



КАРТИРОВАНИЕ МЕТАНОВЫХ СТРУЙНЫХ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ НА ВНЕШНЕЙ АКВАТОРИИ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ С ПОМОЩЬЮ РЕКРЕАЦИОННОГО ЭХОЛОТА

Ю.Г. Артёмов

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН (ФИЦ ИнБИОМ)
РФ, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2
E-mail: yu.g.artemov@gmail.com

Обследован участок струйных метанопроявлений (метановых сипов) на внешней акватории Севастопольской бухты с использованием рекреационного эхолота/картплоттера Lowrance серии Elite Ti, сочетающего в себе функции вертикального и бокового акустического сканирования и укомплектованного антенной TotalScan. В работе анализируются особенности пространственного распределения метановых струйных газовыделений, рельефа дна и акустических характеристик верхних слоев донных осадков, в том числе, индексов шероховатости (E1) и твердости (E2) морского дна. Накопленные к настоящему времени данные по геолокации метановых сипов в районе исследований указывают на их привязку к участкам мягких донных осадков, которые идентифицируются как богатое органическими веществами палео-русло р. Черная. Это обстоятельство может рассматриваться как прямое свидетельство о биогенном происхождении регистрируемых на внешней акватории Севастопольской бухты метановых сипов в результате биологического распада накопленного в палео-долине р. Черная осадочного органического материала.

Ключевые слова: метановые струйные газовыделения, Севастопольская бухта, палео-русло р. Черная, рекреационный эхолот.

Поступила в редакцию: 04.10.2023. После доработки: 02.02.2023. Принята к печати: 22.03.2024.

Введение. Впервые струйные метановые газовыделения (метановые сипы) в акватории Севастопольской бухты были обнаружены акустическим методом в 1992 г. в экспедиции на НИС «Профессор Водяницкий», оборудованном научным эхолотом Симрад ЕК-500. Впоследствии поиск и картирование метановых сипов на внешнем рейде г. Севастополя регулярно проводились в экспедициях на маломерных судах с помощью мобильных эхолотов JRC-46 и EAGLE SeaFinder 480 DF [1, 2]. Последние перечисленные эхолоты относятся к потребительскому, т.н. «рекреационному» классу, в отличие от эхолотов, принадлежащих к «геодезическому» или «научному» классам. Эхолоты для отдыха, как правило, не стандартизируются, их встроенные алгоритмы обработки акустических сигналов не раскрываются производителями, в них не используются

специальные «датчики движения», обеспечивающие корректировку направленности звукового луча при различных типах качки (крен, наклон, рыскание). Тем не менее, эти недорогие, легкие, портативные эхолоты могут быть развернуты практически на любом водном транспортном средстве. К тому же, многие модели эхолотов оборудуются многоканальными GPS-локаторами и устройствами записи полного профиля эхосигнала на внешний носитель, позволяющими выполнять пост-обработку и анализ полученных в ходе эхо-съемки данных. Эти качества недорогой и доступной технологии эхолотов являются причиной быстрого роста их популярности в таких областях, как гидрология, экология, прибрежная геоморфология в различных водных средах как морских, так и пресноводных [3, 4].

В настоящей работе продолжены работы по детектированию метановых струйных выделений у входа в Севастопольскую бухту. В работе анализируются особенности пространственного распределения метановых струйных газовыделений, рельефа дна и акустических

характеристик верхних слоев донных осадков.

Район и методы исследований. Всего в 2020-2021 гг. на маломерных судах Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН было проведено 5 эхо-съемок на внешней акватории Севастопольской бухты (рис. 1).

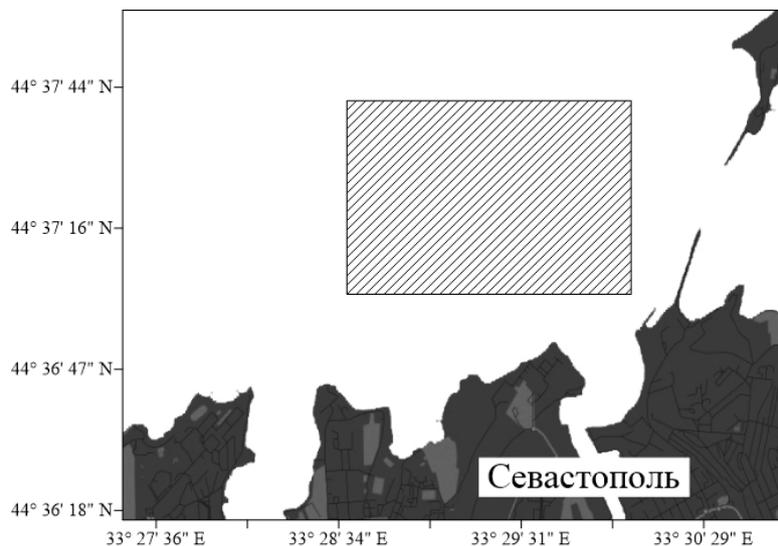


Рис. 1. Район акустических исследований отмечен заштрихованным прямоугольником
Fig. 1. The area of acoustic research is marked with a shaded rectangle

Для проведения акустических исследований площадок метановых газопровывлений впервые был применен портативный эхолот/картплоттер Lowrance серии Elite Ti с поддержкой технологий CHIRP и StructureScan [5]. Эхолот сочетает в себе функции вертикального и бокового акустического сканирования и укомплектован антенной TotalScan, собранной из четырех электроакустических преобразователей. Всего в эхолоте предусмотрено четыре отдельных канала передачи сигналов: канал сонара с направленным вертикально вниз звуковым лучом конической формы (далее – СОНАР), который может работать как с классическими тонально-импульсными сигналами, так и широкополосными сигналами CHIRP, 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 борту датчиков гидролокатора бокового обзора (далее – ГБО) и канал для датчика направленного вниз структурного сканирования (далее – НСС). Соответственно, на экран эхолота могут быть выведены эхограммы от всех четырех акустических датчиков TotalScan одновременно. Кроме того, на экране может быть отображена карта Navionics или С-Мар с указанием координат текущего положения эхолота благодаря встроенной антенне системы глобального позиционирования с поддержкой технологий повышения точности WAAS/EGNOS/MSAS.

СОНАР может работать на частотах 83 или 200 кГц, а структурное сканирование может проводиться на частотах 455 и 800 кГц. Основные параметры антенны TotalScan, раскрытые для пользователей производителем, приведены в табл. 1.

В ходе проведенных эхо-съемок СОНАР работал на частоте 200 кГц при

параллельной работе всех датчиков структурного сканирования, что, в соответствии с документацией на эхолот, исключало возможность использования режима СОНАРом режима CHIRP. Длительность и частоту посылок зондирующих импульсов эхолот изменял автома-

тически в зависимости от установленно-го диапазона глубин. Перед началом эхо-съемок задавалась одна и та же максимальная глубина 100 м, что позволило в дальнейшем объединить результаты различных эхо-съемок без дополнительных процедур коррекции данных.

Таблица 1. Основные параметры антенны TotalScan

Канал антенны	Частота, кГц	Максимальный диапазон, м
СОНАР (режим CHIRP)	83	305
	200	305
ГБО	455	92/борт, всего 182
	800	30/борт, всего 60
НСС	455	92
	800	30

Встроенное в эхолот цифровое устройство записи данных на флеш-карту обеспечило возможность накапливать данные эхо-съемок в цифровой форме, в том числе, маршрут движения в акватории водоема, данные структурного сканирования, полные профили обратного рассеяния звука на частоте 200 кГц в столбе воды.

Для предварительного анализа данных СОНАРа и распознавания метановых сипов применялась программа WaveLens [6]. Визуализация и анализ данных структурного сканирования, преобразованных в мозаику ГБО, выполнялись с помощью пакета программ ReefMaster [7].

Для исследования акустических особенностей подстилающих слоев донных осадков на языке MatLab [8] была написана программа вычисления индекса шероховатости $E1$ и индекса твердости $E2$ грунта [9], определяемых по форме эхо-сигнала как:

$$E1 = \int_{t1}^{t2} I(t) dt, \quad (1)$$

$$E2 = \int_{t3}^{t4} I(t) dt, \quad (2)$$

где $I(t)$ амплитуда регистрируемого эхолотом эхо-сигнала, $t1$ и $t2$ задают временной интервал, соответствующий

фазе затухания (или хвосту) эхо-сигнала от морского дна продолжительностью утроенной длительности импульса, а временной интервал $t3-t4$ полностью покрывает импульс «второго дна» – эхо-сигнала, двукратно отразившегося в обратном направлении от морского дна, и однократно от поверхности моря.

Для построения растровых и трехмерных географических моделей полученных акустических данных использовалась программа Surfer 13 [10].

Результаты и обсуждение. Рис. 2 отображает пример выходных данных эхолота, получаемых от всех 4-х акустических датчиков антенны TotalScan.

Как известно, газовые пузырьки в водной среде являются сильными звуко-рассеивателями [11], чем обеспечивается возможность детектирования метановых струйных газовыделений активными акустическими приборами в широком диапазоне частот. Вместе с тем, на эхограммах СОНАРа (рис. 2, а) газовые факелы частично маскируются эхо-сигналами от многочисленных акустических неоднородностей в водном столбе, основную долю которых составляют, предположительно, эхо-отклики от рыб. Однако на изображениях НСС (рис. 2, б) треки метановых пузырьков детектируются визуально вполне уверенно.

Карта дна (мозаика ГБО), составленная из сонограмм ГБО на различных галсах эхо-съемки 22.06.2020, показала, что в исследованном районе сосуществуют

«темные» и «светлые» участки дна, причем, метановые струйные газовыделения обнаруживались исключительно на «темных» участках (рис. 3).

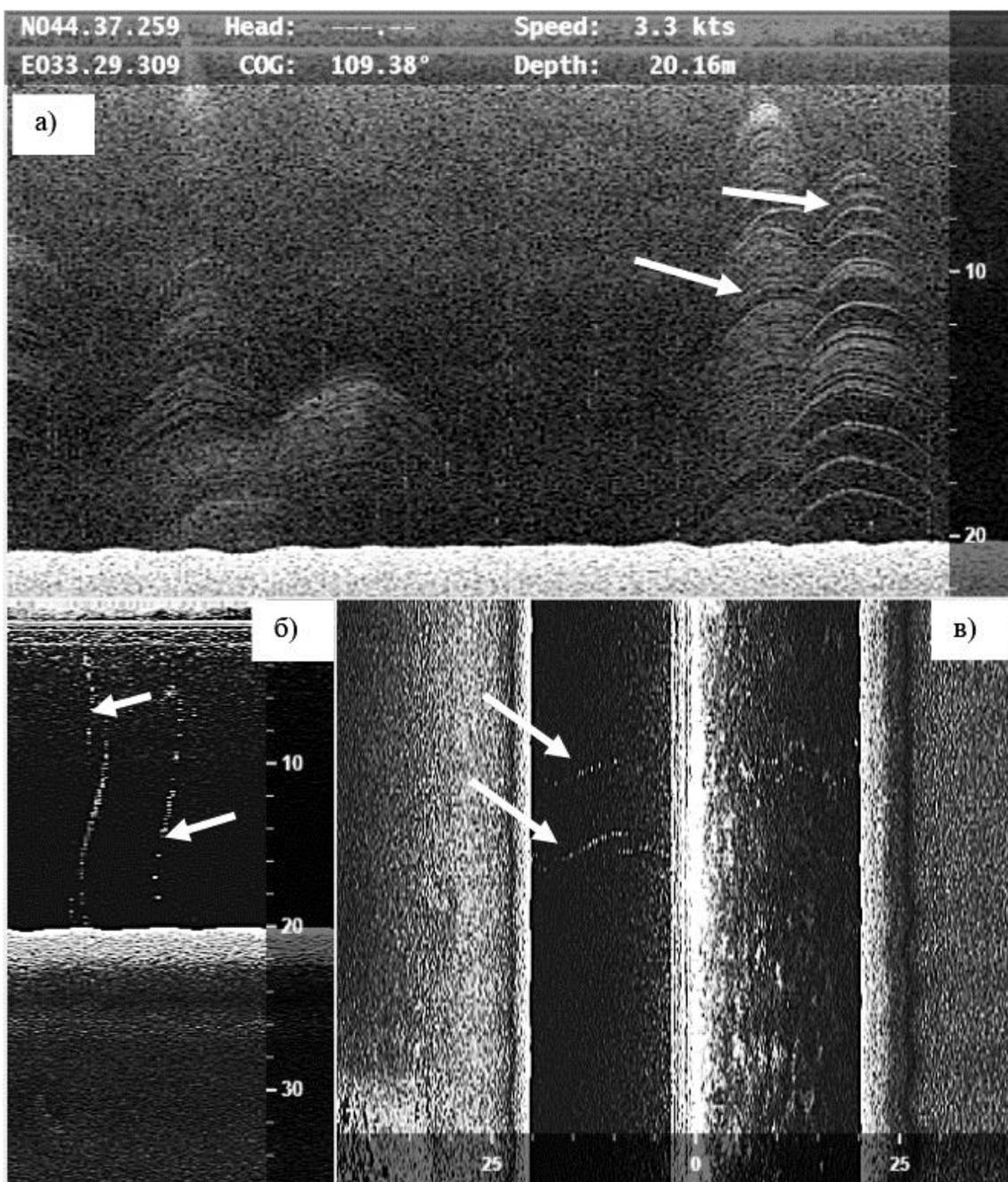


Рис. 2. Фрагмент данных эхо-съемки 22.06.2020 на внешней акватории Севастопольских бухт: а) эхограмма СОНАРа; б) сонограмма НСС; в) сонограмма ГБО. Стрелками показаны факелы метановых пузырьков, одновременно фиксируемые разными акустическими датчиками антенны TotalScan

Fig. 2. Fragment of echo survey data on 06.22.2020 in the outer waters of the Sevastopol bays: а) SONAR echogram; б) sonogram of HSS; в) HBO sonogram. The arrows show the torches of methane bubbles, which are simultaneously recorded by different acoustic sensors of the TotalScan antenna

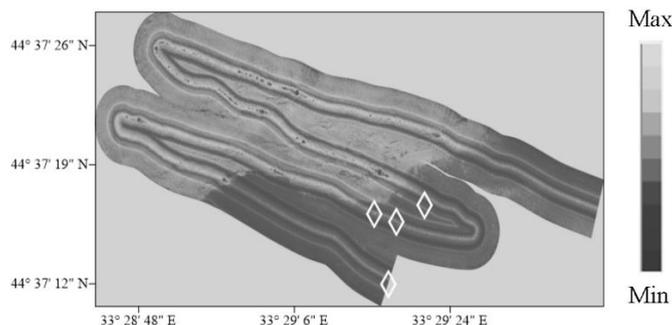


Рис. 3. Акустическая мозаика ГБО.

Маркеры показывают расположение детектированных метановых сипов
Fig. 3. Acoustic mosaic of SSS. Markers show the location of detected methane seeps

При этом необходимо учитывать, что мозаика ГБО, фактически, представляет собой яркостную карту в географических координатах, где яркость отображает силу обратного сигнала от морского дна, в зависимости от акустических свойств подводного грунта и формы его поверхности [12]. Показано, что шероховатое или твердое дно обеспечивает

более высокую интенсивность обратного рассеяния акустического сигнала, чем мягкое дно, дающее слабый эхо-сигнал [13].

Для галса ГБО на рис. 3 были рассчитаны по данным СОНАРа индексы шероховатости $E1$ и твердости $E2$ морского дна (рис. 4).

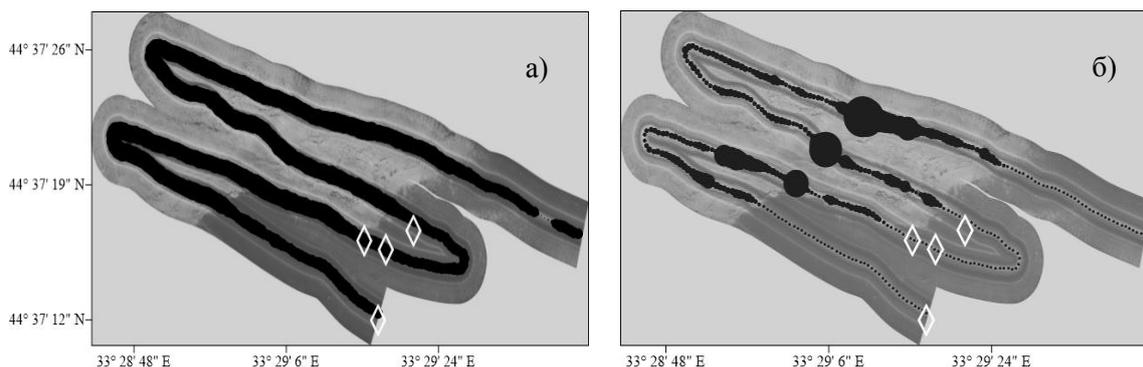


Рис. 4. Пузырьковые диаграммы индекса шероховатости $E1$ (а) и индекса твердости $E2$ (б), наложенные на мозаику ГБО. Диаметры пузырьков на графике а) пропорциональны значениям $E1$ в диапазоне $(2,4 \cdot 10^{-3} - 0,20)$, а на графике б) – значениям $E2$ в диапазоне $(9,8 \cdot 10^{-8} - 7,5 \cdot 10^{-2})$.

Ромбами показаны позиции зарегистрированных метановых сипов
Fig. 4. Bubble diagrams of the roughness index $E1$ (a) and the hardness index $E2$ (b) superimposed on the SSS mosaic. The bubble diameters in graph a) are proportional to $E1$ values in the range $(2.4 \cdot 10^{-3} - 0.20)$, and in graph b) they are proportional to $E2$ values in the range $(9.8 \cdot 10^{-8} - 7.5 \cdot 10^{-2})$.
 Diamonds show the positions of registered methane seeps

Как показывает рис. 4, параметр $E1$ более равномерно распределен в исследованном районе, чем $E2$, значения которого меняются, в зависимости от свойств донных осадков, в широком диапазоне, достигающем 6 порядков, причем, минимальные значения $E2$ соответствуют исключительно «темным» участкам мозаики ГБО (рис. 4, б). На этом основании можно с высокой степе-

нью уверенности классифицировать «темные» участки морского дна как мягкие, а «светлые» участки – как твердые донные осадки.

Для оценки пространственного распределения «темных-мягких» и «светлых-твердых» участков в районе исследований, 16.09.2020 была выполнена более масштабная эхо-съемка (рис. 5).

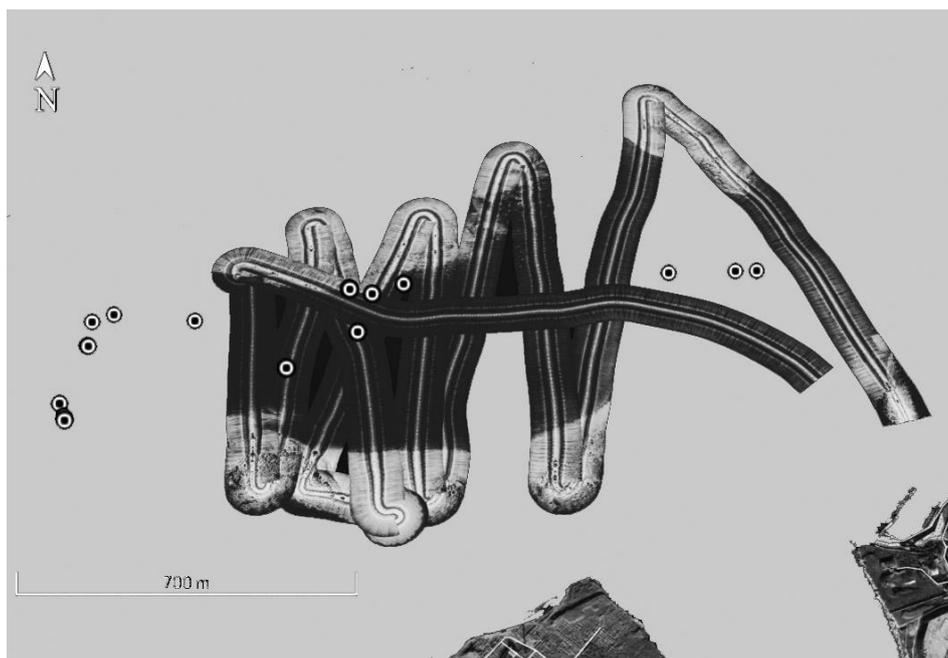


Рис. 5. Акустическая мозаика ГБО по результатам эхо-съемки 16.09.2020, наложенная на карту GoogleEarth. Маркеры показывают местоположение метановых струйных газовыделений, обнаруженных в 2006–2020 гг.

Fig. 5. Acoustic mosaic of SSS based on the results of an echo survey on September 16, 2020, superimposed on a Google Earth map. Markers show the location of methane gas bubble streams detected in 2006–2020

На рис. 5 отчетливо видно, что «темный» участок мозаики ГБО занимает всю центральную часть обследованной области, которую обрамляют с севера и юга «светлые» участки, подобно берегам воображаемой реки, русло которой извивается вдоль современной береговой линии севастопольского региона. Такое сопоставление, тем более, уместно с учетом того, что, как известно, Севастопольская бухта возникла в результате затопления древней долины р. Чёрная при поэтапном поднятии уровня моря в предшествующие геологические периоды [14], поэтому можно ожидать существование подводного продолжения Севастопольской бухты. Это предположение подтверждается анализом вещественного состава и генезиса донных осадков, схожими как для внешней акватории, так и для самой Севастопольской бухты, крутые борта которой сложены известняками, мергелями и глинами, а

днище заполнено неконсолированными четвертичными отложениями [14]. В этой связи представляется обоснованным сопоставить наблюдаемые на рис. 5 «темные» участки морского дна с рыхлыми илистыми отложениями дна палеореки Чёрная, а «светлые» – с более твердыми ее берегами, сложенными горными осадочными породами.

Результаты эхо-съемок 2021 г. позволили детализировать границы области илистого дна, а также построить батиметрическую карту исследованного района палеодолины р. Черная. Совмещение этих данных на едином графике показывает, что контур области илистого дна полностью совпадает с границами равнинного участка в центре исследованного района, причем, именно в пределах этого участка располагаются зарегистрированные выходы струйного метана (рис. 6).

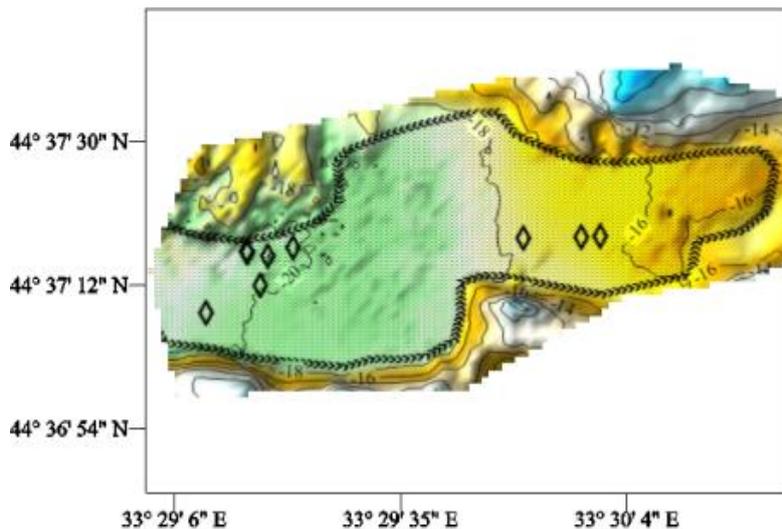


Рис. 6. Батиметрическая карта района работ. Сплошными тонкими линиями показаны изобаты, цифрами указаны отчеты глубины. Штриховыми линиями показаны границы области илистого дна. Маркеры показывают положение детектированных метановых сипов

Fig. 6. Bathymetric map of the work area. Solid thin lines show isobaths, numbers indicate depth readings. The dashed lines show the boundaries of the muddy bottom area. Markers show the position of detected methane seeps

Интересно, что в работе [15] исследования окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и содержания органического вещества (ОВ) в донных отложениях выполнялись на том же участке палео-русла р. Черная, что и наши исследования. На построенной по

результатам настоящих исследований карте пространственного распределения индекса твердости морского грунта E2 (в логарифмической форме) показаны зарегистрированные выходы струйного метана, а также точки сбора образцов донных отложений работы [15] (рис. 7).

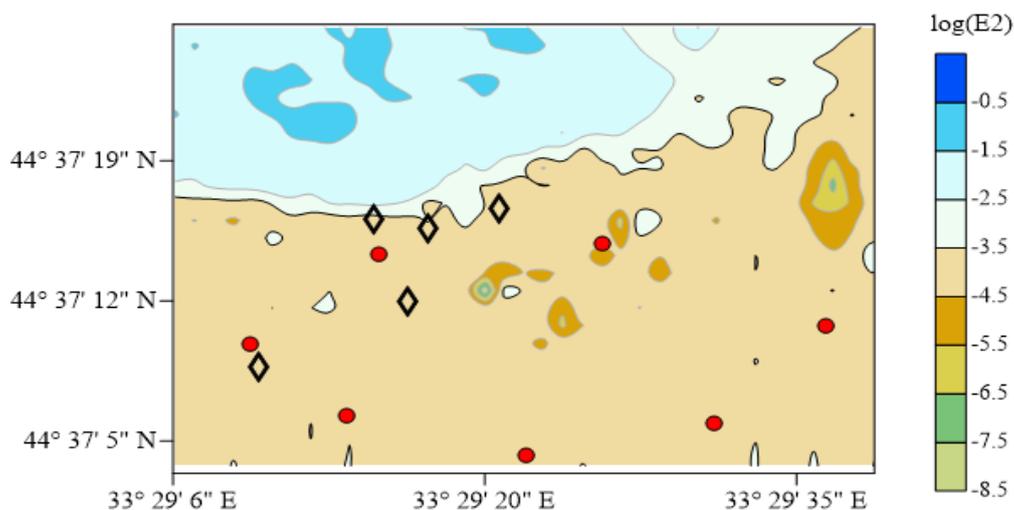


Рис. 7. Индекс твердости морского грунта E2 (логарифмически преобразованный) на участке палео-долины р. Черная. Ромбовидными маркерами отмечено географическое положение детектированных метановых сипов, точки – места сбора образцов донных отложений работы [15]

Fig. 7. The hardness index of the sea soil E2 (logarithmically transformed) in the area of the paleo-valley of the Chernaya-river. Diamond-shaped markers show the geographic location of the detected methane seeps, dots indicate the places where samples of bottom sediments were collected in [14]

Выполненный в работе [15] анализ проб грунта показал, что русло подводной р. Черная заполнено илистыми отложениями, богатыми органическим веществом, причем, содержание ОВ в илах тальвега палео-Чёрной двукратно превышает аналогичный показатель на её береговых склонах. Кроме того, обнаружены существенные отличия значений Eh на дне русла в сравнении с его береговыми склонами. На обоих склонах затопленной части реки – северном и южном – Eh имеет положительные значения, тогда как на наиболее глубоком участке русла залегают восстановленные илы. Здесь же отмечается, что падение значений Eh в грунтах на дне палеорусла, возможно, связано с повышенной активностью бактериобентоса и интенсивной микробиологической минерализацией избыточной органики. Это предположение коррелирует с обнаружением метановых струйных газовыделений на участках мягких илистых отложений дна палео-русла р. Черная (рис. 5 и 7), а не на склонах, как утверждается в [15]. Как известно, при наличии лабильного органического материала, а также благоприятных физических условий, в осадках могут запускаться процессы биологического распада биомассы с образованием метана [16]. Образовавшийся метан частично поступает в придонные слои воды в растворенной форме, частично элиминируется метанооксилирующими бактериями, а частично накапливается в свободной форме с образованием газовых пузырьков. В случае интенсивного процесса мезогенеза возникают фокусированные потоки метана в виде метановых струйных газовыделений в водном столбе, которые, как показано на рис. 2, могут распознаваться различными акустическими методами.

Заключение. Обследован участок струйных метанопроявлений на внешней акватории Севастопольской бухты с использованием рекреационного эхолота. Установлено, что накопленные к настоящему времени данные по геолокации метановых струйных выделений в районе исследований указывают на их привязку к участкам мягких донных осад-

ков, которые идентифицируются как богатое органическими веществами палеорусло р. Черная. Это обстоятельство может рассматриваться как прямое свидетельство о биогенном происхождении регистрируемых на внешней акватории Севастопольской бухты метановых сипах в результате биологического распада накопленного в затопленной палеодолине р. Черная осадочного органического материала.

Автор выражает благодарность ведущим инженерам Евтушенко Д.Б. и Мосейченко И.Н. за помощь в проведении акустических исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме НИР № 121031500515-8 «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров В.Н., Гулин С.Б., Гулин М.Б., Артёмов Ю.Г., Гусева И.А. Струйные газовыделения в акватории внешнего рейда г. Севастополя // Научные записки Тернопольского НПУ. Серия: Биология. Специальный выпуск «Гидроэкология». 2005. № 4 (27). С. 80–82.
2. Еремеев В.Н., Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г., Артемюк Ю.Г., Гулин С.Б., Евтушенко Д.Б., Поповичев В.Н., Стокозов Н.А. Новые струйные метановые газы выделения со дна моря в акватории Севастополя // Вестник НАН Украины. 2007. № 4. С. 47–50 (на укр. языке).
3. Buscombe D. Shallow water benthic imaging and substrate characterization using recreational-grade sidescan-sonar // Environmental Modelling & Software. 2016. 89 (2017). P. 1–18.
4. Brough T, Rayment W, Dawson S. Using a recreational grade echosounder to quantify the potential prey field of coastal predators // PLoS ONE. 2019. Vol. 14(5). URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217013>.
5. Navico Holding AS. Lowrance ELITE Ti Operator Manual. Navico

Holding AS. 2016. Инструкция по эксплуатации: <https://www.lowrance.com/en-au/help--support/>.

6. Artemov Yu.G. Software support for investigation of natural methane seeps by hydroacoustic method // *Marine Ecological Journal*. 2006. 5, No. 1. P. 57–71.

7. ReefMaster Software Ltd. ReefMaster. Версия 2.0. ReefMaster Software Ltd. 2019. Программное обеспечение для компьютера: <https://reefmaster.com.au/reference2/index.htm>.

8. The Math Works, Inc. MATLAB. Версия 2020a, The Math Works, Inc., 2020. Программное обеспечение для компьютера: <https://www.mathworks.com>.

9. Chivers R., Emerson N., Burns D. New acoustic processing for underway surveying // *Hydrogr. J.* 1990. Vol. 56, P. 9–17.

10. Golden Software, LLC. Surfer 13. Golden Software, LLC, 2015, Full User's Guide: www.goldensoftware.com.

11. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. М.: Мир, 1980. 580 с.

12. Житковский Ю.Ю., Лысанов Ю.П. Отражение и рассеяние звука дном океана // *Акустический журнал*. 1967. Т. 13. Вып. 1. С. 1–17.

13. Collier J.S., Brown C.J. Correlation of sidescan backscatter with grain size distribution of surficial seabed sediments // *Mar. Geol.* 2005. Vol. 214. P. 431–449.

14. Иванов В.Е. Особенности осадко-накопления в устьях рек юго-западного Крыма в позднем плейстоцене и голоцене // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2014. № 1. С. 94–107.

15. Гулин М.Б., Коваленко М.В. Палеорула рек Чёрная и Бельбек на шельфе юго-западного Крыма – новый объект экологических исследований // *Морской экологический журнал*. 2010. № 1, Т. IX. С. 23–31.

16. Zeikus J.G., Winfrey M.R. Temperature limitation of methanogenesis in aquatic sediments // *Appl. Environ. Microbiol.* 1976. Vol. 31(1). P. 99–107.

MAPPING OF METHANE GAS BUBBLE STREAMS IN THE EXTERNAL WATER AREA OF THE SEVASTOPOL BAY USING RECREATIONAL-GRADE SONAR

Yu.G. Artemov

A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
RF, Sevastopol, Nakhimov Av., 2

The site of methane seep occurrences in the outer water area of the Sevastopol Bay was surveyed using a Lowrance Elite Ti Series recreation grade fishfinder/chartplotter that combines vertical and lateral acoustic scanning functions and is equipped with a TotalScan antenna. The paper analyzes the features of the spatial distribution of methane seep emissions, bottom topography, and acoustic characteristics of the upper layers of bottom sediments, including the roughness (E1) and hardness (E2) indices of the seabed. The data accumulated to date on the geolocation of methane seeps in the study area indicate that they are related to areas of soft bottom sediments, which are identified as a rich in organic matter paleo-channel of the river Chernaya. This circumstance can be considered as direct evidence of the biogenic origin of methane seeps recorded in the outer waters of the Sevastopol Bay, resulting from biological decay of sedimentary organic material accumulated in the paleo-valley of the river Chernaya.

Keywords: methane gas bubble streams, Sevastopol Bay, paleo-channel of the river Chernaya, recreational-grade echo sounder.

REFERENCES

1. Egorov V. N., Gulin S. B., Gulin M. B., Artemov Ju. G., and Guseva I. A. Strujnye gazovydelenija v akvatorii vneshnego rejda g. Sevastopolja (Gas bubble streams in the external water area of the city of Sevastopol). *Nauchnye zapiski Ternopol'skogo NPU. Serija: Biologija. Special'nyj vypusk "Gidroekologija"*, 2005, No 4 (27), pp. 80–82.

2. Ereemeev V.N., Egorov V.N., Polikarpov G.G., Artemov Ju.G., Gulin S.B., Evtushenko D.B., Popovichev V.N., and Stokozov N.A. Novye strujnye metanovye gazovye vydelenija so dna morja v akvatorii Sevastopolja (New methane gas bubble streams from the seabed in the waters of Sevastopol). *Vestnik NAN Ukrainy*, 2007, No. 4, pp. 47–50.
3. Buscombe D. Shallow water benthic imaging and substrate characterization using recreational-grade sidescan-sonar. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 89 (2017), pp. 1-18.
4. Brough T., Rayment W., and Dawson S. Using a recreational grade echosounder to quantify the potential prey field of coastal predators. *PLoS ONE*, 2019, Vol. 14(5), URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217013>.
5. Navico Holding AS. Lowrance ELITE Ti Operator Manual. Navico Holding AS, 2016, User manual: <https://www.lowrance.com/en-au/help--support/>.
6. Artemov Yu.G. Software support for investigation of natural methane seeps by hydroacoustic method. *Marine Ecological Journal*, 2006, 5, No. 1, pp. 57–71.
7. ReefMaster Software Ltd. ReefMaster. Version 2.0. ReefMaster Software Ltd. 2019, Computer software: <https://reefmaster.com.au/reference2/index.htm>.
8. The Math Works, Inc. MATLAB. Version 2020a, The Math Works, Inc., 2020, Computer software: <https://www.mathworks.com>.
9. Chivers R., Emerson N., and Burns D. New acoustic processing for underway surveying. *Hydrogr. J.*, 1990, Vol. 56, pp. 9–17.
10. Golden Software, LLC. Surfer 13. Golden Software, LLC, 2015, Full User's Guide: www.goldensoftware.com.
11. Klej K. and Medvin G. Akusticheskaja okeanografija (Acoustic oceanography). Moscow: Mir, 1980, 580 p.
12. Zhitkovskij Ju.Ju. and Lysanov Ju.P. Otrazhenie i rassejanie zvuka dnom okeana (Reflection and scattering of sound by the ocean floor). *Akusticheskij zhurnal*, 1967, Vol. 13, No. 1, pp. 1–17.
13. Collier J.S. and Brown C.J. Correlation of sidescan backscatter with grain size distribution of surficial seabed sediments. *Mar. Geol.*, 2005, Vol. 214, pp. 431–449.
14. Ivanov V.E. Osobennosti osadkonakoplenija v ust'jah rek jugo-zapadnogo Kryma v pozdnem plejstocene i golocene (Peculiarities of sedimentation in the mouths of rivers of the southwestern Crimea in the late Pleistocene and Holocene). *Geologija i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*, 2014, No. 1, pp. 94–107.
15. Gulin M.B. and Kovalenko M.V. Paleorusla rek Chjornaja i Bel'bek na shel'fe jugo-zapadnogo Kryma – novyj ob#ekt jekologicheskikh issledovanij (Paleochannels of the Chernaya and Belbek rivers on the shelf of the southwestern Crimea - a new object of ecological research). *Morskoj jekologicheskij zhurnal*, 2010, No. 1, Vol. IX, pp. 23–31.
16. Zeikus J.G. and Winfrey M.R. Temperature limitation of methanogenesis in aquatic sediments. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1976, Vol. 31(1), pp. 99–107.