

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ ДОННОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ РЕКРЕАЦИОННОЙ ЗОНЫ КАРАДАГСКОГО ЗАПОВЕДНИКА (ЧЁРНОЕ МОРЕ) С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ *

Артёмов Ю. Г.

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

Аннотация: Основная идея использования акустического метода для районирования подводных ландшафтов рекреационных зон Южного берега Крыма состоит в оперативном определении границ пригодных для заселения макроводослями твёрдых валунно-глыбовых субстратов, а также рыхлых песчаных и илистых грунтов, где многие участки дна заселены морскими травами. Разработаны методы определения акустическим методом проективного покрытия, высоты талломов макрофитобентоса, а также пространственного распределения их биообъёма и биомассы. Применение гидроакустических методов при исследовании макрофитобентоса в особо охраняемых морских территориях способствует оптимизации длительного и трудоёмкого процесса сбора данных и снижению негативного трансформирующего воздействия на объект исследования. По данным акустических исследований в морской акватории рекреационной зоны Карадагского заповедника в августе 2022 г. и сентябре 2023 г. впервые определены бесконтактным способом следующие характеристики фитоценоза *Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry (= *Cystoseira crinita*) и *Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze (= *Cystoseira barbata*): границы распространения, высота талломов, проективное покрытие. Определено, что площадь морского дна, населённая фитоценозом *Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata*, составляет 0.15 км². Получены оценки биообъёма зарослей *E. crinita* и *G. barbata* и их суммарные запасы на исследованной площади (420–1020 т).

Ключевые слова: *Gongolaria barbata*, *Ericaria crinita*, акустические методы, биообъём, запасы, Карадаг, Крым, Чёрное море

Введение

Макрофитобентос является важным компонентом прибрежной экосистемы. Многие виды морских растений обеспечивают критическую среду обитания для сотен видов рыб и беспозвоночных на ранних стадиях их развития. Возможность количественной оценки и картирование донной растительности приобретают особое значение в условиях, когда береговая линия претерпевает серьёзные изменения, связанные с крупномасштабными прибрежными и промышленными разработками, приводящими к деградации некоторых важных прибрежных районов обитания морской фауны.

Для исследования донной растительности могут быть использованы разнообразные методы. Эти методы варьируют в зависимости от усилий, которые необходимо затратить либо для оценки состояния макрофитобентоса на большой площади, либо в очень узкой области исследований в рамках экспертизы строительных проектов. Методы исследований могут быть разделены на три группы: контактные (1), дистанционные в воздушной среде (2) и дистанционные в водной среде (3).

*Работа выполнена в рамках государственного задания по теме НИР № 124030100127-7 «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемотропических 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».

Методом, не связанным с ограничениями, присущими длительным и трудоёмким контактными методами или возникающими вследствие изменчивости параметров окружающей среды, является использование гидроакустики для измерения количества акустической энергии, рассеянной донной растительностью. В сочетании с высокоточными системами GPS и современными технологиями обработки акустических сигналов гидроакустика обеспечивает быстрое и эффективное средство для сбора данных на обширных территориях со значительным пространственным разрешением. Такие данные могут использоваться для разграничения районов с различными характеристиками пространственного распределения макроводорослей или других видов донной растительности, а также для оценки скорости их роста, что имеет важное значение для сохранения условий воспроизводства рыбных запасов, определения промыслового потенциала морских водорослей.

Материал и методы

Эхосъёмка морской акватории рекреационной зоны Карадагского заповедника Южного берега Крыма проводилась с борта надувной лодки с подвесным мотором типа NAVIGATOR 610. Для проведения акустических исследований использовались многофункциональные эхолоты/картплоттеры Lowrance Elite 7 Ti и Lowrance HDS 7Live. Оба эхолота поддерживают технологии CHIRP и StructureScan [Lowrance HDS Live] и сочетают в себе функции вертикального и бокового акустического сканирования. Всего в эхолоте предусмотрено четыре отдельных канала передачи сигналов: канал гидролокатора с направленным вертикально вниз звуковым лучом конической формы (далее — СОНАР), он дополнен тремя каналами «структурного сканирования» (StructureScan, по терминологии фирмы Lowrance) с узкой в продольном и широкой в поперечном направлении формой звуковых лучей, из которых два канала предназначены для направленных под углом к вертикали по левому и правому бортам судна датчиков гидролокатора бокового обзора (далее — ГБО) и канал — для датчика направленного вниз структурного сканирования (НСС). Координаты текущего положения эхолота в ходе эхосъёмки определяются встроенной антенной системы глобального позиционирования с поддержкой технологий повышения точности WAAS/EGNOS/MSAS.

Встроенное в эхолот Lowrance HDS цифровое устройство записи данных на флеш-карту обеспечивает возможность накопления результатов эхосъёмки, в том числе: маршрут движения в акватории водоёма, данные структурного сканирования и ГБО, полные профили обратного рассеяния звука на частоте 200 кГц в столбе воды.

Анализ накопленных данных выполнялся с использованием программы постобработки акустических данных WaveLens [Artemov, 2006] и системы MatLab, содержащей в своём составе мощный набор математических функций обработки цифровых данных [MatLab], а визуализация и анализ данных структурного сканирования обеспечивался пакетом программ ReefMaster [ReefMaster].

Акустическая съёмка выполнялась на участке акватории, ограниченной на западе мысом Биостанция и скалой Золотые Ворота на востоке. Покрытие наблюдениями исследованного участка, по данным датчика ГБО, приведено на рис. 1.

Ранее было установлено [Артёмов и др., 2019], что сообщества макроводорослей *Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry (= *Cystoseira crinita*) и *Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze (= *Cystoseira barbata*) являются сильными звукорассеивателями вследствие значительной разности акустического сопротивления (импеданса) воздуха, содержащегося в органах и тканях, и морской воды, что существенно повышает результативность детектирования и определения их характеристик акустическими методами.

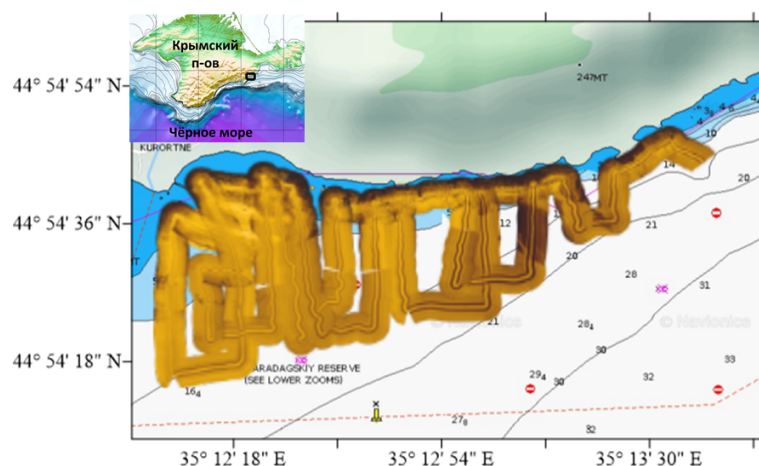


Рис. 1. Покрытие наблюдениями исследованного участка, по данным датчика ГБО. На врезке расположение района исследований обозначено прямоугольной меткой

Основной алгоритм обнаружения макроскопической донной растительности (МДР) по данным СОНАРа заключается в анализе формы эхосигнала непосредственно над морским дном [Sabot et al., 2002]. Импульс энергии испускается вертикально направленной антенной эхолота и распространяется в воде. Когда акустический импульс встречает пелагических морских животных, растительность, дно и слои донных осадков, энергия отражается обратно к акустическому преобразователю, который регистрирует амплитуду эхосигнала. Для каждой посылки зондирующего сигнала (или пинга) алгоритм находит глубину дна, от которого, как правило, поступает самый сильный эхосигнал. Донная растительность обычно различается как непрерывный вертикальный эхосигнал непосредственно над дном, который характеризуется более слабой интенсивностью, чем обратное рассеяние от дна, но более сильной, чем фоновый сигнал (то есть МДР «растягивает» вверх передний фронт сигнала от дна). Пинг классифицируется как «успешный» или «неуспешный» в зависимости от высоты купола МДР над дном. Если высота купола больше, чем заданная оператором минимальная ожидаемая высота донной растительности, и меньше, чем максимальная ожидаемая высота, то пинг классифицируется как «успешный» (рис. 2).

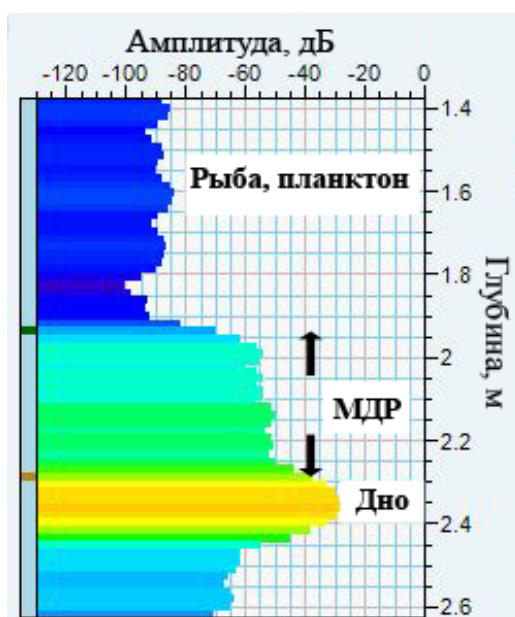


Рис. 2. Основные элементы алгоритма обнаружения донной растительности

В противном случае пинг классифицируется как «неуспешный», поскольку он отражается либо от голого дна, либо от постороннего, вертикально протяжённого объекта, например рыбной стаи или метанового сипа.

Процесс повторяется для серии пингов на заданном интервале пути судна, например 1, 5 или 10 м. По завершении серии пингов вычисляются осреднённые статистические параметры МДР: 1) проективное покрытие растительности (ППР, относительное количество «успешных» пингов); 2) средняя высота купола зарослей МДР над дном (длина макрофитов H_B), оценённая по «успешным» пингам:

$$H_B = H_2 - H_1, \quad (1)$$

где H_1 — расстояние от антенны эхолота до вершины зарослей макрофитов, а H_2 — до их основания (то есть до морского дна).

С учётом полученных значений параметров рассчитывались, в соответствии с [Thomas et al., 1990], акустические оценки биообъёма зарослей МДР: $B = H_B \cdot \Pi \cdot 1/100 \text{ м}^3$, где H_B — высота зарослей (м), Π — проективное покрытие (% от площади дна 1 м^2). Для получения абсолютных значений запасов макрофитов необходимо установление зависимости между растительной биомассой МДР над квадратным метром и её биообъёмом для определённых районов с определённым типом ДР в определённые сезоны.

Результаты исследований

Как известно из данных предыдущих исследований [Калугина-Гутник, 1976], для фитобентоса прибрежных акваторий Карадага характерна чёткая вертикальная поясность, причём на распределение водорослей по глубинам влияет прозрачность воды и характер грунтов.

На глубинах 1–10 м структурной доминантой фитоценозов твёрдых скальных грунтов являются макроводоросли видов *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata*, на которые также приходятся основные запасы МДР. Расселение эрикариево-гонголариевого фитоценоза на больших глубинах ограничивается песчано-ракушечниковыми и илистыми грунтами, где широко распространены две разновидности морской травы — *Zostera marina* L. и *Zostera noltii* Hornem.

При визуальном анализе графика, отображающего выходные данные локатора бокового обзора (мозаика ГБО), отчётливо различаются твёрдые скальные грунты (глыбовые и валунно-глыбовые), пригодные для заселения бурными водорослями (рис. 3).

Пространственно валунно-глыбовые субстраты распределены вдоль прибрежных участков и в западной части исследованной акватории не встречаются дальше 150–200 м от береговой линии и не далее 90–100 м в восточной части.

По данным акустических исследований в морской акватории рекреационной зоны Карадагского заповедника в августе 2022 г. и сентябре 2023 г. впервые определены бесконтактным способом следующие характеристики фитоценоза *E. crinita* и *G. barbata*: границы распространения, высота талломов и проективное покрытие. Получены акустические оценки биообъёма фитоценоза *E. crinita* и *G. barbata* (B , м^3). Осреднённые по 10-метровым отрезкам пройденного судном пути значения биообъёма (B , м^3) не превышали 0.4 м^3 (рис. 4).

Приведенные на рис. 4 данные показывают, что участок твёрдого дна, который может служить субстратом для эрикариево-гонголариевого фитоценоза, ограничивается изобатой 11 м, а его площадь составляет 0.5 км^2 (рис. 5).

Для участка твёрдых скальных грунтов (рис. 5) получены акустические оценки пространственного распределения биообъёма зарослей *E. crinita* и *G. barbata* на регулярной пространственной сетке с равномерным шагом приближённо 10 м (рис. 6).

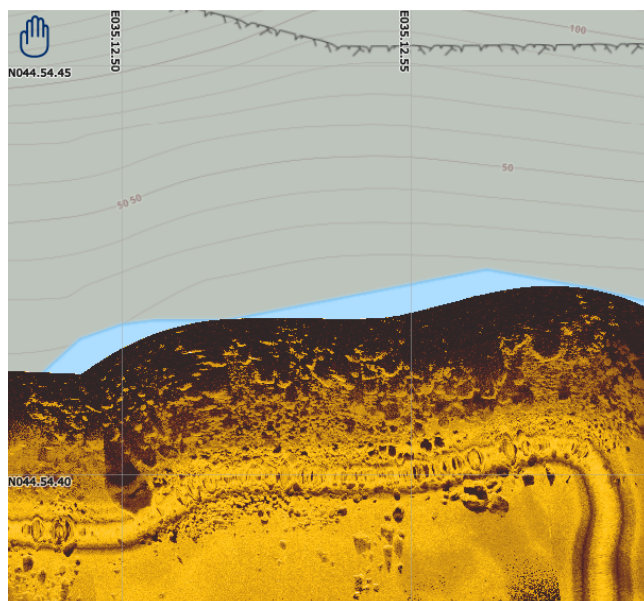


Рис. 3. Отображение твёрдых скальных грунтов (глибовых и валунно-глибовых) на мозаике ГБО

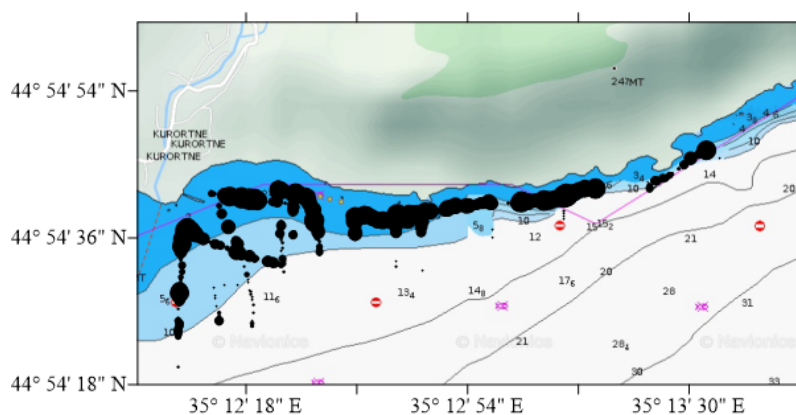


Рис. 4. Пространственное распределение биообъёма (Б, м³) зарослей макроводорослей *E. crinita* и *G. barbata* в морской акватории рекреационной зоны Карадагского заповедника

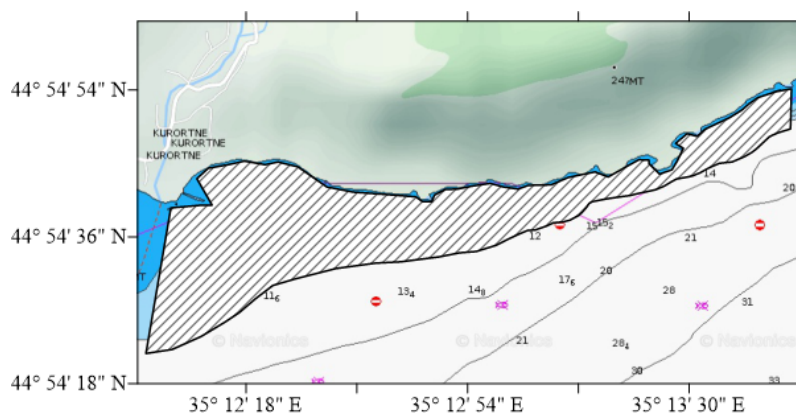


Рис. 5. Участок твёрдых грунтов на карте глубин исследованного района. Площадь заштрихованного участка — 0.5 км²

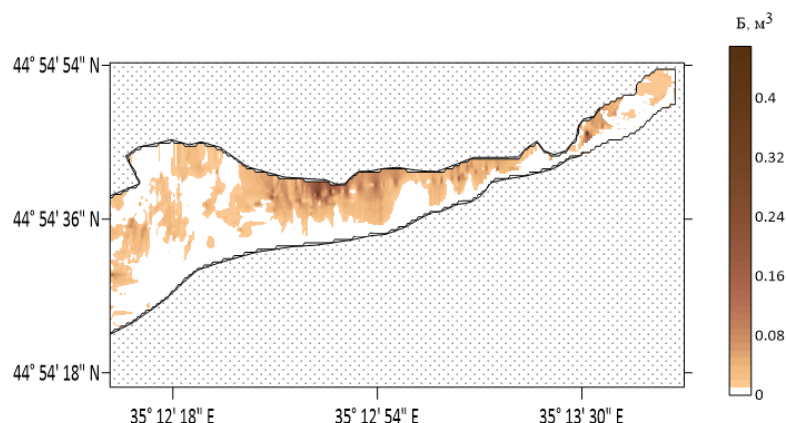


Рис. 6. Пространственное распределение биообъёма макроводорослей *E. crinita* и *G. barbata* (Б, м³) в морской акватории рекреационной зоны Карадагского заповедника

По карте (рис. 6) определено, что площадь морского дна, населённая фитоценозом *Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata*, составляет 0.15 км², а интегральная оценка его биообъёма на указанной площади составляет 4600 м³. С учётом ранее установленных средних значений биомассы эрикариево-гонголариевого фитоценоза в летний сезон (с 2797 до 6739 г·м⁻² [Мильчакова, 2015]), запасы макроводорослей *Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata* на исследованной площади оценены в 420–1020 т.

Выводы

Анализ данных акустических исследований в морской акватории рекреационной зоны Карадагского заповедника в 2022–2023 гг. показал, что участки твёрдого скального грунта, который может служить субстратом для фитоценоза *Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata*, ограничивается изобатой 11 м. Оценка интегрального биообъёма эрикариево-гонголариевого фитоценоза на заселённой площади 0.15 км² составила 4600 м³. Суммарные запасы макроводорослей *Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata* на исследованной площади оценены в 420–1020 т.

Список литературы

1. Артёмов Ю. Г., Садогурская С. Е., Плугатарь Ю. В., Белич Т. В., Садогурская С. А., Евтушенко Д. Б. Гидроакустическое исследование макроскопической донной растительности в заповедной морской акватории у мыса Мартыян (Крым, Чёрное море) // Морской биологический журнал. – 2019. – Т. 4, № 3. – С. 15–25. – <https://doi.org/10.21072/mbj.2019.04.3.02>
2. Калугина-Гутник А. А. Донная растительность района Карадага Чёрного моря и ее изменения за последние 20 лет // Биология моря / АН УССР, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. – Киев : Наук. думка, 1976. – Вып. 36. – С. 3–17.
3. Мильчакова Н. А. Состояние макрофитобентоса Карадагского природного заповедника и прилегающих особо охраняемых природных территорий (Крым, Черное море) // 100 лет Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского / ГБУ НОП РК «Карадаг. природ. заповедник», ФГБУН «Ин-т мор. биол. исслед. им. А. О. Ковалевского РАН». – Симферополь : Н. Оріанда, 2015. – С. 506–523.

4. Artemov Yu. G. Software support for investigation of natural methane seeps by hydroacoustic method // Marine Ecological Journal. – 2006. – Vol. 5, № 1. – P. 57–71.
5. Lowrance HDS Live : operator manual // Lowrance Marine and Fishing Electronics / Navico Group. – URL: <https://www.lowrance.com/help-and-support> (accessed: 10.12.2024).
6. MatLab : R2020a / The MathWorks. – Natick, USA, 1994–2025. – URL: <https://www.mathworks.com> (accessed: 03.12.2024).
7. ReefMaster : version 2.0 / ReefMaster Software. – Birdham, UK, 2017. – URL: <https://reefmaster.com.au/reference2/index.htm> (accessed: 05.11.2024).
8. Sabol B. M., Melton R. E., Chamberlain R., Doering P., Haunter K. Evaluation of a digital echo sounder system for detection of submersed aquatic vegetation // Estuaries. – 2002. – Vol. 25. – P. 133–141. – <https://doi.org/10.1007/BF02696057>
9. Thomas G. L., Thiesfeld S. L., Bonar S. A., Crittenden R. N., Pauley G. B. Estimation of submergent plant bed biovolume using acoustic range information // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. – 1990. – Vol. 47, nr 4. – P. 805–812. – <https://doi.org/10.1139/f90-093>

RESEARCH OF MACROSCOPIC BOTTOM VEGETATION OF THE RECREATIONAL ZONE OF THE KARADAG RESERVE (BLACK SEA) USING HYDROACUSTIC METHODS

Artemov Yu. G.

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

Abstract: The main idea behind using the acoustic method to zone the underwater landscapes of recreational areas on the Southern Coast of Crimea is to quickly identify the boundaries of solid block-boulder substrates that are suitable for macro-layers, as well as loose sandy and silty soils where seagrasses are commonly found. For specially protected marine areas, studying the macrophytobenthos using hydroacoustic methods optimizes the long and time-consuming process of data collection. It also reduces the negative impact on the research object. According to acoustic studies conducted in the marine area of the Karadag Nature Reserve in August 2022 and September 2023, the following characteristics of the *Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry (= *Cystoseira crinita*) and *Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze (= *Cystoseira barbata*) phytocenosis were determined for the first time using a contactless method: distribution boundaries, height of thalloms, and projective coverage. It is determined that the area of the seabed inhabited by the *Ericaria crinita* + *Gongolaria barbata* phytocenosis is 0.15 km². Estimates of the biovolume of *E. crinita* and *G. barbata* thickets and their total reserves in the studied area (420–1020 tons) were obtained.

Keywords: *Gongolaria barbata*, *Ericaria crinita*, acoustic methods, biovolume, biomass, Karadag, Crimea, Black Sea

Сведения об авторе

Артёмов
Юрий
Георгиевич

кандидат географических наук, научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, yu.g.artemov@ibss-ras.ru

Поступила в редакцию 18.01.2025 г.
Принята к публикации 02.02.2025 г.