

## Методические подходы к сравнительной оценке активности и интенсивности струйных пузырьковых газовыделений на шельфе у берегов Крыма (Черное море)

М. М. Макаров<sup>1</sup>, К. М. Кучер<sup>1</sup>, А. А. Будников<sup>2</sup>, Т. В. Помогаева<sup>3</sup>,  
Т. В. Малахова<sup>3, 4, ✉</sup>

<sup>1</sup> Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup> ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,  
Севастополь, Россия

<sup>4</sup> Международный научный центр в области экологии и вопросов изменения климата,  
Научно-технологический университет «Сириус», Сириус, Россия  
✉ t.malakhova@ibss-ras.ru

Поступила в редакцию 25.08.2025; одобрена после рецензирования 12.09.2025;  
принята к публикации 10.11.2025.

### Аннотация

**Цель.** Цель исследования – обнаружение газовой пузырьковой разгрузки и количественная оценка потоков пузырькового газа на шельфе Черного моря у юго-восточных берегов Крыма. Отдельное внимание уделяется методическим подходам к задаче изучения локализации и сравнительной оценке активности и интенсивности струйных пузырьковых газовыделений.

**Методы и результаты.** Использованы гидроакустические записи, подводные видеозаписи морского дна, гидрологические данные, собранные во время экспедиций на НИС «Профессор Водяницкий»: в 125-м (ноябрь 2022 г.), 132-м (июль – август 2024 г.) и 135-м (июнь 2025 г.) рейсах. Исследования включали три этапа: 1) широкие поисковые работы на шельфе на глубинах 10–80 м; 2) детализация границ площадок с обнаруженными скоплениями (кластерами) сипов; 3) мониторинг активности газовыделений на отдельных площадках. Суммарно за все периоды исследований обнаружено более 600 сипов. Анализ их распределения по глубинам показал, что около 90 % всех зарегистрированных факелов расположено на глубинах 35–45 м. Для сравнения временной и пространственной изменчивости активности газовыделений введен удельный показатель – плотность сипов (отношение количества сипов к площади просканированного дна). Максимальная плотность сипов зарегистрирована летом 2024 г. и составила 6,3 сипа на 1 га на площадке у мыса Мартьян. На основе гидроакустических данных рассчитаны средние значения расхода газа от отдельных сипов: 38 л/сут (0,07 т/год) в 2022 г. и 10,7 л/сут (0,011 т/год) в 2024 г. **Выводы.** Результаты исследования, включая данные о пространственном распределении, динамике плотности и величине потока, составляют основу для мониторинга газовыделений на крымском шельфе. Выраженная межсезонная и межгодовая изменчивость плотности сипов указывает на значительную роль внешних факторов в регулировании газоотдачи. Полученные данные формируют основу для оценки вклада метановых сипов в региональный углеродный цикл.

**Ключевые слова:** Черное море, шельф, акустические исследования, газовые факелы, сип, метановые сипы, пузырьковая разгрузка газа, гидроакустический мониторинг, Южный берег Крыма

**Благодарности:** авторы благодарят экипаж НИС «Профессор Водяницкий» за помощь в палубных и навигационных работах во время рейсов. Работа выполнена в рамках тем государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова № 122052000076-3, ЛИН СО РАН № 1023032700323-4-1.5.12, № 122012600083-9, ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ № 124030100127-7 и гранта РНФ 24-17-20030.

© Макаров М. М., Кучер К. М., Будников А. А., Помогаева Т. В., Малахова Т. В., 2026

Для цитирования: Методические подходы к сравнительной оценке активности и интенсивности струйных пузырьковых газовыделений на шельфе у берегов Крыма (Черное море) / М. М. Макаров [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 1. С. 21–36. EDN AINZFC.

Original article

## Methodological Approaches to Comparative Assessing the Activity and Intensity of Stream Bubble Gas Emissions on the Shelf off the Crimea Coast (Black Sea)

M. M. Makarov<sup>1</sup>, K. M. Kucher<sup>1</sup>, A. A. Budnikov<sup>2</sup>,  
T. V. Pomogaeva<sup>3</sup>, T. V. Malakhova<sup>3, 4</sup>, ✉

<sup>1</sup>Limnological Institute, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>3</sup>A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation

<sup>4</sup>International Scientific Center for Ecology and Climate Change, Sirius University of Science and Technology, Sirius, Russia

✉ t.malakhova@ibss-ras.ru

### Abstract

**Purpose.** The purpose of the study is to detect bubble gas emissions and to assess quantitatively bubble gas fluxes on the Black Sea shelf off the south-eastern coast of Crimea, as well as to focus specially on methodological approaches to investigating the spatial localization and comparative evaluation of the activity and intensity of stream bubble gas emissions.

**Methods and Results.** The hydroacoustic records, seafloor video records, and hydrological measurement data collected during the scientific expeditions of R/V “Professor Vodyanitsky” (cruise 125, November 2022, cruise 132, July–August 2024, and cruise 135, June 2025) were used in the study. The research consisted of three stages: 1) broad-scale shelf surveying at the 10–80-m depths, 2) boundary detailing of the sites with the identified seep clusters, and 3) monitoring of the activity of gas emissions at the selected sites. In total, more than 600 seeps were revealed over all the survey periods. Analysis of their distribution over depth showed that approximately 90% of all the recorded gas flares were located at the 35–45-m depths. To compare the temporal and spatial variability of gas emission activity, a specific indicator – the seep density (ratio of the seep number to the scanned bottom area) – was introduced. The maximum seep density reaching 6.3 seeps per a hectare at the site near Cape Martyan, was recorded in summer 2024. The hydroacoustic data made it possible to calculate the average values of gas emissions from individual seeps: 38 l/day (0.07 t/year) in 2022 and 10.7 l/day (0.011 t/year) in 2024.

**Conclusions.** Study results including the data on spatial distribution, density dynamics, and flux magnitude, constitute the basis for monitoring gas emissions on the Crimea shelf. The pronounced inter-seasonal and interannual variability of seep density indicates the significant role of external factors in gas emission regulation. The obtained data form a ground permitting to assess the contribution of methane seeps to the regional carbon cycle.

**Keywords:** Black Sea, shelf, acoustic surveys, gas flares, seep, methane seep, bubble gas emission, hydroacoustic monitoring, South Coast of Crimea

**Acknowledgments:** The authors are grateful to the crew of R/V “Professor Vodyanitsky” for assistance in deck operations and navigation during the cruises. The study was carried out within the framework of themes of state assignments of Lomonosov MSU – No. 122052000076-3, LIN SB of RAS – No. 1023032700323-4-1.5.12 and No. 122012600083-9, FSBSI FRC IBSS – No. 124030100127-7, and the RSF grant No. 24-17-20030.

**For citation:** Makarov, M.M., Kucher, K.M., Budnikov, A.A., Pomogaeva, T.V. and Malakhova, T.V., 2026. Methodological Approaches to Comparative Assessing the Activity and Intensity of Stream Bubble Gas Emissions on the Shelf off the Crimea Coast (Black Sea). *Physical Oceanography*, 33(1), pp. 18-32.

## Введение

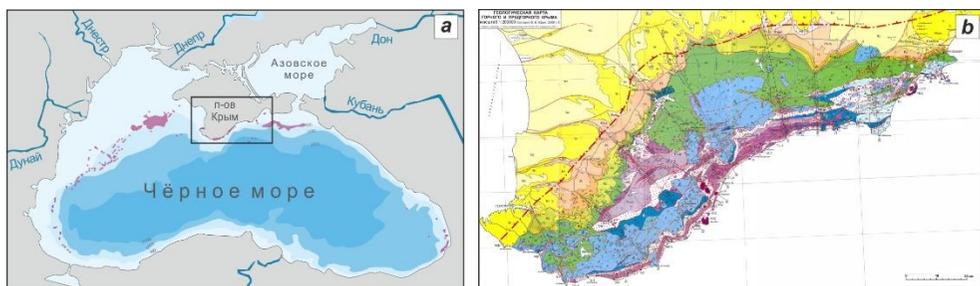
Метан – мощный парниковый газ, играющий важную роль в глобальных климатических процессах Земли. Одним из его природных источников являются холодные метановые сипы – точечные пузырьковые газовыделения со дна водоемов [1–3]. Они широко распространены на шельфе и континентальном склоне по всему Мировому океану [2], в том числе и в Черном море [4]. Метановые сипы в Черном море зарегистрированы в широком диапазоне глубин – от нижней границы зоны стабильности газогидратов (725 м) и глубже [4, 5] до берега [6, 7]. Выделяющийся газ в разных районах имеет различное происхождение (биогенное и/или термогенное) [7], что, в свою очередь, может обуславливать разную интенсивность и периодичность газовыделений в зависимости от сезона или внешних условий [8].

Газовые потоки от индивидуальных сипов исследованы в различных районах Мирового океана: в Мексиканском заливе [9], на шельфе Норвегии [10, 11], в Северном море [12], у о. Шпицберген [13], в море Лаптевых [14], на шельфе Калифорнии [15], а также в некоторых районах Черного моря [16, 17]. Суммарный поток метана из морских сипов в атмосферу оценивается примерно в 20–30 Тг·год<sup>-1</sup> [1], при этом оценки от индивидуальных источников в различных районах могут различаться на несколько порядков. В ходе 125-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» впервые были зарегистрированы метановые сипы у южных и восточных берегов Крыма [18]. За последнее 10-летие были также описаны отдельные мелководные площадки газовыделений [6, 7, 19, 20].

В данной работе представлены результаты гидроакустических исследований на шельфе Черного моря у юго-восточных берегов Крыма, полученные в ходе научных экспедиций в ноябре 2022, августе 2024 и июне 2025 гг. Цель нашего исследования – обнаружение пузырьковой газовой разгрузки и количественная оценка потоков пузырькового газа в указанном районе. Отдельное внимание уделено методическим подходам к задаче изучения локализации и к сравнительной оценке активности и интенсивности струйных пузырьковых газовыделений.

### Район исследований: геоморфология и геология

Район исследований охватывает шельф Черного моря вдоль юго-восточного побережья Крымского п-ова, включая участок от б. Ласпи на западе – Южный берег Крыма (ЮБК) – до Феодосийского залива на востоке (рис. 1). В геоморфологическом отношении шельф и континентальный склон у побережья Крыма подразделяют на три морфоструктурных района: Западный – от м. Тарханкут до м. Сарыч и б. Ласпи; Южнобережный (ЮБК) – от м. Сарыч до м. Меганом; Восточный, от м. Меганом до Керченского пролива, включающий Феодосийский залив и керченско-таманский шельф. В пределах изучаемого участка (вдоль ЮБК и в примыкающей части Восточного района) шельф узкий, к востоку от м. Меганом он расширяется. Глубина его внешнего края варьирует от 100 до 130 м. На всем его протяжении выделяются внутренняя (абразионная) и внешняя (аккумулятивная) части. Граница между ними проходит на изобате 80–95 м. Абразионная равнина внутреннего шельфа перекрыта осадочным чехлом небольшой мощности (10–20 м), преимущественно позднеэвксинского и голоценового возраста [21].



**Р и с. 1.** Карта-схема распределения метановых сипов в Черном море [4, 18] (прямоугольником обозначена зона исследования) (a) и геологическая карта зоны исследования <sup>1</sup> (b)

**Fig. 1.** Map-scheme of the distribution of methane seeps in the Black Sea [4, 18] (rectangle indicates the study area) (a), and geological map of the study area <sup>1</sup> (b)

### Материалы и методы

Данные, использованные в настоящем исследовании, включая гидроакустические записи, видеоматериалы морского дна и гидрологическую информацию, собраны во время экспедиций на НИС «Профессор Водяницкий»: в 125-м (ноябрь 2022 г.), 132-м (июль – август 2024 г.) и 135-м (июнь 2025 г.) рейсах.

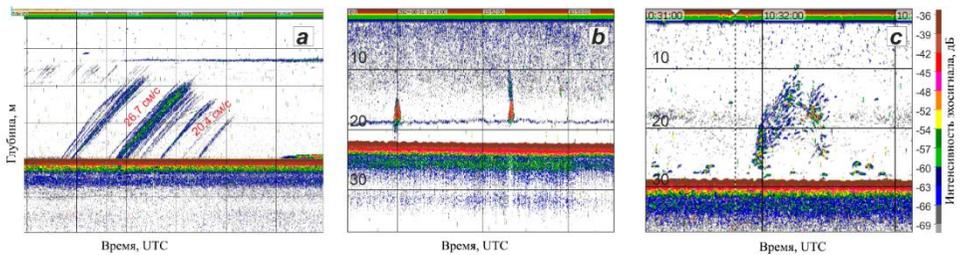
**Гидроакустическое обнаружение пузырьковой разгрузки: сбор и обработка данных.** Основной массив данных получен с помощью научного эхолота *Simrad EK 500* (частоты 38 и 120 кГц), установленного на НИС «Профессор Водяницкий». Часть данных в 125-м рейсе получена с использованием аппаратно-программного комплекса, разработанного в лаборатории гидрологии и гидрофизики ЛИИ СО РАН на основе эхолота *Furuno FCV-1100*, подсоединенного к судовым гидроакустическим антеннам (88 и 50 кГц). Ширина диаграммы направленности гидроакустической антенны *Simrad EK 500* и *Furuno FCV-1100* составляла 7° и 8° соответственно, длительность импульса – 0,3 мс. Гидроакустическая запись проводилась на ходу при скорости судна не более 4 узлов, а также в дрейфе для регистрации отдельных всплывающих пузырьков газа.

Данные судового эхолота *Simrad* регистрировались при помощи авторского программного обеспечения, созданного в лаборатории гидрологии и гидрофизики ЛИИ СО РАН. Визуализация данных выполнялась в программе *EchoView SonarData Myriax* (Австралия). Данные эхолота *Furuno* визуализировались в авторском программном обеспечении «Эхо-Байкал» [22]. Обработка и анализ данных объемного обратного рассеяния и расчет потоков газа выполнены с использованием кода на языке *Python*. Сипы были выделены вручную в программе *EchoView* на основе критериев, представленных ниже.

**Критерии для идентификации сипов.** Распознавание пузырьковой разгрузки основано на анализе характера обратного акустического рассеяния на эхограммах [13, 23]. Гидроакустический образ интенсивной пузырьковой разгрузки на больших глубинах имеет характерную форму факела и зависит от

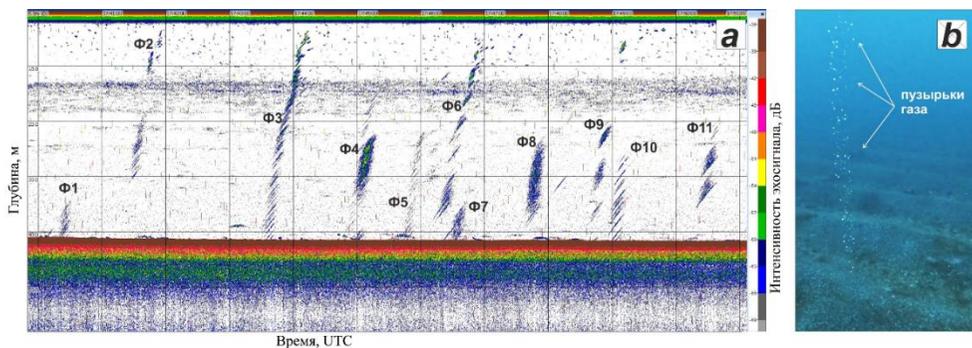
<sup>1</sup> Геологическая карта и разрезы Горного, Предгорного Крыма: для специалистов, студентов, туристов и любителей природы / составил В. В. Юдин. 1: 200 000. 2009. Симферополь : Союзкарта, 2009.

профиля течения, курса судна и диаграммы направленности гидроакустической антенны [24]. Для небольших глубин и слабой разгрузки существует ряд особенностей, которые отличают гидроакустические образы сипов на эхограммах от типичной формы факела, присущей глубоководным газовыделениям. Поэтому для корректного обнаружения отдельных пузырьков и их скоплений необходима правильная классификация целей обратного акустического рассеяния в толще воды. Как показано в работах [25, 26], одиночный пузырек или их облако на эхограмме образуют практически прямую линию с положительным наклоном (рис. 2, *a*). Поскольку эхограммы отображают интенсивность эхосигнала (цвет) по глубине (ось *y*) во времени (ось *x*), различное вертикальное преувеличение может растягивать изображение косяков рыб по оси *y*, приводя к ложному обнаружению сипов (рис. 2, *b, c*).



**Рис. 2.** Эхограммы пузырьковых газовыделений, зарегистрированных 07.08.2024 на поле сипов у м. Мартьян на якорной стоянке (*Simrad EK 500*, 120 КГц) (видны треки отдельных всплывающих пузырьков) (*a*); примеры гидроакустических аномалий неявной природы, образ которых не позволяет однозначно интерпретировать их как газовые факелы (*b, c*)

**Fig. 2.** Echograms of bubble gas emissions recorded in the seep site near Cape Martyan at the anchorage on August 7, 2024 (*Simrad EK 500*, 120 kHz) (tracks of individual rising bubbles are visible) (*a*); examples of hydroacoustic anomalies of an implicit nature, the image of which does not allow them to be unambiguously interpreted as gas flares (*b, c*)



**Рис. 3.** Пример зарегистрированных в 132-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» гидроакустических аномалий, идентифицируемых как газовые факелы (*a*); подводное фото непрерывной струи газовых пузырьков на площадке у м. Мартьян на глубине 15 м (*b*)

**Fig. 3.** An example of hydroacoustic anomalies identified as gas flares recorded during the 132nd cruise of R/V “Professor Vodyanitsky” (*a*); underwater photograph of a continuous stream of gas bubbles at the 15-m depth at the site near Cape Martyan (*b*)

Достаточным доказательством газовой природы зарегистрированной аномалии являются гидроакустические образы с наклоном, а также регистрация треков одиночных поднимающихся пузырьков, скорости всплытия которых соответствуют их размерному составу [13]. На рис. 3, а приведена эхограмма с 11 идентифицированными сипами. Для каждого выхода в программе *EchoView* была выполнена оценка обратного акустического рассеивания на границе дно – вода, на основе которой далее был рассчитан поток газа.

**Гидрологические измерения.** Для вертикального профилирования гидрологических параметров использовался океанографический зонд *IDRONAUT Ocean Seven 320plus CTD* (Италия).

**Расчет объемов газовыделений.** Применен обратный метод расчета потока газа от точечного источника, подробно описанный в работе [13]. Используемые в нашей работе гидроакустические комплексы (*Simrad*, «Эхо-Байкал») оснащены гидроакустическими антеннами с шириной диаграммы направленности 7° и 8°. На глубинах 30–50 м они охватывают площадь дна 10–38 м<sup>2</sup>, поэтому в луч могут попадать одна или несколько струй газа. Каждая струя состоит из отдельных пузырьков, размеры и количество которых подчиняются закону распределения пузырьков по размеру. Скорость всплытия пузырька рассчитана по закону, приведенному в работе [27], а плотность метана соответствует его плотности на глубине выхода газа.

## Результаты

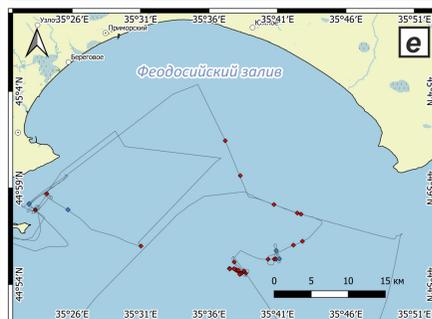
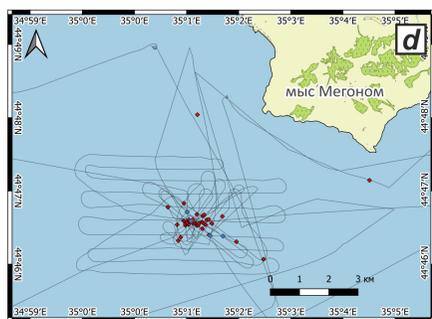
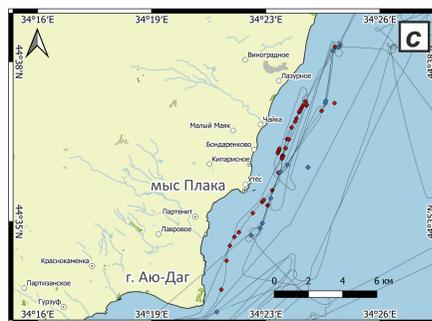
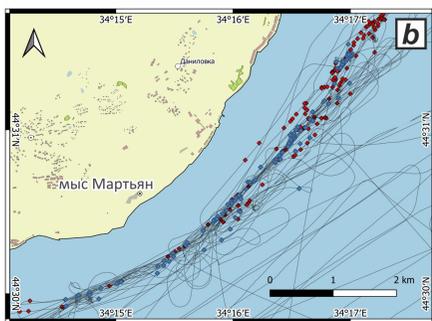
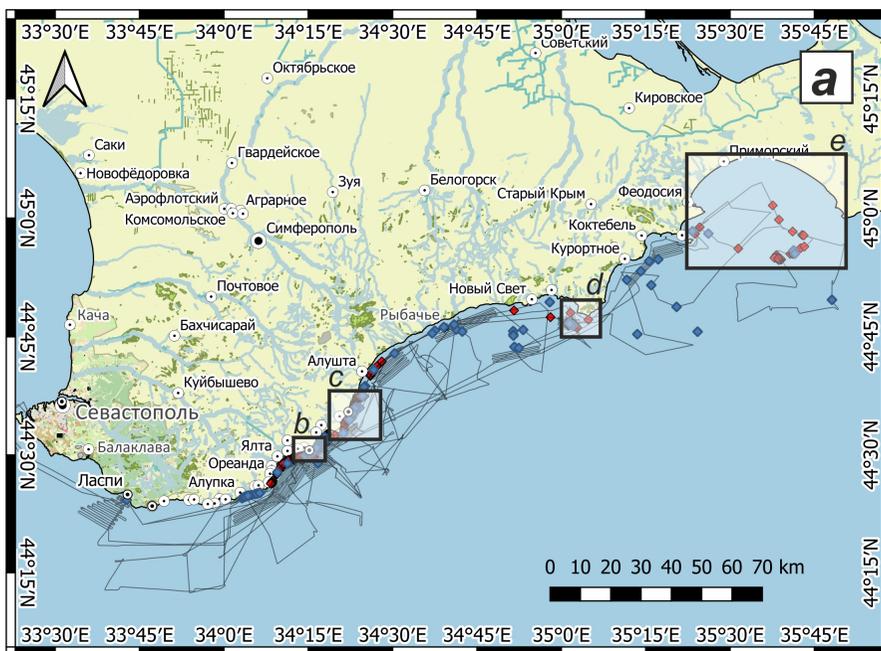
### Гидрологическая обстановка (сравнение разных сезонов)

В августе 2024 г. гидрологические параметры измерялись на пяти различных станциях глубиной от 35 до 42 м. Температура воды у дна варьировала от 10 до 14 °С, что соответствует диапазону значений, наблюдавшемуся в ноябре 2022 г. (12,5–15 °С). Концентрация растворенного кислорода составила 7,93–8,86 мг/л в августе 2024 г. и 7,99–8,17 мг/л в ноябре 2022 г. Температура придонной воды на глубинах более 35 м в весенний гидрологический сезон 2025 г. была несколько ниже по сравнению с предыдущими периодами (8,7–10,1 °С).

### Локализация сипов

На эхограммах пузырьковые газовыделения отображались в виде вытянутых вертикально ориентированных аномалий, соответствующих поднимающимся вверх отдельным пузырькам или их скоплениям (рис. 3, а). Из-за узкой диаграммы направленности антенн обоих используемых эхолотов определить реальную высоту факела для каждого обнаруженного сипа не представляется возможным, поскольку верхняя часть шлейфа часто терялась из луча при смещении судна относительно его центра. Однако некоторые струи достигали поверхности воды (например, Ф2, Ф3 на рис. 3, а). При этом истечение газа для большинства зарегистрированных сипов имело пульсирующий характер.

В 125-м рейсе (ноябрь 2022 г.) для подробного акустического обследования было выбрано 14 площадок от м. Ласпи до Феодосийского залива. Гидроакустическое зондирование на площадках проводилось по вдольбереговым галсам с шагом не более 0,2 морской мили. Тогда было обнаружено 211 отдельных сипов на площади 7,1 км<sup>2</sup> [18] (рис. 4).

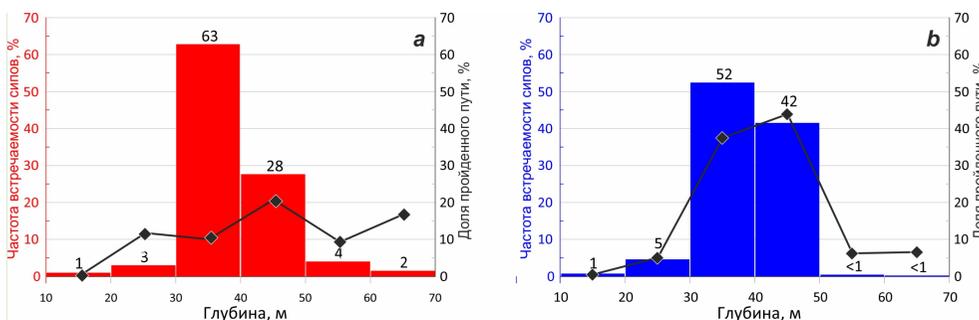


**Р и с. 4.** Распределение сипов, зарегистрированных в 125-м (синие ромбы) и 132-м (красные ромбы) рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в зоне исследования в целом (a), а также на отдельных площадках у м. Мартьян (b), м. Плака (c), м. Меганом (d) и в Феодосийском заливе (e). Маршрут экспедиции и гидроакустические галсы обозначены серой линией

**Fig. 4.** Distribution of the seeps recorded in the study area as a whole during the 125th (blue diamonds) and 132nd (red diamonds) cruises of R/V “Professor Vodyanitsky” (a), as well as at the individual sites near Cape Martyan (b), Cape Plaka (c), Cape Meganom (d), and in Feodosia Bay (e). Grey line indicates the expedition route and hydroacoustic tracks

Распределение сипов по глубине, полученное на первом этапе исследования, показало, что они регистрировались в интервале глубин от 19,7 до 78,5 м (рис. 5) и преимущественно располагались на ближайшем к берегу галсе. На основе пространственной группировки выделено четыре кластера сипов (г. Алупка, м. Мартьян, м. Плака и пос. Рыбачье), расположенных в западной части района исследований и включающих большинство выявленных гидроакустических аномалий. Почти 90 % всех газовых факелов было зафиксировано в районе м. Мартьян, в основном вдоль изобат 35–45 м (рис. 5, а). В восточной части района исследований преобладали одиночные факелы (см. рис. 4). Следует отметить, что вклад мелководных сипов (на глубинах менее 35 м), вероятно, недооценен, поскольку обследование мелководий было ограничено осадкой исследовательского судна. Так, например, в б. Ласпи, у м. Мартьян и Аю-Даг были описаны мелководные сипы на расстоянии не более 100 м от уреза воды, недоступные для НИС «Профессор Водяницкий» [20, 28].

На следующем этапе в 132-м рейсе (июль – август 2024 г.) выполнено детальное обследование глубин с максимальной плотностью сипов. Вдольбереговые зондирования на глубинах 35–45 м позволили значительно расширить границы ранее выявленных кластеров сипов. Доля пути, пройденного на указанных глубинах, составила около 90 % от общего трека рейса (рис. 5, б). Подробные исследования на участке от м. Ай-Годор до м. Плака показали, что распределение сипов практически непрерывно. Всего в 132-м рейсе было зарегистрировано 402 сипа. Были также выделены новые площадки газовыделений у м. Меганом и в Феодосийском заливе, где ранее регистрировались только единичные факелы.



**Рис. 5.** Распределение сипов по глубине и доля пройденного пути (черная линия) на выбранных глубинах (шаг 10 м) от общей протяженности трека для каждого рейса, по данным 125-го (а) и 132-го (б) рейсов НИС «Профессор Водяницкий»

**Fig. 5.** Distribution of seeps by depth, and portion of the distance travelled (black line) at the selected depths (10-m step) of the total route length for each cruise, based on the data from the 125th (a) and 132nd (b) cruises of R/V “Professor Vodyanitsky”

В 135-м рейсе (май – июнь 2025 г.) для мониторинговых исследований было выбрано четыре площадки: м. Мартьян, Плака, Меганом и г. Феодосия. Данные о количестве зарегистрированных сипов и площади просканированного дна для этих площадок в различных рейсах представлены в таблице.

**Параметры съемки и количество зарегистрированных сипов во время гидроакустического зондирования в трех рейсах НИС «Профессор Водяницкий» на четырех выбранных площадках газовыделений**

**Survey parameters and the number of seeps recorded at four selected gas emission sites during hydroacoustic sounding in three cruises of R/V “Professor Vodyanitsky”**

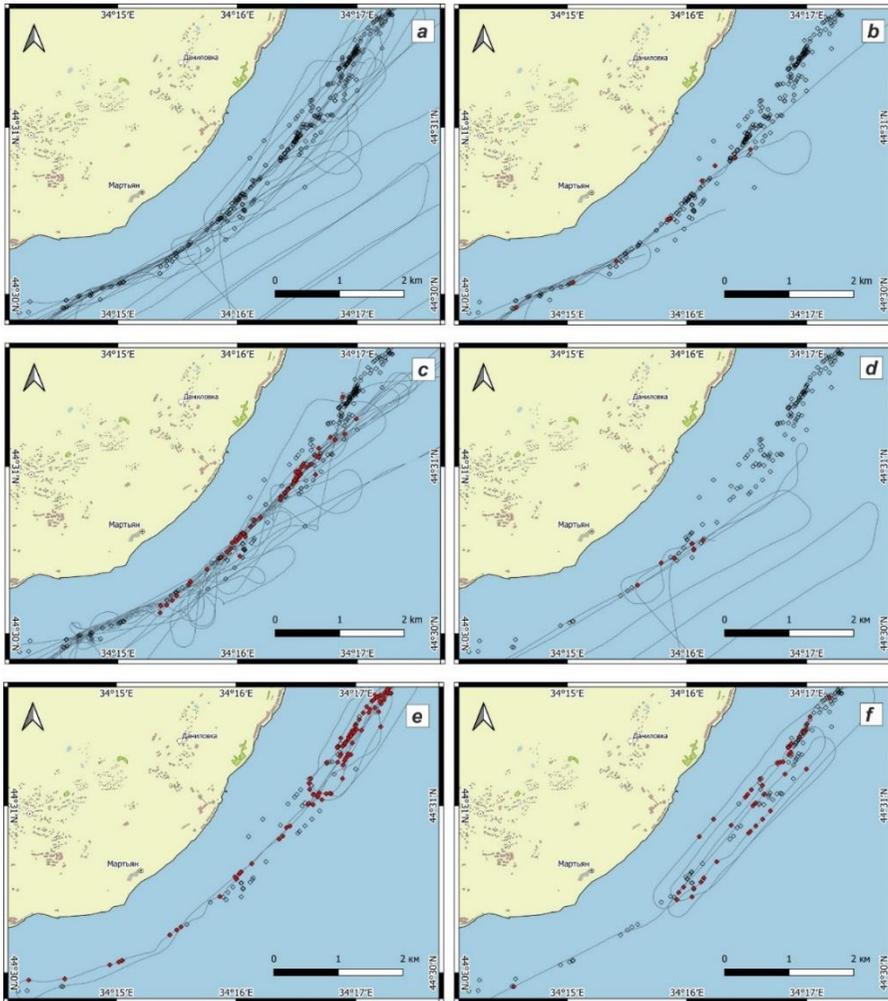
Дата регистрации / Record date	Пройденная дистанция, км / Distance travelled, km	Площадь изученного дна, км <sup>2</sup> / Area of the surveyed bottom, km <sup>2</sup>	Количество зарегистриро- ванных факелов, шт. / Number of rec- orded flares, pcs.	Количество факелов для расчетов потоков, шт. / Number of flares for flux calculations, pcs.
<i>М. Мартьян / С. Martyan</i>				
15.11.2022	27,0	0,12	11	–
23.11.2022	62,0	0,27	59	26
25.07.2024	37,1	0,35	173	35
06.08.2024	28,6	0,19	121	23
07.08.2024	23,5	0,16	45	8
12.06.2025	15,2	0,09	0	–
<i>М. Плака / С. Plaka</i>				
23.11.2022– 24.11.2022	37,0	0,19	13	–
09.08.2024	20,1	0,12	37	12
10.06.2025	23,3	0,14	0	–
<i>М. Меганом / С. Meganom</i>				
20.11.2022– 20.11.2022	34,5	0,19	4	–
04.08.2024	40,9	0,31	32	3
07.06.2025	19,4	0,12	12	–
<i>Феодосийский залив / Feodosia Bay</i>				
02.08.2024	24,7	0,14	18	5
04.06.2025	20,0	0,12	6	–

**Сравнение межсезонной активности и интенсивности сипов на примере площадки газовыделений у м. Мартьян**

В данной работе под активностью газовой выделений понимается совокупность характеристик как отдельного факела (длительность пульсации или время активных фаз и пауз между ними), так и площадки в целом (плотность сипов). Интенсивность сипов оценивается по рассчитанному с помощью гидроакустических данных газовому потоку от отдельных факелов.

Мы детально исследовали активность газовых сипов на примере площадки газовой выделений у м. Мартьян (рис. 6). Для этого мы сравнили данные гидроакустических съемок, собранные в 2022, 2024 и 2025 гг., как в целом для выявления межгодовых различий, так и для оценки изменчивости в течение отдельных дней во время каждого рейса. Данные 135-го рейса не представлены, так как на площадке не было зафиксировано ни одного факела. На рис. 6, а показаны все зафиксированные точки газовой выделений (ромбы), то есть места, где как минимум один раз были обнаружены гидроакустические аномалии в толще

воды. Пространственная и временная динамика активности газовых выбросов в ходе отдельных съемок представлена на рис. 6 (b – f). В результате пяти проведенных съемок на площадке у м. Мартьян (таблица, рис. 6) было установлено, что выделение газовых пузырьков происходило не постоянно, а носило прерывистый характер вплоть до полного отсутствия сипов, как это наблюдалось в июне 2025 г. (таблица).



**Р и с. 6.** Активность сипов у м. Мартьян за весь период исследования 2022–2025 гг. (ромбы – все зарегистрированные точки газовыделений) (a) и в отдельные дни 125-го рейса: 12.11.2022 (b); 23.11.2022 (c) – и 132-го рейса: 25.07.2024 (d); 06.08.2024 (e); 07.08.2024 (f) (красными ромбами обозначены точки, в которых в момент прохождения судна наблюдался активный выброс пузырьков; незакрашенными ромбами – точки, в которых либо не проводилось обследование в указанный период, либо не наблюдалось газовыделений)

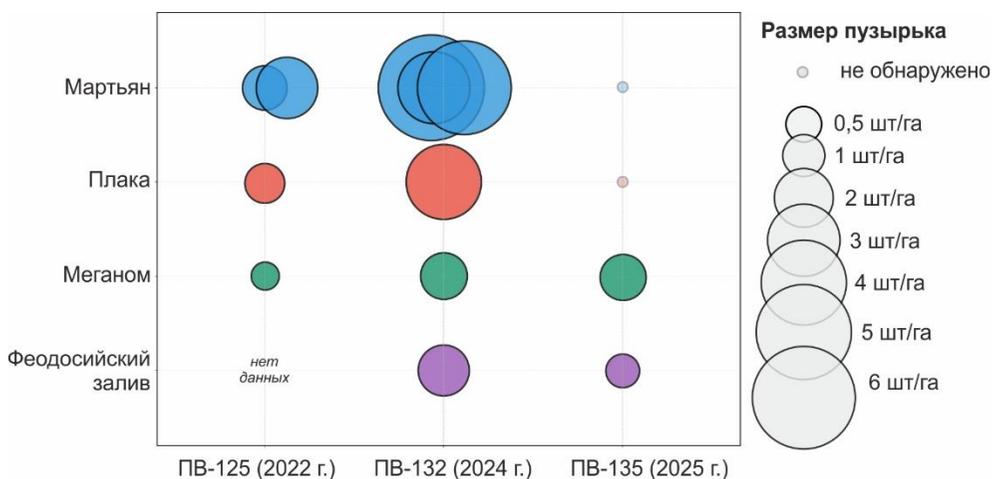
**F i g. 6.** Seep activity near Cape Martyan for the entire 2022–2025 study period (diamonds indicate all the recorded gas emission points) (a) and on individual days of cruise 125: November 12, 2022 (b); November 23, 2022 (c) and cruise 132: July 25, 2024 (d); August 6, 2024 (e); August 7, 2024 (f) (red diamonds indicate the points where active bubble emission was observed during the vessel passing; uncolored diamonds – the points where during the specified period, either no surveys were conducted or no gas emissions were observed)

### Потоки пузырькового газа

В рамках 125-го рейса были обработаны данные для 26 из 202 зарегистрированных выходов газа на глубинах 30–52 м. Расчетные значения расходов газа варьировали в диапазоне 4,07–88,6 л/сут (0,04–0,101 т/год) при среднем значении 38 л/сут (0,07 т/год). В 132-м рейсе было зарегистрировано более 412 выходов газа на глубинах 16–64 м, обработано для расчета газовых потоков 67. Расчетные значения расходов газа лежали в диапазоне 5,01–136 л/сут (0,006–0,163 т/год) при среднем значении 10,7 л/сут (0,011 т/год).

### Активность газовыделений

Периодичность газовыделений может меняться в диапазоне временных масштабов от нескольких секунд [29] до часов [30] и суток [31] под воздействием волнения, приливов, штормов и гидрологических факторов. Наши предыдущие данные показали, что количество активных сипов на площадке у м. Мартьян менялось на синоптическом масштабе [18]. Однако различия в исходных данных между рейсами, таких как пройденный путь и площадь отсканированного дна, часто не позволяют напрямую сравнивать между собой активность газовыделений по количеству зарегистрированных факелов. В связи с этим для сравнения временной и пространственной изменчивости активности газовыделений мы использовали удельный показатель – плотность сипов (количество сипов, отнесенное к площади просканированного дна). На рис. 7 показана плотность сипов для четырех площадок, исследованных в 2022–2025 гг. На всех площадках максимальная плотность сипов наблюдалась в 2024 г., достигая 6,3 сипа на 1 га на площадке у м. Мартьян.



**Р и с. 7.** Плотность сипов (отношение количества сипов к площади просканированного дна, шт/га) для четырех площадок, исследованных в 2022–2025 гг. (ПВ-125 обозначает 125-й рейс НИС «Профессор Водяницкий», ПВ-132 – 132-й рейс, ПВ-135 – 135-й рейс). Для площадки у м. Мартьян было проведено несколько измерений в 2022 и 2024 гг. (см. таблицу).

**F i g. 7.** Seep density (ratio of the seep number to the scanned bottom area, pcs/ha) for four sites surveyed in 2022–2025 (PV-125 denotes the 125th cruise of R/V “Professor Vodyanitsky”, PV-132 – the 132nd cruise, and PV-135 – the 135th cruise). At the site near Cape Martyan, several measurements were done in 2022 and 2024 (see the table)

Снижение активности сипов в 135-м рейсе вплоть до полного отсутствия зарегистрированных факелов на площадках у м. Мартьян и Плака может объясняться изменением периодичности газоотдачи: активные фазы стали короче, а паузы значительно длиннее. Так, в работе [32] показана высокая спорадичность и нерегулярность сипов в Черном море к западу от Крымского п-ова на глубине 92 м. Большая часть сипов были активны менее 20 % времени наблюдения. Высокая изменчивость активности газовыделений осложняет обнаружение и фиксацию мелководных сипов стандартными акустическими методами, так как время пролета пузырей в толще воды на глубинах менее 100 м не превышает 7,5 мин. С другой стороны, краткосрочная регистрация может привести к переоценке потоков, если не будет учтена информация об изменчивости активности отдельных сипов.

На примере мелководных сипов термогенной природы в б. Ласпи нами было показано, что их периодичность зависит от волнения моря: начиная с определенного порогового значения амплитуды волны, период мелкомасштабной пульсации сипа коррелировал с периодом волны [17]. При этом межсезонная и межгодовая активность этих газовыделений изменяется в относительно узком диапазоне. Вероятно, процессы в верхних слоях донных осадков и гидросфере слабо влияют на газоотдачу глубинного источника, тогда как биогенный газ осадочного чехла более подвержен воздействию факторов, затрагивающих гидросферу.

#### **Источники и происхождение углеводородных флюидов**

Один из главных нерешенных вопросов в исследованиях мелководных сипов связан с природой их возникновения в прибрежных районах на небольших глубинах. Осадочный слой в мелководных районах маломощен (не более 10–20 м [21]) и часто сложен песчаными отложениями. Во многих случаях остается открытым вопрос, являются ли мелководные пузырьковые газовыделения результатом просачивания газа из глубинных слоев, или выделяющийся газ образуется в верхнем слое осадка. Газогеохимические исследования демонстрируют, что в районе ЮБК мелководные сипы имеют различный изотопный состав углерода метана, что указывает на разный генезис газа [7, 28]. Различная природа газовых аномалий также подтверждается геоакустическими исследованиями, проведенными у ЮБК [33].

#### **Факторы, влияющие на распределение и активность сипов**

Критическим фактором для проявления стабильных струйных газовыделений из дна является наличие перекрывающего слоя, который обеспечивает накопление углеводородов, а также трещин и/или разломов, формирующих пути миграции внутри пласта и через перекрывающий слой к морскому дну или в атмосферу [34]. Накопление углеводородов часто происходит в антиклиналях и других ловушках [35], отражая восходящую миграцию через пласт-коллектор. Наши мониторинговые исследования подтвердили наличие отдельных точек, в которых газовыделения были активны в различные периоды, что свидетельствует о существовании стабильных миграционных путей. Большинство зарегистрированных сипов расположены не глубже 35–40 м. Предполагается, что одним из потенциальных путей миграции газа могут служить ослабленные зоны. В прибрежной части песчано-галечные отложения сменяются на больших глубинах глинисто-илистыми породами, которые могут выполнять

роль флюидоупора. Вдоль границы между этими отложениями возможна миграция газа из более глубоких горизонтов.

Интенсивность и периодичность газовыделений контролируются разностью давлений внутри пласта-коллектора и гидростатическим давлением, а также наличием и мощностью микробного фильтра. В работе [30] описана модель, которая учитывает указанные выше флюидодинамические процессы. Согласно одному из выводов, сделанному в работе, система сипов характеризуется временем отклика на изменения форсирующего фактора, такого как гидростатическое давление прилива. Это обуславливает крайне нелинейную реакцию газовыделений на изменения гидростатического давления, причем чувствительность обратно пропорциональна потоку [30]. Кроме того, механизм выхода пузырькового и флюидного газа может быть связан с процессом субмаринной разгрузки пресных грунтовых вод [36–38].

Для газа биогенного генезиса значимым фактором может выступать температура придонного слоя воды. Ее повышение может влиять на микробную активность в поверхностных осадках, стимулируя образование метана в результате разложения органического вещества [39].

### **Заключение**

В ходе рейсов НИС «Профессор Водяницкий» в 2022–2025 гг. на шельфе Черного моря у юго-восточного побережья Крыма были проведены гидроакустические исследования с целью выявления и последующего мониторинга зон пузырьковых газовых выходов (сипов). Работы включали три этапа: 1) широкие поисковые работы на шельфе у юго-восточных берегов Крыма на глубинах 10–80 м; 2) уточнение границ обнаруженных площадок сипов; 3) мониторинг активности газовыделений на отдельных площадках. Суммарно за все периоды исследований обнаружено более 600 сипов.

Распределение сипов по глубинам, полученное на первом этапе, показало, что около 90 % всех зарегистрированных факелов расположено на глубинах 35–45 м. Для анализа временной и пространственной изменчивости активности газовыделений мы использовали удельный показатель – плотность сипов (отношение количества сипов к площади просканированного дна). На всех площадках максимальная плотность сипов наблюдалась летом 2024 г., достигая на площадке у м. Мартьян 6,3 сипа на гектар.

На основе гидроакустических данных рассчитаны средние значения расхода газа от отдельных сипов, которые составили 38 л/сут (0,07 т/год) в 2022 г. и 10,7 л/сут (0,011 т/год) в 2024 г.

В работе рассмотрен генезис сипов и природные факторы, которые могут влиять на их распределение и активность. Геохимические данные свидетельствуют о разном генезисе метана – от биогенного в поверхностных осадках до термогенного из более глубоких горизонтов. Распределение сипов сосредоточено в основном в интервале глубин 35–45 м, что, вероятно, связано с зоной контакта песчано-галечных и глинисто-илистых отложений, выполняющей роль области миграции и/или флюидоупора. Активность (периодичность и интенсивность выбросов) демонстрирует нелинейную зависимость от внешних формирующих факторов, таких как изменения гидростатического давления

(приливы, давление), которые оказывают более значимое влияние на газ биогенного происхождения.

Струйные газовыделения, зарегистрированные в южнобережном секторе крымского черноморского шельфа, требуют дальнейших исследований для оценки их роли в формировании экологического состояния экосистемы, в том числе в акватории природного заповедника «Мыс Мартыан».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Etioppe G., Feyzullayev A., Baciu C. L.* Terrestrial methane seeps and mud volcanoes: a global perspective of gas origin // *Marine and Petroleum Geology*. 2009. Vol. 26, iss. 3. P. 333–344. EDN MEZIAP. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.03.001>
2. *Judd A. G.* Natural seabed gas seeps as sources of atmospheric methane // *Environmental Geology*. 2004. Vol. 46, iss. 8. P. 988–996. EDN ХОПДОП. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1083-3>
3. *Kvenvolden K. A., Lorenson T. D., Reeburgh W. S.* Attention turns to naturally occurring methane seepage // *EOS, Transactions American Geophysical Union*. 2001. Vol. 82, iss. 40. P. 457. <https://doi.org/10.1029/01EO00275>
4. *Егоров В. Н., Артемов Ю. Г., Гулин С. Б.* Метановые сипы в Черном море: средообразующая и экологическая роль / Под ред. Г. Г. Поликарпова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 405 с.
5. *Леш А. Ю., Иванов М. В.* Биогеохимический цикл метана в океане. Москва : Наука, 2009. 576 с.
6. Микробные процессы и генезис струйных метановых газовыделений прибрежных районов Крымского полуострова / Т. В. Малахова [и др.] // *Микробиология*. 2015. Т. 84, № 6. С. 743–752. EDN UVEOFF. <https://doi.org/10.7868/S0026365615060063>
7. Биогеохимические характеристики мелководных струйных метановых газовыделений в прибрежных районах Крыма в сравнении с глубоководными сипами Черного моря / Т. В. Малахова [и др.] // *Морской биологический журнал*. 2020. Т. 5, № 4. С. 37–55. EDN AEHSRS. <https://doi.org/10.21072/mbj.2020.05.4.04>
8. *Leifer I.* A synthesis review of emissions and fates for the Coal Oil Point marine hydrocarbon seep field and California marine seepage // *Geofluids*. 2019. Vol. 2019, iss. 1. 4724587. EDN URMMPU. <https://doi.org/10.1155/2019/4724587>
9. *Leifer I., MacDonald I.* Dynamics of the gas flux from shallow gas hydrate deposits: interaction between oily hydrate bubbles and the oceanic environment // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 210, iss. 3–4. P. 411–424. EDN BGOKCB. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00173-0](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00173-0)
10. *Muyakshin S. I., Sauter E.* The hydroacoustic method for the quantification of the gas flux from a submersed bubble plume // *Oceanology*. 2010. Vol. 50, iss. 6. P. 995–1001. EDN OHNTBP. <https://doi.org/10.1134/S0001437010060202>
11. Methane discharge from a deep-sea submarine mud volcano into the upper water column by gas hydrate-coated methane bubbles / E. J. Sauter [et al.] // *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. Vol. 243, iss. 3–4. P. 354–365. EDN LJPHKH. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.01.041>
12. *Leifer I.* Seabed bubble flux estimation by calibrated video survey for a large blowout seep in the North Sea // *Marine and Petroleum Geology*. 2015. Vol. 68, part B. P. 743–752. EDN WRTMLX. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.08.032>
13. A new methodology for quantifying bubble flow rates in deep water using splitbeam echosounders: examples from the Arctic offshore NW-Svalbard / M. J. Veloso [et al.] // *Limnology and Oceanography: Methods*. 2015. Vol. 13, iss. 6. P. 267–287. EDN UONQKV. <https://doi.org/10.1002/lom3.10024>
14. Sonar gas flux estimation by bubble insonification: application to methane bubble flux from seep areas in the outer Laptev Sea / I. D. Leifer [et al.] // *The Cryosphere*. 2017. Vol. 11, iss. 3. P. 1333–1350. EDN XNBRUE. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1333-2017>

15. *Leifer I.* Characteristics and scaling of bubble plumes from marine hydrocarbon seepage in the Coal Oil Point seep field // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010. Vol. 115, iss. C11. C11014. EDN MZYIFO. <https://doi.org/10.1029/2009JC005844>
16. Geological control and magnitude of methane ebullition from a high-flux seep area in the Black Sea – the Kerch seep area / M. Romer [et al.] // *Marine Geology*. 2012. Vol. 319–322. P. 57–74. EDN RIIFNN. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.07.005>
17. Passive acoustic monitoring for seabed bubble flows: Case of shallow methane seeps at Laspi Bay (Black Sea) / T. V. Malakhova [et al.] // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2024. Vol. 156, iss. 6. P. 4202–4216. EDN RSFLFL. <https://doi.org/10.1121/10.0034605>
18. Shallow gas seeps offshore Crimea (Black Sea): mapping, bubble flow quantification and geochemical study / T. V. Malakhova [et al.] // *Regional Studies in Marine Science*. 2025. Vol. 89. 104290. EDN CQSBN. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104290>
19. Среодообразующий эффект пузырьковых газовыделений в Голубой бухте (Черное море): кислородный режим и бактериальные маты / Т. В. Малахова [и др.] // *Геохимия*. 2023. Т. 68, № 3. С. 294–305. EDN MCZGGW. <https://doi.org/10.31857/S0016752523030081>
20. Обнаружение струйных газовыделений в акватории у мыса Мартыан / В. Н. Егоров [и др.] // *Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада*. 2018. Вып. 126. С. 9–13. EDN YTEPKD. <https://doi.org/10.25684/NBG.boolt.126.2018.01>
21. *Азаркова-Лях И. В.* Природные комплексы береговой зоны Южного берега Крыма // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология*. 2015. Т. 1 (67), № 3. С. 42–58. EDN VSMBNJ.
22. A study of the gas seep Istok in the Selenga shoal using active acoustic, passive acoustic and optical methods / M. M. Makarov [et al.] // *Journal of Great Lakes Research*. 2020. Vol. 46, iss. 1. P. 95–101. EDN YMWCP. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.014>
23. *Judd A. G., Hovland M.* Seabed fluid flow: the impact on geology, biology and the marine environment. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 492 p.
24. Акустические исследования глубоководных газовых факелов Охотского моря / Д. В. Черных [и др.] // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332, № 10. С. 57–68. EDN DGQTZM. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3286>
25. Contributions to atmospheric methane by natural seepages on the UK continental shelf / A. Judd [et al.] // *Marine Geology*. 1997. Vol. 137, iss. 1–2. P. 165–189. EDN AHMQFJ. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(96\)00087-4](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(96)00087-4)
26. Atmospheric methane flux from bubbling seeps: Spatially extrapolated quantification from a Black Sea shelf area / J. Greinert [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010. Vol. 115, iss. C1. C01002. EDN YSFMID. <https://doi.org/10.1029/2009JC005381>
27. *Leifer I., Patro R. K.* The bubble mechanism for methane transport from the shallow sea bed to the surface: A review and sensitivity study // *Continental Shelf Research*. 2002. Vol. 22, iss. 16. P. 2409–2428. EDN BBLYYX. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(02\)00065-1](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(02)00065-1)
28. Геолого-геохимическая характеристика естественных проявлений углеводородов континентальной окраины юго-западного Крыма, бухта Ласпи / Е. А. Краснова [и др.] // *Георесурсы*. 2024. Т. 26, № 4. С. 83–100. EDN CQUIV. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.4.13>
29. Natural marine seepage blowout: Contribution to atmospheric methane / I. Leifer [et al.] // *Global Biogeochemical Cycles*. 2006. Vol. 20, iss. 3. GB3008. EDN MLGOTH. <https://doi.org/10.1029/2005GB002668>
30. *Leifer I., Boles J.* Turbine tent measurements of marine hydrocarbon seeps on subhourly timescales // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2005. Vol. 110, iss. C1. C01006. <https://doi.org/10.1029/2003JC002207>
31. Temporal variation in natural methane seep rate due to tides, Coal Oil Point area, California // J. R. Boles [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001. Vol. 106, iss. C11. P. 27077–27086. <https://doi.org/10.1029/2000JC000774>
32. Atmospheric methane flux from bubbling seeps: Spatially extrapolated quantification from a Black Sea shelf area / J. Greinert [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010. Vol. 115, iss. C1. C01002. EDN YSFMID. <https://doi.org/10.1029/2009JC005381>

33. Сейсмостратиграфические исследования Крымского шельфа методом непрерывного сейсмоакустического профилирования / А. В. Хортов [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 512, № 2. С. 295–301. <https://doi.org/10.31857/S2686739723601023>
34. *Abrams M. A.* Significance of hydrocarbon seepage relative to petroleum generation and entrapment // *Marine and Petroleum Geology*. 2005. Vol. 22, iss. 4. P. 457–477. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.08.003>
35. *Bonini M.* Interrelations of mud volcanism, fluid venting, and thrust-anticline folding: examples from the external northern Apennines (Emilia-Romagna, Italy) // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2007. Vol. 112, iss. B8. B08413. EDN XMHJZD. <https://doi.org/10.1029/2006JB004859>
36. *Кравченко В. Г.* Механизм функционирования подводных газовых факелов Черного моря // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2008. № 1 (11). С. 106–115. EDN LALWEV.
37. *Whiticar M. J.* Diagenetic relationships of methanogenesis, nutrients, acoustic turbidity, rockmarks and freshwater seepages in Eckernförde Bay // *Marine Geology*. 2002. Vol. 182, iss. 1–2. P. 29–53. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00227-4](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00227-4)
38. Distribution of Hydrological Parameters over the Methane Seep Site in the Golubaya Bay (the Black Sea): A Connection with Submarine Freshwater Discharge / T. V. Malakhova [et al.] // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2021. Vol. 46, iss. 11. P. 792–798. EDN VSSPNK. <https://doi.org/10.3103/S1068373921110091>
39. *Damm E., Ericson Y., Falck E.* Waterside convection and stratification control methane spreading in supersaturated Arctic fjords (Spitsbergen) // *Continental Shelf Research*. 2021. Vol. 224. 104473. EDN XEWRCH. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104473>

*Об авторах:*

**Макаров Михаил Михайлович**, старший научный сотрудник, Лимнологический институт СО РАН (Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, д. 3), кандидат географических наук, **ResearcherID: J-4851-2018**, **Scopus Author ID: 36845115900**; **ORCID ID: 0000-0002-1758-4458**, **SPIN-код: 6223-8328**, [mmmsoft@hlserver.lin.irk.ru](mailto:mmmsoft@hlserver.lin.irk.ru)

**Кучер Константин Мирославович**, ведущий инженер, Лимнологический институт СО РАН (Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, д. 3), [kost@hlserver.lin.irk.ru](mailto:kost@hlserver.lin.irk.ru)

**Будников Андрей Александрович**, старший научный сотрудник, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3452-2360**, **Scopus Author ID: 6602252189**, **WoS ResearcherID: E-9926-2014**, **SPIN-код: 1633-6870**, [budnikovaa@my.msu.ru](mailto:budnikovaa@my.msu.ru)

**Помогаева Татьяна Васильевна**, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (Россия, 299011, г. Севастополь, проспект Нахимова, 2), кандидат сельскохозяйственных наук, **SPIN-код: 5721-4823**, [pomogatyana@mail.ru](mailto:pomogatyana@mail.ru)

**Малахова Татьяна Владимировна**, старший научный сотрудник, отдел радиационной и химической биологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (Россия, 299011, г. Севастополь, проспект Нахимова, 2), Международный научный центр в области экологии и вопросов изменения климата, Научно-технологический университет «Сириус» (Россия, Федеральная территория «Сириус», Олимпийский пр-т, 1), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9653-7341**, **ResearcherID: ABE-3955-2020**, **Scopus Author ID: 56585887900**, **SPIN-код: 4625-9702**, [t.malakhova@imbr-ras.ru](mailto:t.malakhova@imbr-ras.ru)