

Мониторинг пузырьковых метановых газовыделений и гидрологических параметров в бухте Ласпи (Крым)

А.А. Будников,^{1,*} И.Н. Иванова,¹ А.И. Хурчак,² Т.В. Малахова²

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН». Россия, 299011, Севастополь, проспект Нахимова, д. 2
(Поступила в редакцию 01.04.2023; принята к публикации 21.04.2023)

Работа посвящена исследованиям временной изменчивости активности мелководных метановых сипов в прибрежной области бухты Ласпи и высокочастотному мониторингу суточной динамики гидрологических параметров в этом районе. В работе представлены результаты, полученные в летние месяцы 2016, 2018–2021 гг. и в начале февраля 2023 г. При помощи пассивного акустического метода показано, что интенсивность и периодичность испускания пузырькового газа отдельными точечными источниками может варьировать в течение суток и от сезона к сезону. Получено, что над действующей площадкой сипов наблюдается пониженное содержание растворенного кислорода и его насыщенность по сравнению с удаленной (фоновой) площадкой. Отмечены моменты резкого снижения содержания кислорода, не сопровождающиеся изменением температуры и других гидрологических параметров.

PACS: 92.05.Hj, 92.10.Lq, 92.60.Cc УДК: 551.46.06.

Ключевые слова: метановые сипы, бухта Ласпи, пассивный акустический метод, содержание растворенного кислорода, сезонный мониторинг пузырьковых газовыделений.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2340901](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2340901)

ВВЕДЕНИЕ

Просачивания из морского дна легких углеводородов широко распространены на Черноморском шельфе [1]. Пузырьковые газовыделения (сипы) наблюдаются в Черном море от глубин порядка 2 км [1, 2] и до самого берега [3, 4]. Выделяющийся газ в разных районах имеет различное происхождение (биогенное и термогенное), из-за чего интенсивность и периодичность газовыделений может различаться в зависимости от сезона, либо внешних условий [4].

В бухте Ласпи (44.42099° N; 33.70766° E, Южное побережье Крыма) поднимающиеся недалеко от берега с глубины 1.5–2 м струйки пузырьков впервые обнаружил в августе 2004 г. Н.В. Шик [5]. Площадь газовойделяющей области, на которой наблюдалось 8 отдельных точек выхода газа с различной частотой испускания пузырьков, тогда была оценена в 100–200 м². В дальнейшем активность газовыделений в бухте Ласпи неоднократно подтверждалась [6]. Комплексные наблюдения начались с 2014 г., когда на указанной площадке впервые были проведены гидроакустические, газохимические и микробиологические исследования [3, 7–9]. Было показано, что пузырьковый газ в бухте Ласпи имеет глубинное (термогенное) происхождение, на что указывает компонентный (C₁/C₂₊) и изотопный состав ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ — 33.34‰), а также низкие скорости

микробных процессов продукции и окисления метана в верхнем слое донных осадков [3, 4]. Термогенный генезис дает основание полагать, что обнаруженные сипы в бухте Ласпи обладают сезонной устойчивостью по сравнению с другими мелководными биогенными газовыделениями Гераклейского полуострова, которые прекращаются с понижением температуры [10, 11]. Проведенные экспедиции в декабре 2015 г. и феврале 2023 г. подтвердили это предположение.

Начиная с 2016 г. авторами статьи проведены ежегодные измерения гидрологических параметров непосредственно в районе газовойделяющей площадки в бухте Ласпи с целью мониторинга характеристик морской среды и оценки возможного воздействия на них газовыделений [12]. Летом 2018 г. для количественной оценки величины газового потока, дополнительно к уже применяемым методам видеорегистрации и измерения скорости наполнения выделяющимся газом мерных сосудов, авторами был впервые применен пассивный акустический метод [13]. Этот метод активно используется многими исследователями для оценки газовых потоков глубоководных сипов [14–18]. Полученные в бухте Ласпи акустические данные показали применимость пассивного акустического метода, в том числе и на мелководье, несмотря на значительное количество шумов различной природы в прибрежной зоне. Начиная с 2019 г. этот метод использовался авторами при проведении измерений регулярно.

Пассивный акустический метод основан на принципе связанности размеров пузырька газа с частот-

* E-mail: aa.budnikov@physics.msu.ru

ным спектром акустического сигнала, производимым пузырьком при его образовании, отрыве от подстилающей поверхности и всплытии. Начало методу положила работа М. Миннарта, в которой были рассмотрены гармонические колебания малой амплитуды поверхности сферического газового пузырька, находящегося внутри жидкости [19]. Согласно выводу М. Миннарта, объем пузырька V связан с его собственной частотой колебаний f_0 (нулевой модой) формулой

$$V = \frac{1}{6\pi^2 f_0^3} \sqrt{\left(\frac{3\gamma P}{\rho}\right)^3},$$

где ρ — плотность окружающей пузырек среды, P — давление на пузырек со стороны окружающей среды, γ — показатель адиабаты содержащегося в пузырьке газа.

В дальнейших работах в данной области было показано, что уравнение Миннарта следует рассматривать как линейное приближение более сложного уравнения, в котором необходимо учитывать эффекты поверхностного натяжения, давление водяного пара, вязкость жидкости и т.п. [20]. Практическое применение формулы Миннарта с целью определения размера пузырьков, выделяющихся из природных сипов, выявило ряд сложностей, связанных с наличием в спектрограмме сигнала дополнительных частотных максимумов. Причин существования таких максимумов достаточно много. Они могут быть связаны, например, с эмиссией акустического сигнала, возникающей при отрыве так называемой «шейки» формирующегося пузырька, с тем, что форма реального пузырька отличается от сферической, с взаимодействием пузырьков, если скорость их выхода достаточно велика [20, 21]. Однако, несмотря на эти сложности, применение формулы Миннарта для оценки пузырькового потока дает результат, согласующийся с оценками, получаемыми другими методами: с помощью видеорегистрации или с использованием мерных сосудов, устанавливаемых над источником [15, 21, 22].

Данная работа продолжает наши исследования интенсивности и временной изменчивости газовых потоков, а также гидрологических параметров в районах мелководных сипов. Целью работы является оценка межгодовых и сезонных вариаций объемов пузырьковых газовыделений и гидрологических параметров воды в районе углеводородной разгрузки в бухте Ласпи.

1. МЕТОДИКА СВОРА ДАННЫХ И КАЛЕНДАРЬ РАБОТ

Оценка газовых потоков при помощи пассивного акустического метода. Для записи акустических сигналов, производимых точечным источником пузырькового газа, использовался широкополосный гидрофон, размещаемый в непосредственной близости от источника (рис. 1, а, б). Так-

же для осуществления визуального контроля рядом с источником располагалась компактная видеокамера (рис. 1, а). Анализ акустических записей проводился с помощью бесплатного открытого кросс-платформенного программного обеспечения Audacity (рис. 1, в, г, д).

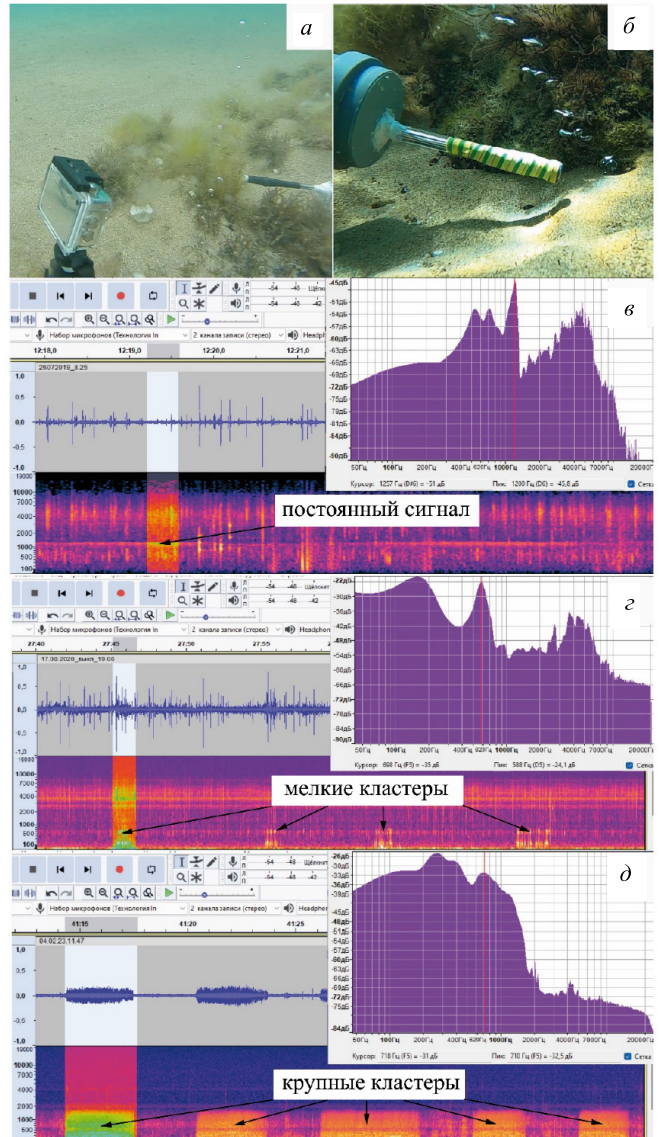


Рис. 1. Подводные фотографии сипов в бухте Ласпи: а — 2019 г., б — 2020 г. и примеры акустических записей (Audacity), полученных в в — 2019 г., г — 2020 г., д — 2023 г

Акустические записи на площадке метановых сипов в бухте Ласпи проводились летом 2019, 2020 и 2021 гг., а также в феврале 2023 г. Пузырьковые газовыделения в отмеченном районе наблюдались во все указанные периоды, при этом их интенсивность несколько различалась. В целом тип газовыделений на площадке оставался неизменным: наблюдалось около 20 точек устойчивого выхода пузырьков с размером пузырьков 2–5 мм. Точки газовыделений находились преимущественно на поверхности скального образования, представляющего со-

бой асимметричный вал, вытянутый вдоль береговой линии. Отдельные спорадические выходы более крупных пузырей (около 1 см в диаметре) были зарегистрированы из песчаного дна. Для записи акустических сигналов гидрофон устанавливался рядом с точкой наиболее активной эманации пузырьков, на расстоянии 5–15 см (рис. 1, *a*, *b*). Продолжительность записи зависела от технических возможностей записывающего устройства и погодных условий. В 2019 г. была получена запись продолжительностью 44 мин. В 2020 г. — запись продолжительностью 7 ч, в 2021 г. продолжительность записи составила 25 мин, в 2023 г. — 2 ч. Методические особенности оценки размерных характеристик пузырьков и расчета объемов подробно описаны в работе [13].

Гидрологические параметры, а также модуль скорости и направление течения морской воды над сипом во все годы измерялись при помощи многопараметрического зонда RCM 9 LW AANDERAA INSTRUMENTS (Норвегия). Измеряемые параметры: температура T (точность/разрешение датчика $\pm 0.05/0.03^\circ\text{C}$), электропроводность C (точность/разрешение датчика $\pm 0.018 \text{ мС}\cdot\text{см}^{-1}/0.002 \text{ мС}\cdot\text{см}^{-1}$), концентрация растворенного кислорода O_2 (точность/разрешение датчика $< 8 \text{ мкмоль/л}$ (либо 5% от величины)/ $< 1 \text{ мкмоль/л}$), мутность Tu (точность/разрешение датчика $\pm 10/0.5 \text{ NTU}$), скорость (точность/разрешение датчика $1\%/0.3 \text{ см/с}$), направление скорости (точность/разрешение датчика $\pm 5^\circ/0.35^\circ$). Во время измерений зонд RCM 9 размещался непосредственно над действующим сипом, при этом расстояние от дна до датчиков составляло около 30 см. В феврале 2023 г. одновременно с измерениями над сипом были проведены измерения гидрологических параметров на площадке, принятой за фоновую, которая находилась на расстоянии порядка 150 м вдоль берега, западнее от газовыделяющей площадки. Измерения на фоновой площадке также выполнялись прибором производства AANDERAA INSTRUMENTS, имеющим датчики с полностью аналогичными вышеперечисленным характеристиками.

Показания датчиков над сипом снимались в 2016, 2018, 2021, 2023 гг. каждые 34 с, в 2019, 2020 — каждые 42 с, на фоновой станции в 2023 — каждые 120 с. Значение солёности рассчитывалось по измеренным значениям температуры и электропроводности [23]. Насыщение морской воды кислородом рассчитывалось по табличным значениям растворимости O_2 с учетом температуры и солёности воды [24].

Измерения основных гидрологических параметров на площадке проводились в 2016 и 2018 гг. в течение 14 ч, в 2019, 2020 и 2021 гг. в течение 24 ч. В феврале 2023 г. измерения были прерваны спустя 2 ч после начала из-за ухудшившихся погодных условий и риска потери оборудования. Кроме вышеуказанных измерений, за сутки до основной постановки в 2016 и в 2018 гг. были выполнены непродолжительные измерения, продлившиеся в 2016 г. 2.5 ч, а в 2018 г. 4 и 6 ч.

должительные измерения, продлившиеся в 2016 г. 2.5 ч, а в 2018 г. 4 и 6 ч.

Волнение во все время проведения измерений не превышало 3 балла. Наибольшее волнение наблюдалось в 2018 и в 2023 гг.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Оценка объемов выделяющегося пузырькового газа

Фрагменты полученных в 2019, 2020 и 2023 гг. аудиозаписей в формате WAV приведены в качестве примера на рис. 1 *в*, *г*, *д*, соответственно в виде снимков экрана программы обработки аудиозаписей Audacity. В верхней части представлена аудиозапись в виде волнограммы, в нижней — в виде спектрограммы в диапазоне частот от 0 до 20000 Гц. Яркость на спектрограмме зависит от громкости сигнала на определенной частоте. По горизонтальной оси отложено время (мин:с) от начала записи. Стрелками показаны акустические сигналы, производимые выделяющимися пузырьками. На врезках приведены спектры выделенных на аудиограмме участков записи в координатах громкость–частота.

В 2019 г. пузырьковый газ из источника выходил практически непрерывно: истечение пузырьков тонкой непрерывающейся по 10–15 мин струйкой чередовалось паузами в несколько минут. Частотный спектр акустического сигнала, производимого пузырьками (рис. 1, *в*), показал наличие ярко выраженного максимума на частоте около 1200 Гц, соответствующего по Миннарту диаметру пузырьков 5–6 мм, что совпадало с данными видеорегистрации. Оценка газового потока с площадки в предположении неизменной интенсивности выхода газа источников составляет около 200 л/сут.

В 2020 г. за время 7-часовой записи характер выхода газа изменялся от одиночных пузырей и непродолжительных (1–3 с) пузырьковых кластеров из 3–5 пузырьков в течение первых трех часов записи (рис. 1, *г*) до пакетов длительностью около 3-х с и состоящих из нескольких десятков пузырьков в последующее время. Количество выходов кластеров в минуту при этом составляло примерно 4–8 шт. Максимум частотного спектра сигнала от пузырьков приходился на 1333 Гц, что соответствует диаметру пузырька, равному 5.2 мм. Начиная с четвертого часа записи, на полученной аудиограмме появляется сигнал от еще одного пузырькового источника, из которого кластеры длительностью около 3 с выходили приблизительно 6 раз в минуту. Исходя из анализа спектрограммы размер таких пузырьков составлял около 5.5 мм в диаметре. Оценка газового потока с площадки составляет около 25 л/сут.

В 2021 г. в точке выхода регистрировались кластеры со средней скоростью выхода 13 кластеров в минуту и продолжительностью одного кластера 3–4 с. Количество пузырьков в кластере насчитывалось

валось около 100 шт. Максимум частотного спектра пузырьков составлял 2375 Гц, что соответствует диаметру пузырька 3 мм. Оценка газового потока с площадки составила около 26.5 л/сут.

за, с длительностью одного кластера от 1 до 12.5 с (рис. 1, *д*). Средняя скорость выхода кластеров составляла 11 кластеров в минуту. Средняя продолжительность одного кластера — около 4 с. Среднее количество пузырьков в кластере — около 90 шт. (расчетный диаметр пузырька 6 мм). Оценка газового потока с площадки составляет около 165 л/сут.

2.2. Временная изменчивость гидрологических параметров над площадкой газовыделений

На рис. 2, *a–e* показаны измеренные значения температуры морской воды T , концентрации растворенного в морской воде кислорода O_2 , солёности морской воды S и модуля скорости течения V непосредственно над действующим сипом в 2019, 2020 и 2021 гг. Суточные колебания O_2 с отчетливо выраженными дневными максимумами и ночными минимумами наблюдались для всех исследованных периодов (рис. 2, *a, в, д*). Амплитуда этих колебаний достигала 2.2 мг/л (рис. 2, *д*). Следует отметить, что изменение концентрации растворенного кислорода на суточном масштабе времени соответствовало температурному ходу, в котором отмечался закономерный дневной прогрев воды и ночное выхолаживание. Коэффициент корреляции кислород/температура в 2016 г. составил 0.66, в 2018 г. — 0.99, в 2020 г. — 0.91, в 2021 г. — 0.93, в 2023 г. — 0.99. В 2019 г. коэффициент корреляции составил 0.32 при общем сохранении тренда как содержания кислорода, так и температуры (рис. 2, *a*).

Диапазон значений температуры морской воды в 2019 г. составлял 22.4–24.3°C, в 2020 г. 23.2–25.3°C, в 2021 г. 24.1–25.6°C. Резкие изменения температуры вечером в 2019 г. и рано утром (рис. 2, *a, б*) могли быть вызваны подтоком более холодной воды со дна бухты вследствие ветрового воздействия.

Анализ данных высокочастотных измерений растворенного кислорода позволил установить широкий спектр изменчивости его концентраций на масштабах от нескольких минут до нескольких часов. В 2019, 2020 и 2021 гг. за время измерений наблюдались эпизоды резкого снижения содержания O_2 (рис. 2, *a–e*). Такие изменения с максимальной амплитудой 0.8 мг/л происходили в течение 10–15 мин и не были связаны с изменением температуры воды. Корреляционный анализ также не выявил какой-либо связи с изменением гидрофизических параметров воды (скоростью течения и мутностью и др.). На полученных нами временных спектрах концентраций O_2 не было выделено устойчивой периодичности колебаний значений, которые могли бы соответствовать высокочастотному влиянию волн прибоя или более низкочастотным сейшевым колебаниям всего Черного моря [25]. Так, например, в работе [26] был проведен анализ рядов данных значений O_2 для того, чтобы оценить колебательные

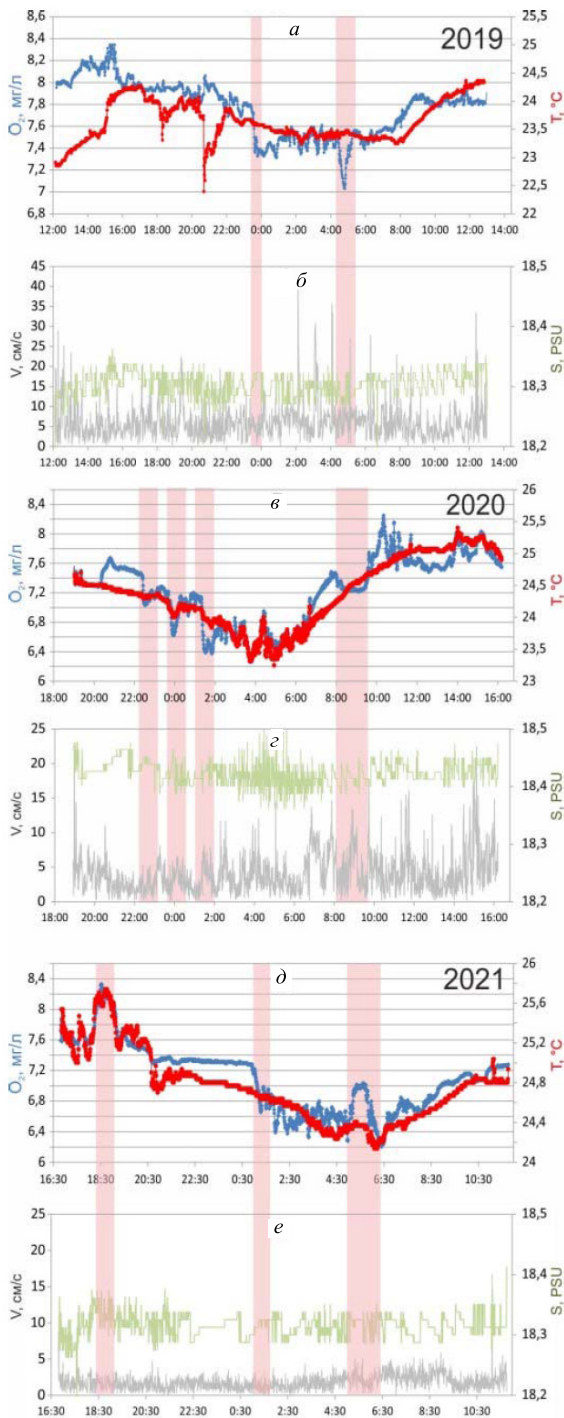


Рис. 2. Изменение температуры T , концентрации растворенного кислорода O_2 , солёности S и скорости течения V над метановым сипом в бухте Ласпи в разные годы: *a, б* — 2019 г., *в, г* — 2020 г., *д, e* — 2021 г. На графиках выделены области резкого изменения содержания O_2

В феврале 2023 г. за время записи также отмечена кластерная разгрузка пузырькового га-

Таблица 1. Значения концентрации растворенного кислорода, степень насыщения кислородом, скорость течения и температура в воде над площадкой газовыделений в бухте Ласпи

Дата измерений	O ₂ , мг/л	Средняя степень насыщения морской воды кислородом, %	Скорость течения, см/с	T, °C	S, PSU
18.08.2016 (14:15–16:00)	7.3–8.0* 7.5	99.3	0.3–21.4 6.9	26.3–26.9 26.5	18.0**
19.08.2016 (08:11–19:02)	6.8–7.9 7.4	97.0	0.3–31.1 6.6	25.3–26.4 26.0	18.0
24.07.2018 (12:35–18:42)	7.5–8.1 7.8	98.0	0.0–15.5 3.7	23.4–23.9 23.6	18.2
25–26.07.2018 (19:47–8:02)	7.0–7.5 7.2	92.7	0.3–17.3 3.8	24.9–25.2 25.0	18.2
26.07.2019 (14:15–18:10)	7.6–8.1 7.9	100.0	0.3–38.1 8.8	23.7–24.1 23.9	18.3
27–28.07.2019 (12:13–13:01)	7.0–8.3 7.8	98.2	0.3–39.3 5.9	22.4–24.9 23.6	18.3
16–17.08.2020 (18:42–19:08)	6.3–8.3 7.2	92.0	0.3–26.1 4.1	23.2–25.4 24.4	18.4
27–28.07.2021 (16:53–11:55)	6.2–8.3 7.1	91.1	0.3–6.6 1.8	24.1–25.7 24.7	18.3
04.02.2023 (12:13–14:02)	9.5–9.7 9.6	91.1	0.3–9.9 3.3	9.4–9.8 9.6	18.6
04.02.2023 (12:55–14:25) Фоновая площадка	10.1–10.8 10.5	100.4	-	9.7–9.9 9.8	18.9

* — в числителе указан диапазон значений, в знаменателе — среднее значение

** — для солёности указаны только средние значения

явления стохастической природы с периодом более коротким, чем суточная периодичность. Результат анализа предполагает существование динамики O₂ на временном масштабе 6–8 ч [26]. В нашем случае подобная динамика не наблюдалась.

По данным измерений была рассчитана степень насыщения кислородом морской воды [24]. Диапазон значений, средние величины и степень насыщения кислородом за все время наблюдений представлены в таблице. Следует отметить, что на площадке газовыделений для всех исследованных периодов, как правило, наблюдалось недонасыщение вод кислородом. При этом на фоновой площадке в феврале 2023 г. наблюдалось повышенное содержание кислорода по сравнению с площадкой над сипом. В то же время концентрации O₂ за весь период наблюдений в бухте Ласпи ни разу не достигали значений гипоксии, которой соответствуют концентрации O₂ ниже 2 мг/л [27].

Кислородный режим водной экосистемы определяется балансом между первичной продуктивностью и скоростью потребления кислорода, так называемым экосистемным дыханием [27]. В районах метановых газовыделений баланс сдвинут в сторону потребления кислорода из-за совокупности процессов, которые сопутствуют газовой разгрузке. К таким процессам можно отнести аэробное окисление

метана микробным сообществом, расход на окисление восстановленных серосодержащих газов, выделяющихся как в составе пузырькового газа, так и в результате флюидной эмиссии из газонасыщенных донных отложений, а также взаимобмена компонентов пузырькового газа с растворенными газами в толще воды и выноса кислорода в составе пузырьков в атмосферу. Интенсивность потребления кислорода на границе вода–донные осадки в мелководных акваториях до сих пор является важным открытым вопросом. Экспериментальные оценки вклада донных осадков в скорость окисления кислорода изменяются в достаточно широком диапазоне от 0.03 O₂ г/м²/ч [29] до 1.6 O₂ г/м²/ч в гиперэвтрофных водоемах [30].

Диапазон значений солёности над точкой газовыделений составил 17.9–18.0 PSU (2016 г.), 18.2–18.5 PSU (2018–2021 гг.), 18.7–18.8 PSU (в феврале 2023 г.). Как известно, в мелководной зоне высачивания пузырькового газа из дна могут сопровождать субмаринную пресноводную разгрузку [31]. Однако, судя по полученным данным, в бухте Ласпи высокодебитные подводные пресноводные источники отсутствуют.

Среднее значение мутности за все время наблюдений было близко к нулю, за исключением 2018 и 2023 гг., когда проведению измерений предше-

ствовали дожди, выносящие в бухту мутьевые потоки с береговых склонов. В 2018 г. среднее значение мутности за все время измерений составило 7 NTU, максимальное зарегистрированное значение 100 NTU. В 2023 г. среднее значение мутности за все время измерений составило 2 NTU, максимальное зарегистрированное значение 9 NTU.

Скорость течения, которая может характеризовать перемешивание воды в бухте, за все время наблюдений не превысила 40 см/с и в основном колебалась в диапазоне 5–10 см/с, увеличиваясь с ростом волнения. Направление скорости течения было переменчивым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что газовыделения в бухте Ласпи активны с момента обнаружения в 2004 г. по настоящее время, в том числе и в холодное время года.

2. Интенсивность и периодичность испускания пузырькового газа отдельными точечными источниками может варьировать в течение суток и от

сезона к сезону.

3. На площадке преобладает пузырьковая разгрузка в виде пакетов пузырьков (кластеров), насчитывающих от нескольких штук до нескольких десятков пузырьков размером не более сантиметра, выходящих из приблизительно 20 точек, связанных с каменистым основанием. Газовый поток из одного источника за весь период наблюдений составил от 25 до 200 л/сут.

4. Показана суточная динамика растворенного O_2 с выраженными дневными максимумами и ночными минимумами, разница между которыми достигала 2.2 мг/л. Отмечены моменты резкого снижения содержания кислорода амплитудой до 0.8 мг/л, не сопровождающиеся изменением температуры и других гидрологических параметров. Также в целом показано более низкое содержание растворенного O_2 над площадкой газовыделений по сравнению с фоновым районом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-27-00379, <https://rscf.ru/project/23-27-00379/>)

- [1] Егоров В.Н., Артемов Ю. Г., Гулин С.Б. Метановые источники в Чёрном море; средообразующая и экологическая роль. / Под ред. Г.Г. Поликарпова. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011.
- [2] Леин А.Ю., Иванов М.В. Биохимический цикл метана в океане. М., 2009.
- [3] Малахова Т.В., Канапацкий Т.А., Егоров В.Н. и др. // *Микробиология*. **84**, № 6. 743. (2015). (Malakhova T.V., Egorov V.N., Malakhova L.V. et al. // *Microbiology*. **84**, N 6. 838. (2015).)
- [4] Малахова Т.В., Егоров В.Н., Малахова Л.В. и др. // *Морской биологический журнал*. **5**, № 4. 37. (2020).
- [5] Шик Н.В. // *Геология и полезные ископаемые мирового океана*. № 1. 135. (2006).
- [6] Лысенко В.И., Шик В.Н. // *Геология и полезные ископаемые мирового океана*. **2**, № 36. 105. (2014).
- [7] Малахова Т.В., Будников А.А., Иванова И.Н., Мурашова А.И. // *Процессы в геосредах*. № 3(25). 822. (2020). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44074613>
- [8] Артёмов Ю.Г., Евтушенко Д.Б., Мосейченко И.Н. // *Системы контроля окружающей среды*. Вып. 11(31). 69. (2018).
- [9] Тихонова Е.Н., Тарновецкий И.Ю., Малахова Т.В. и др. // *Микробиология*. **89**, № 6. 737. (2020). (Tikhonova E.N., Tarnovetskiy I.Y., Merkel A.Y. et al. // *Microbiology*. **89**, N 6. P.740–749. (2020).)
- [10] Малахова Т.В., Малахова Л.В., Мурашова А.И. и др. // *Океанология*. **63**, № 1. 1. (2023).
- [11] Малахова Т.В., Мурашова А.И., Иванова И.Н. и др. // *Геохимия*. **68**, № 3. 294. (2023).
- [12] Малахова Т.В., Будников А.А., Иванова И.Н. и др. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* № 6. 162. (2020). (Malakhova T.V., Budnikov A.A., Ivanova I.N. et al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. **75**, N 6. 702. (2020).)
- [13] Будников А.А., Малахова Т.В., Иванова И.Н., Лученко Е.В. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* № 6. 106. (2019). (Budnikov A.A., Malakhova T.V., Ivanova I.N., Linchenko E.V. // *Moscow University Physics Bulletin*. **74**, N 6. 690. (2019).)
- [14] Wiggins S.M., Leifer I., Linke P., Hildebrand J.A. // *Marine and Petroleum Geology*. **68**. 776. (2015).
- [15] Dziak R.P., Matsumoto H., Embley R.W. et al. // *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. **150**. 210. (2018).
- [16] Roche B., White P.R., Bull J.M. et al. // *J. Acoust. Soc. Am.* **152**(2). (2022). 799.
- [17] Longo Manfredi, Lazzaro Gianluca, Caruso Cinzia Giuseppina et. al. // *Frontiers in Earth Science*. **9**. (2021).
- [18] Makarov M.M., Muyakshin S.I., Kucher K.M. et al. // *Journal of Great Lakes Research*. **46**(1). 95. (2020).
- [19] Minnaert M. // *Philos. Mag. Series 7*, N 16. 235. (1933).
- [20] Nelli F., Deane G., Ooi A., Manasseh R. // *JASA Express Letters*. **2**. 054002. (2022).
- [21] Greene Ch.A., Wilson P.S. // *The Journal of the Acoustical Society of America*. **131**. EL61. (2012).
- [22] Иванова И.Н., Будников А.А., Малахова Т.В. и др. // *Известия РАН. Сер. физ.* **86**, №2. 252. (2022). (Ivanova I.N., Budnikov A.A., Malakhova T.V. et al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. **86**, N 2. 190. (2022).)
- [23] Зори А.А., Корнев В.Д., Хламов М.Г. Методы, средства, системы измерения и контроля параметров водных сред. Донецк: РИА ДонГТУ, 2000.
- [24] Таблицы растворимости кислорода в морской воде / под ред. З.И. Мироненко. Л.: Гидрометеоздат, 1976.
- [25] Медведев И.П., Куликов Е.А. // *Океанология*. **56**, № 1. 10. (2016).
- [26] D’Autilia R., Falcucci M., Hull V., Parrella L. //

- [Ecological Modelling](#). **179**(3). 297. (2004).
 [27] *Caballero-Alfonso A.M., Carstensen J., Conley D.J.* // [Journal of Marine Systems](#). **141**. 190. (2015).
 [28] *Hoellein T., Bruesewitz D., Richardson D.* // [Limnol. Oceanogr.](#) **58**(6). 2089. (2013).
 [29] *Hu W.F., Lo W., Chua H. et al.* // [Environ. Geochem. Trop. Subtrop.](#) **26**. 369. (2001).
 [30] *Slama C.* // University of Windsor, Ontario, Canada. Electronic Theses and Dissertations. 2011. 300. <https://scholar.uwindsor.ca/etd/300>
 [31] *Whiticar M.J.* // [Mar. Geol.](#) **182**(1–2). 29. (2002).

Monitoring of methane bubble seepage and hydrological parameters in Laspi Bay (Crimea)

A.A. Budnikov^{1,a}, I.N. Ivanova¹, A.I. Khurchak², T.V. Malakhova²

¹*Department of physics of sea and inland waters, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

²*Federal Research Center «Institute of Biology of Southern Seas RAS, Sevastopol, 299011 Russia
 E-mail: ^aaa.budnikov@physics.msu.ru*

This work is devoted to studies of the shallow methane seepages temporal variability in the coastal area of Laspi Bay and high-frequency monitoring of the hydrological parameters daily dynamics in this area. The paper presents results obtained during the summer months of 2016, 2018-2021, and early February 2023. Using the passive acoustic method, it is shown that the intensity and periodicity of bubble gas emission by individual point sources can vary during the day and from season to season. It was obtained that a decreased content of dissolved oxygen and its saturation is observed above the active site of the seepages as compared to the distant (background) site. Moments of sharp decrease in oxygen content not accompanied by changes in temperature and other hydrological parameters were noted.

PACS: 92.05.Hj, 92.10.Lq, 92.60.Cc.

Keywords: methane seeps, Laspi Bay, passive acoustic method, hydrology, seasonal monitoring of bubble gas emissions.

Received 01 April 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 4. Pp. 571-577.

Сведения об авторах

- Будников Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: aa.budnikov@physics.msu.ru.
- Иванова Ирина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: ivair@yandex.ru.
- Хурчак Алена Игоревна — вед. инженер; . e-mail: alenamyra@mail.ru.
- Малахова Татьяна Владимировна — канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник; . e-mail: t.malakhova@imbr-ras.ru.