-Гутник, 1973). Известно, что при прохождении через воду свет поглощается в красной и синей областях спектра, а на глубину проникает зеленый свет, чувствительность к которому у хлорофилла низкая (Макаров, Воскобойников, 2017). Этим объясняется господство зеленых водорослей в приповерхностных слоях, глубже лидируют бурые, а на более глубоководных участках – красные. Бурые и красные водоросли способны использовать энергию зеленого света за счет дополнительных фотопигментов (Водоросли ..., 1989). Следует учесть, что подобная закономерность не является абсолютной, что подтверждено результатами наших исследований. У Och и фитобентоса в районе исследований такая зависимость фитомассы проявляется ниже глубины 1 м. У Rh взаимосвязь между глубиной обитания и уровнем исследуемого показателя не столь однозначная. На первых трех горизонтах их фитомасса примерно одинаково меньше $1.0 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$. Глубже 3 м этот показатель втрое больший. В отличие от изменений фитомассы отделов от участка к участку, ее колебания по глубинам происходят интенсивнее, особенно у зеленых водорослей ($C_v = 116\%$). Отличие крайних значений фитомассы достигает нескольких раз и даже порядков. Фитомасса Ch, средняя для исследованных горизонтов, в 6 раз меньше, чем у Rh и в 22 раза, чем у Och. Такая разница в интенсивности горизонтальных и вертикальных изменений показателя может быть объяснена следующим образом. Несмотря на существование экологически критичных для функционирования водорослей зон (акватории мыса Тюбек, Языковой и Немецкой все еще балок), условия среда обитания на обследованных участках являются более однородными в отличие от их комплексов, складывающихся на разных горизонтах фитали, среди ко-

торых важными составляющими для фототрофов остаются световой режим и прозрачность воды.

Значения индексов Шеннона и Пиелу подвержены батиметрической изменчивости (рис. 6).

Установлено, что максимум H характерен для сообщества на глубине 0,5 и 5 м, то есть на краевых границах I этажа горизонта фотофильной растительности. На глубине 0,5 м условия обитания водорослей отличаются разнообразием и высокой динамичностью, что способствует формированию здесь многовидового фитоценоза, включающего в районе исследований по одному абсолютному доминанту (*G. barbata*) и субдоминанту (*E. crinita*), а также наибольшее число второстепенных видов. На глубине 5 м индекс Шеннона немногим ниже, а в сообщество входят два доминанта (*G. barbata*, *V. subuliera*), столько же содоминантов (*E. crinita*, *Laurencia obtusa* (Huds.) J.V. Lamour.) и втрое меньшее, чем на 0,5 м, количество второстепенных видов. Начиная с глубины 1 м, кривые изменений индексов Шеннона и Пиелу повторяют друг друга. Снижение их значений наблюдается в диапазоне глубин от 1 до 3 м, а также ниже 5 м до границы обитания макроводорослей. На глубине 15 м 75% общей фитомассы приходится на долю абсолютного доминанта *Ph. crispa*. Такому структурному «перекоосу» на нижней границе обитания водорослей соответствует существенное отклонение величины индекса E от 1. В зоне от 3 до 5 м уровень индексов возрастает так, что высокой величине H соответствует наименьшее отклонение E от 1. Тем не менее, среднее для исследованной части фитали значение H невелико, а отклонение величины индекса E от 1 не столь существенно, что показывает относительно равномерное распределение видов по глубинам по абсолютной фитомассе.

На рисунке 5 представлены кривые батиметрических вариаций фитомассы основных ви-

Таблица. Статистическая оценка различий в выборке данных по фитомассе на разных глубинах
Table. Statistical evaluation of differences in the sample of phytomass data at different depths

Глубина, м Depth, m	Chlorophyta			Ochrophyta			Rhodophyta			Ценоз / Cenosis		
	t _{эмп}	P	Гипотеза Hypothesis									
0.5–1.0	0.1	0.89	H ₀	2.8	6.9×10 ⁻³	H ₁	1.6	0.1	H ₀	3.1	3.8×10 ⁻³	H ₁
0.5–3.0	6.6	1.0×10 ⁻⁶	H ₁	2.1	3.9×10 ⁻²	H ₁	0.01	1.0	H ₀	1.1	0.3	H ₀
0.5–5.0	5.4	2.0×10 ⁻⁶	H ₁	0.8	0.45	H ₀	0.8	0.4	H ₀	0.1	0.9	H ₀
0.5–10	6.6	1.0×10 ⁻⁶	H ₁	1.8	0.1	H ₀	3.6	1.0×10 ⁻³	H ₁	1.2	0.2	H ₀
1.0–3.0	1.4	0.2	H ₀	1.9	0.1	H ₀	1.5	0.1	H ₀	2.3	0.03	H ₁
1.0–5.0	1.2	0.2	H ₀	4.3	9.9×10 ⁻⁵	H ₁	0.6	0.6	H ₀	3.7	5.6×10 ⁻⁴	H ₁
1.0–10.0	1.4	0.1	H ₀	5.2	1.0×10 ⁻⁵	H ₁	1.9	7.0×10 ⁻³	H ₁	5.0	0.2×10 ⁻⁴	H ₁
3.0–5.0	2.6	0.01	H ₁	5.1	0.6×10 ⁻⁵	H ₁	0.8	0.4	H ₀	1.5	0.1	H ₀
3.0–10.0	0.1	0.5	H ₀	6.9	1.0×10 ⁻⁵	H ₁	3.5	1.0×10 ⁻³	H ₁	2.8	0.7×10 ⁻²	H ₁
5.0–10.0	2.6	0.02	H ₁	1.3	0.2	H ₀	0.1	0.9	H ₀	1.4	0.2	H ₀

дов-продуцентов *E. crinita* и *G. barbata*. В этой паре видов наибольшее развитие получает *G. barbata*, сам же ход изменений их фитомассы по глубинам имеет идентичный характер, чем и отличается от такового на разных участках побережья. Для обоих видов максимум фитомассы приходится на глубину 1 м, после которой происходит постепенное снижение показателя с достижением минимума на нижней границе их распространения (у *G. barbata* – на 15 м, у *E. crinita* – на 10 м). Необходимо отметить, что на 15 м водоросли были обнаружены только на двух из шести обследованных участков. Среди видов количественно преобладает *Ph. crispa*, а *G. barbata* и *E. crinita* переходят в ранг субдоминантных и даже второстепенных структурных компонентов.

Состав групп с разной степенью доминирования видов проявляет зависимость от глубины обитания водорослей (рис. 4). Доля лидирующих малозначимых видов увеличивается в диапазоне глубин от 0.5 до 5 м, второстепенных – от 0.5 до 10 м. Обе группы имеют 100%-ную встречаемость. Разнообразие групп доминирования полностью представлено только на 10 м.

Выявлена многовариантность батиметрических вариаций значений индекса Н: обратная зависимость между глубиной и значением индекса у мыса Вай-Вай, прямая, но до определенного горизонта – у мыса Маргопуло и в Немецкой балке. Возможны варианты, когда значения индекса остаются примерно на одном уровне или их изменения носят колебательный характер.

С привлечением t-критерия Стьюдента была проверена гипотеза о равенстве средних величин биомассы отделов и всего сообщества макроводорослей на разных глубинах (уровень значимости $L=0.05$; число степеней свободы $f=46$, $t_{кр}=2.013$; при сравнении выборок на глубине 10 м $f=34$,

$t_{кр}=2.032$). Выяснено, что область значимости различий фитомассы Ch приходится на глубину 0.5 м при сравнении ее с фитомассой на 3, 5 и 10 м, а также при попарном сопоставлении этого показателя на 3 и 5 м, 5 и 10 м (табл.). Фитомасса альгоценоза и Och является статистически зависимой от глубины, у Rh такая взаимосвязь имеет случайный характер.

Заключение

В ходе проведенных исследований получены данные о величине биомассы макрофитобентоса и составляющих его групп и отдельных видов на западном побережье Крымского полуострова. Установлено, что в бентосных сообществах региона ключевыми продуцентами среди отделов является Ochrophyta, среди видов – *V. subulifera*, *E. crinita*, *G. barbata*, *C. diaphanum* и *Ph. crispa*. В общем составе преобладают малозначимые виды, фитомасса которых не превышает 1% от таковой у сообщества.

Показано, что локация крайних значений средней фитомассы каждого отдела не совпадает, ход изменений показателя от участка к участку у Ochrophyta и альгоценоза носит идентичный характер, у красных и бурых водорослей он взаимно зеркальный.

Выявлена обратная связь между глубиной обитания и величиной фитомассы Chlorophyta, которая у Ochrophyta и всего альгоценоза проявляется глубже 1 м и не является столь однозначной у Rhodophyta. Вертикальная изменчивость фитомассы (по глубинам) отличается большей интенсивностью, чем горизонтальная (от участка к участку), что связано с разной степенью качественной однородности среды обитания на обследованных участках и горизонтах фитали у западных берегов Крымского полуострова.

Выполнен расчет индексов Шеннона и Пиелу для альгоценоза на разных глубинах в акватории охраняемых и неохраняемых участков берега. Отмечено, что на охраняемых территориях величина индекса Пиелу, наиболее близкая к 1 (0.8), свидетельствует о примерно равном распределении видов по фитомассе. На сопредельных участках с высокой антропогенной нагрузкой и активными оползневными процессами, индекс Е ниже и его изменения являются зеркальными по отношению к подобным у индекса Шеннона.

Максимум индекса Шеннона характерен для сообщества на краевых границах первого этажа горизонта фотофильной растительности (0.5 и 5 м). Среднее для исследованной части фитали значение индекса Шеннона и степень отклонения величины индекса Пиелу от 1 показывают относительно равномерное распределение видов по показателю абсолютной фитомассы на разных глубинах.

Проверка статистической значимости различий фитомассы на разных участках западного берега показала их недостоверность у Chlorophyta и в большинстве случаев – у сообщества в целом. Статистически зависимой от глубины обитания является общая фитомасса макроводорослей и среди них – бурых.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН (проект № 121030300149-0).

Список литературы

1. Баканов А.И. Количественная оценка доминирования в экологических сообществах // Количественные методы экологии и гидробиологии. Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. С. 37–68.
2. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. М.: Горячая линия, Телеком, 2013. 288 с.
3. Водоросли. Справочник. Киев: Наукова думка, 1989. 608 с.
4. Горячкин Ю.Н., Долотов В.В. Морские берега Крыма. Севастополь: Морской гидрофизический институт РАН, 2019. 256 с.
5. Горячкин Ю.Н., Федоров А.П., Долотов В.В., Удовик В.Ф. Природные условия и антропогенное изменение береговой зоны в районе пос. Кача // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. №4. С. 5–21. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-5-21
6. Грузинов В.М., Дьяков Н.Н., Мезенцева И.В., Мальченко Ю.А., Жохова Н.В., Коршенко А.Н. Источники загрязнения прибрежных вод Севастопольского района // Океанология. 2019. Т. 59, №4. С. 579–590. doi.org/10.31857/S0030-1574594579-590
7. Дьяков Н.Н., Мальченко Ю.А., Липченко А.Е., Боброва С.А., Тимошенко Т.Ю. Гидролого-гидрохимические характеристики прибрежных вод Крыма и необходимые мероприятия по снижению уровня загрязнения рекреационных зон // Труды ГОИН. 2020. №221. С. 163–194.

8. Евстигнеева И.К., Танковская И.Н. Гидробиологические исследования охраняемой акватории Западного Крыма (Черное море) // Фиторазнообразии Восточной Европы. 2021. Т. 15, №4. С. 16–33. <https://doi.org/10.24412/2072-8816-2021-15-4-16-33>.

9. Евстигнеева И.К., Танковская И.Н. Разнообразие и изменчивость фитобентоса Западного побережья Крымского полуострова // Российский журнал прикладной экологии. 2022. №2. С. 20–32. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.2.20.32>.

10. Жукова А.А., Минец М.Л. Биометрия. Описательная статистика. Минск: БГУ, 2019. Ч. 1. 100 с.

11. Зайцев Г.Н. Математика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1990. 296 с.

12. Зинова А.Д. Определитель зеленых, бурых и красных водорослей южных морей СССР. М.–Л.: Наука, 1967. 397 с.

13. Калугина А.А. Исследование донной растительности Черного моря с применением легководолазной техники // Морские подводные исследования. М., 1969. С. 105–113.

14. Калугина-Гутник А.А. Фитобентос южного побережья Крыма и его фитогеографический состав // Гидробиологические исследования северо-восточной части Черного моря. Ростов на Дону, 1973. С. 50–68.

15. Калугина-Гутник А.А. Фитобентос Черного моря. Киев: Наукова думка, 1975. 248 с.

16. Макаров М.В., Воскобойников Г.М. Влияние освещенности и температуры на макроводоросли Баренцева моря // Вопросы современной альгологии. 2017. №3(15). URL: <http://algology.ru/1183>.

17. Мильчакова Н.А., Александров В.В., Бондарева Л.В., Панкеева Т.В., Чернышева Е.Б. Морские охраняемые акватории. Научный справочник. Симферополь: Н. Орианда, 2015. 312 с.

18. Панкеева Т.В., Миронова Н.В., Пархоменко А.В. Ландшафтные исследования памятника природы «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Лукулл» // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2021. №2. С. 36–48.

19. Панкеева Т.В., Миронова Н.В. Ландшафтная структура западного побережья города Севастополя // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2021. Т. 7, №2. С. 276–291.

20. Розенберг Г.С. Информационный индекс и разнообразие: Больцман, Котельников, Шеннон, Уивер ... // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2010. Т. 19(2). С. 4–25.

21. Рябушко В.И., Щуров С.В., Ковригина Н.П., Лисицкая Е.В., Пospelова Н.В. Комплексные исследования экологического состояния прибрежной акватории Севастополя (Западный Крым, Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. №1. С. 103–118. doi: 10.22449/2413-5577-2020-1-103-118

22. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2022. <http://www.algaebase.org>. [Дата обращения: 15.12.2022].

References

1. Bakanov A.I. Kolichestvennaya ocenka dominirovaniya v ekologicheskikh soobshchestvakh [Quantitative assessment of dominance in ecological communities] // Kolichestvennye metody ekologii i gidrobiologii [Quantitative methods of ecology and hydrobiology]. Tolyatti: Samara Scientific Center RAS, 2005. P. 37–48.
2. Borovikov V.P. Populyarnoe vvedenie v sovremennyj analiz dannyh v sisteme STATISTICA [Popular introduction to modern Data Analysis in STATISTICA]. Moscow: Hot Line –

Telecom, 2013. 288 p.

3. Vodorosli. Spravochnik [Algae. Handbook]. Kiev: Naukova Dumka, 1989. 608 p.

4. Goryachkin Yu.N., Dolotov V.V. Morskie berega Kryma [Sea shores of the Crimea], Sevastopol, 2019. 256 p.

5. Goryachkin Yu.N., Fedorov A.P., Dolotov V.V., Udovik V.F. Prirodnye usloviya i antropogennoe izmenenie beregovoy zony v rajone pos. Kacha [Natural conditions and anthropogenic changes in the coastal zone in the area of Kacha village] // *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon moray* [Ecological safety of the coastal and shelf zones of the sea]. 2020. No 4. P. 5–21. doi: 10.22449 / 2413-5577-2020-4-5-21.

6. Gruzinov V.M., D'yakov N.N., Mezenceva I.V., Mal'chenko YU.A., Zhohova N.V., Korshenko A.N. Istochniki zagryazneniya pribrezhnyh vod Sevastopol'skogo rajona [Sources of pollution of coastal waters of Sevastopol district] // *Okeanologiya* [Okeanologiya]. 2019. Vol. 59. No 4. P. 579–590. doi.org/10.31857/S0030-1574594579-590

7. D'yakov N.N., Mal'chenko Yu.A., Lipchenko A.E., Bobrova S.A., Timoshenko T.YU. Gidrologo-gidrohimicheskie karakteristiki pribrezhnyh vod Kryma i neobhodimyye meropriyatiya po snizheniyu urovnya zagryazneniya rekreacionnyh zon [Hydrological and hydrochemical characteristics of coastal waters of the Crimea and the necessary measures to reduce the level of pollution of recreational areas] // *Trudy GOIN* [Proceedings of SOIN]. 2020. No 221. P. 163–194.

8. Evstigneeva I.K., Tankovskaya I.N. Gidrobotanicheskie issledovaniya ohranyaemoj akvatorii Zapadnogo Kryma (Chernoe more) [Hydrobotanical surveys of the protected water area of the Western Crimea (Black sea)] // *Fitoraznoobrazie Vostochnoj Evropy* [Eastern European Phytodiversity]. 2021. Vol. 15, No 4. P. 16–33. https://doi.org/10.24412/2072-8816-2021-15-4-16-33

9. Evstigneeva I.K., Tankovskaya I.N. Raznoobrazie i izmenchivost' fitobentosa Zapadnogo pribrezh'ya Krymskogo poluostrava [Diversity and variability of phytobenthos in the western coastal area of the Crimean peninsula] // *Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii* [Russian Journal of Applied Ecology]. 2022. No 2. P. 20–32. https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.2.20.32.

10. Zhukova A.A., Minets M.L. Biometriya. Opisatel'naya statistika [Biometrics, Descriptive statistics]. Ucheb. posobie. Minsk: BGU, 2019. Ch. 1. 100 p.

11. Zajcev G.N. Matematika v eksperimental'noj botanike [Mathematics in experimental botany]. Moscow: Nauka, 1990. 296 p.

12. Zinova A.D. Opredelitel' zelenyh, buryh i krasnyh vodoroslej yuzhnyh morej SSSR. [Guide for identification of green, brown and red algae of the southern seas of the USSR] Moscow–Leningrad: Nauka, 1967. 397 p.

13. Kalugina A.A. Issledovanie donnoj rastitel'nosti Chernogo morya s primeneniem legkovodolaznoj tekhniki [Morskie podvodnye issledovaniya Study on bottom vegetation of the Black Sea by means of light diving equipment] // *Morskie podvodnye issledovaniya* [Marine Underwater Research]. Moscow, 1969. P. 105–113.

14. Kalugina-Gutnik A.A. Fitobentos Chernogo morya [Phytobenthos of the Black Sea]. Kiev: Naukova dumka, 1975. 248 p.

15. Kalugina-Gutnik A.A. Fitobentos yuzhnogo poberezh'ya Kryma i ego fitogeograficheskij sostav [Phytobenthos of the southern coast of Crimea and its phytogeographic composition] // *Gidrobiologicheskie issledovaniya severo-vostochnoj chasti Chernogo moray* [Hydrobiological studies of the northeastern part of the Black Sea]. Rostov na Donu, 1973. P. 50–68.

16. Makarov M. V., Voskoboynikov G.M. Vliyanie osveshcheniya i temperatury na makrovodorosli Barenceva

morya [Influence of light and temperature on Barents sea seaweed] // *Voprosy sovremennoj al'gologii* [Issues of modern algology]. 2017. No 3. URL: <http://algology.ru/1183>.

17. Milchakova N.A., Alexandrov V.V., Bondareva L.V., Pankeyeva T.V., Chernysheva E.B. Morskie ohranyaemye akvatorii. Nauchnyj spravochnik [Marine protected areas of Crimea. Scientific Handbook]. Sevastopol': N. Orianda, 2015. 312 p.

18. Pankeeva T.V., Mironova N.V., Parhomenko A.V. Landshaftnye issledovaniya pamyatnika prirody «Pribrezhnyj akval'nyj kompleks u mysy Lukull» [Landscape studies of the natural monument «Coastal aquatic complex at Cape Lukull»] // *Trudy Karadagskoj nauchnoj stancii im. T.I. Vyazemskogo – prirodno zapovednika RAN* [Proceedings of the Karadag Scientific station named after T.I. Vyazemsky – Nature Reserve of the RAS]. 2021. No 2. P. 36–48.

19. Pankeeva T.V., Mironova N.V. Landshaftnaya struktura zapadnogo pribrezh'ya goroda Sevastopolya [Landscape structure of the western coastal area of Sevastopol] // *Geopolitika i ekogeodinamika regionov* [Geopolitics and ecogeodynamics of regions]. 2021. Vol. 7, No 2. P. 276–291. https://doi.org/10.37279/2309-7663-2021-7-2-272-287.

20. Rosenberg G.S. Informacionnyj indeks i raznoobrazie: Bol'cman, Kotel'nikov, Shennon, Uiver ... [Information index and diversity: Boltzmann, Kotelnikov, Shannon, Weaver ...] // *Samarskaya Luka: problemy regional'noj i global'noj ekologii* [Samarskaya Luka: Problems of regional and global ecology]. 2010. Vol. 19, No 2. P. 4–25.

21. Ryabushko V.I., Shchurov S.V., Kovrigina N.P., Lisitskaya E.V., Pospelova N.V. Kompleksnye issledovaniya ekologicheskogo sostoyaniya pribrezhnoj akvatorii Sevastopolya (Zapadnyj Krym, Chernoe more) [Comprehensive studies of the ecological state of the coastal water area of Sevastopol (Western Crimea, Black sea)] // *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon moray* [Ecological safety of the coastal and shelf zones of the sea]. 2020. No 1. P. 103–118. doi: 10.22449 / 2413-5577-2020-1-103-118.

22. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2022. <http://www.algaebase.org>. [Date accessed 15.12.2022].

Evstigneeva I.K., Tankovskaya I.N. **Macrophytobenthos biomass and its distribution along the western coast of the Crimean peninsula (Black Sea).**

The article presents the results of the study of macrophytobenthos biomass in six areas of the western coast of Crimea (the water areas of the Tyubek, Lukull, Vai Vai, Margopulo, Nemetskaya and Yazykovaya gullies). It was shown that in the communities of this region the key producer among the divisions is *Oschorhota*, among the species - *Vertebrata subulifera*, *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata*, *Ceramium diaphanum* and *Phyllophora crispa*. An uneven distribution of species and phytobenthos biomass in areas with different degrees of natural coastal processes and anthropogenic impact was noted. Peculiarities of algae biomass distribution of three divisions by depth were determined. It was found that the

bathymetric changes in phytomass are more intense than from site to site. Shannon and Pielou indices were calculated to estimate species diversity and biomass uniformity. It was shown that the Pielou index in the protected areas is much closer to 1 than in the areas with high anthropogenic load. The average value of the Shannon index for the studied part of the phytale indicates some uniformity in the distribution of species in absolute phytomass at different depths. Statistical significance of differences in phytomass at different sites and depths was determined using Student's t-criterion. Based on relative phytomass data (%) and taking into account E.L. Lubarsky's scale, the degree of species quantitative dominance was estimated.

Keywords: macrophytobenthos; biomass; spatial variability; western coast of Crimea; the Black Sea.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 22.12.2022

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 17.02.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 09.03.2023

Информация об авторах

Евстигнеева Ирина Константиновна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», 299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2, E-mail: ikevstigneeva@gmail.com.

Танковская Ирина Николаевна, младший научный сотрудник, ФГБУН «ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», 299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2, E-mail: itankovskay@gmail.com.

Information about the authors

Irina K. Evstigneeva, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, 2, Nakhimov av., Sevastopol, 299011, Russia, E-mail: ikevstigneeva@gmail.com.

Irina N. Tankovskaya, Junior Researcher, A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, 2, Nakhimov av., Sevastopol, 299011, Russia, E-mail: itankovskay@gmail.com.

