

ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНОГО АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ПУЗЫРЬКОВЫХ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ НА МЕЛКОВОДЬЕ

А.А. Будников¹, И.Н. Иванова¹, Т.В. Малахова², В.В. Прядун¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши, Москва, Россия.

²Институт морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН, 299011, Севастополь, пр-т Нахимова, 2

Аннотация. Представлены результаты работы по исследованию применимости пассивного акустического метода для детектирования пузырьковых газовыделений на мелководье и оценки их акустических характеристик. Проведены лабораторные и натурные эксперименты по регистрации аудиосигнала, производимого одиночными пузырьками газа. В экспериментальных условиях в частотном спектре наблюдался один максимум, приходящийся на частоты около 2 500 Гц для пузырей меньшего диаметра и 1570 Гц – для более крупных пузырей. Натурные эксперименты проводились в бухте Ласпи на Черном море. Показано, что в частотном спектре пузырей в естественных условиях наблюдается несколько частотных максимумов: 1550, 1100 и 600 Гц. Максимальная регистрируемая частота качественно совпадает с резонансной частотой пузырька диаметром около 4 мм, рассчитанной по формуле Минаерта.

Ключевые слова: *пузырьковые метановые газовыделения, акустическая оценка, пассивный акустический метод, резонансная частота пузырька, мелководные зоны, бухта Ласпи, Черное море.*

THE PASSIVE ACOUSTIC METHOD APPLICATION FOR DETECTING AND ANALYSIS OF BUBBLE GAS EMISSIONS CHARACTERISTICS ON SHALLOW WATER

A.A. Budnikov¹, I.N. Ivanova¹, T.V. Malakhova², V.V. Pryadun¹

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, 119991, Moscow, Leninskie gory, 1-2

²A.O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS, 299011, Sevastopol, Nakhimov ave., 2

Abstract. The applicability of a passive acoustic method for monitoring bubble gas emissions in shallow water is being investigated. Experiments on the audio signal registration produced by single gas bubbles were conducted in laboratory and natural conditions. Under experimental conditions, one maximum was observed in the frequency spectrum at frequencies of about 2500 Hz for bubbles of smaller diameter and 1570 Hz for larger bubbles. Natural experiments were carried out in Laspi Bay on the Black Sea at a depth of 2 m. It is shown that in the frequency spectrum of bubbles under natural conditions there are several frequency maxima: 1550, 1100 and 600 Hz. The maximum recorded frequency qualitatively coincides with the resonance frequency of the bubble with a diameter of about 4 mm calculated by the Minaert formula.

Keywords: *bubble methane gas emissions, acoustic estimation, passive acoustic method, resonance frequency of the bubble, shallow water zones, Laspi Bay, Black sea.*

Метановые пузырьковые газовыделения (сипы) обнаруживаются вдоль континентальных склонов по всему миру. Исследования, связанные с выходом природного газа из морского дна, имеют важное прикладное значение во многих сферах: оценка вклада в общее количество природных источников парниковых газов, возможность использования выделяющегося газа в качестве альтернативного источника топлива или в качестве маркера для подземных залежей природного газа, в случае прибрежных сипов – опасность катастрофических выбросов при землетрясениях.

В Черноморском регионе сипы были обнаружены вдоль побережья Крыма [1], Болгарии [2], Кавказа [3] и в Азовском море [4]. За последнее десятилетие в прибрежной акватории Крыма было обнаружено много новых площадок пузырьковых газовыделений [5, 6]. На сегодняшний день, для оценки объема газа, выделяющегося из подобных источников, используются различные методы [7], в том числе и пассивные акустические [8, 9]. Однако, универсальный метод, позволяющий с большой точностью проводить количественные измерения характеристик выделяющегося газа среди используемых методов отсутствует. Пассивные акустические методы являются наименее энергозатратными из существующих методов детектирования и мониторинга природных сипов, что дает возможность производить измерения локальных потоков в течение длительного интервала времени. Продолжительные измерения, в свою очередь, позволяют с большей точностью анализировать временную изменчивость объемов газовых выделений.

Небольшая глубина прибрежных сипов дает возможность прецизионного комплексного исследования, с одновременным использованием нескольких дублирующих методов. Однако, исследования на малых глубинах осложняются наличием большого количества разнородных шумов, отсутствующих на больших глубинах, на которых обычно выполняются подобные исследования [7–9].

Целью данной работы было изучение применимости пассивного акустического метода для анализа характеристик пузырьковых газовыделений, а также для продолжительного мониторинга газовых высачиваний в прибрежной мелководной зоне. Задачей работы на первом этапе являлось экспериментальное определение основной частоты звукового сигнала, производимого выделяющимися пузырьками газа и определение возможности выделения этой частоты на аудиограммах, полученных в реальных условиях.

В ходе исследования были проведены два эксперимента, первый в лабораторных условиях на кафедре физики моря и вод суши физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, второй – в реальных условиях в прибрежной мелководной зоне Черного моря (бухта Ласпи, глубина 2 метра) в непосредственной близости от действующего метанового сипа.

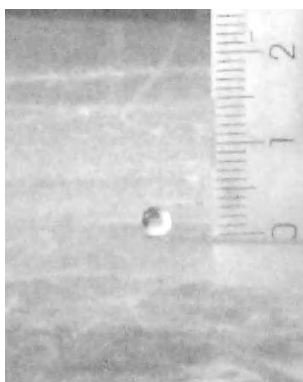


Рисунок 1. Фотография выхода пузырька из иглы, в лабораторном эксперименте.

В лабораторном эксперименте сип моделировался следующим образом: вблизи дна контейнера с соленой водой (18%) через иглу-насадку при помощи маломощного компрессора выдувались пузырьки (рис. 1) В эксперименте использовались иглы диаметром 0.6 и 0.8 мм. Скорость выхода пузырьков составляла для иглы диаметром 0.6 – 105 шт/мин., для иглы диаметром 0.8 60 шт/мин. Размер пузырьков оценивался

визуально при помощи градуировочной линейки, расположенной рядом с местом выхода пузырьков. Диаметр продуцируемых пузырьков составлял 3–4 мм, что соответствует диаметру пузырьков, наблюдавшихся в естественных условиях в бухте Ласпи. Глубина жидкости в контейнере составляла 0.5 м. Аудиосигнал, производимый пузырьками записывался при помощи погруженного в воду широкополосного микрофона. Полученные записи анализировались при помощи программы Audacity(2.3.0).

Для пузырьков, выходящих из иглы 0.6 мм, анализ аудиозаписи показал, что в частотном спектре при отрыве и подъеме пузырька наблюдается пик с максимумом на частоте 2500 Гц (рис. 2, а).

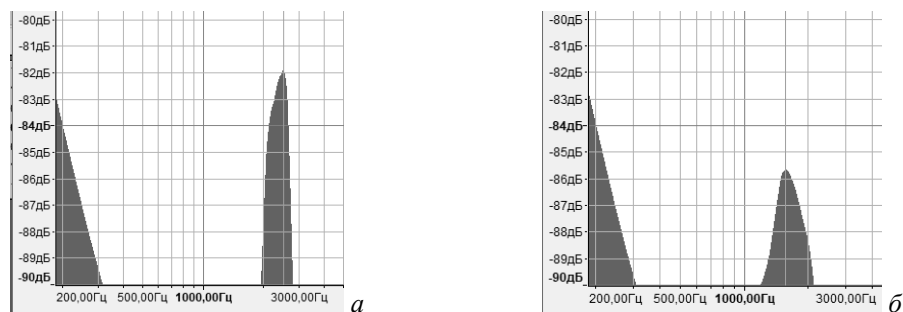


Рисунок 2. Спектральное распределение частоты аудиосигнала, производимого пузырьками диаметром 3–4 мм: а) диаметр иглы 0.6 мм. Скорость выхода пузырьков 105 шт./мин. б) диаметр иглы 0.8 мм (скорость выхода пузырьков 60 шт./мин).

В экспериментах с иглой диаметром 0.8 мм, проводимом при прочих равных условиях, в частотном спектре аудиозаписей сигналов наблюдался максимум, приходящийся на частоты около 1570 Гц (рис. 2, б).

В [7–9] для оценки размеров пузырьков метана, высачивающихся из действующего сипа, используется формула Минаерта, связывающая резонансную частоту пузырька газа с его радиусом: $f = (1/2\pi r_0) \sqrt{3\gamma p / \rho}$, где r_0 – радиус пузырька, $\gamma \sim 1.32$ – показатель адиабаты газа в пузырьке, p – давление с внешней стороны пузырька, ρ – плотность жидкости. При этом отмечается, что наблюдаемые резонансные частоты реальных пузырьков не совпадают с расчетной частотой, хотя и близки к ней по значению. Значение резонансной частоты пузырьков, рассчитанное по данной формуле для лабораторного эксперимента, составило приблизительно 2 200 и 1 700 Гц для пузырьков диаметром 3 и 4 мм, соответственно, что качественно совпадает со значениями, полученными при анализе аудиозаписей.

Моделью отрывающегося от иглы пузырька может служить колеблющийся пузырек, закрепленный на подложке в одной точке. Численное решение задачи о собственных колебаниях пузырька, закрепленного в одной точке, приведено в [10]. Отмечается, что к резонансной частоте объемных пульсаций колеблющегося свободного пузырька в идеальной жидкости (формула Минаерта) близка частота третьей моды колебаний, в то время, как могут существовать и другие моды с более низкими и более высокими частотами, определяемые конфигурацией колебаний поверхности. С увеличением размеров пузырька колебания на дополнительных частотах могут проявляться более интенсивно. Следуя данным, полученным из расчетов, за основные частоты, генерируемые пузырьками газа при отрыве и всплытии, были выбраны наблюдаемые в лабораторных экспериментах частоты 2 500 и 1 700 Гц.

На втором этапе работы был выполнен натурный эксперимент, целью которого

было в реальных условиях зарегистрировать аудиосигналы, производимые высачивающимися пузырьками метана. Эксперимент проводился в бухте Ласпи (Южный берег Крыма) на глубине 2 м в непосредственной близости от действующего метанового сипа. Ранее было показано, что пузырьковые газовыделения в этом районе происходят в течение всего года и имеют глубинный источник [6]. Таким образом, характер газовыделений представляет собой точечную разгрузку серии одноразмерных пузырей (рис. 3) и может быть смоделирован проведенным лабораторным экспериментом.

Запись аудиосигнала в б. Ласпи осуществлялась при помощи автономного гидрофона. Одновременно камерой GoPro4 проводилась подводная видеосъемка с дублирующей микрофонной записью. Параметры окружающей среды в непосредственной близости от сипа в течение эксперимента оставались неизменными. Измерение показателей среды проводилось мультипараметрическим зондом RCM 9 LW (Aanderaa) с датчиками давления, температуры, электропроводности, мутности и концентрации кислорода в непрерывном режиме [11] (рис.3). Во время проведения эксперимента эти параметры были равны: $T_v = 23.7^\circ\text{C}$, $S_k = 28.67$ мСм/см, $T_u = 0.45$ NTU, $O_2 = 7.95$ г/л.

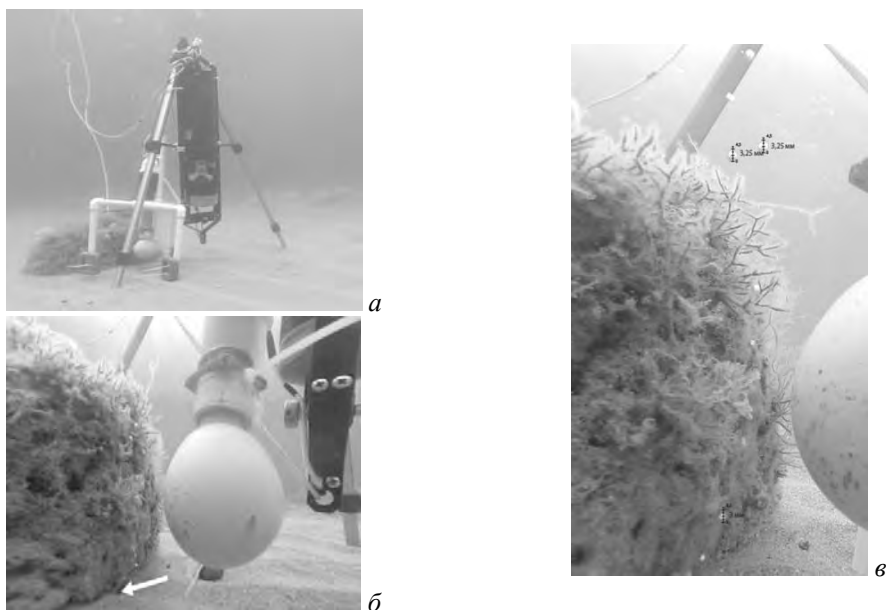


Рисунок 3. Подводная фотография эксперимента, проводимого в точке газовыделений в б. Ласпи: а) общий вид измерительного комплекса, б) место выхода пузырькового газа (отмечено белой стрелкой), в) всплывающие пузырьки газа (в графическом редакторе нанесена измерительная шкала).

Размер пузырьков в месте выхода в б. Ласпи был определен при помощи видеозаписи и составил приблизительно 3–4 мм. Пузырьки метана выделялись группами по 10–15 пузырьков примерно одинакового диаметра. Появлению группы пузырьков в кадре предшествовал характерный звук отрыва пузырьков от выпускающего канала.

Анализ аудиозаписей (основной и дублирующей) показал наличие в спектре сигнала частот 1 550, 1 100 и 600 Гц. При этом максимальная регистрируемая частота в аудиосигнале, сопровождающем выход пузырьков, качественно совпадает с резонансной частотой пузырька диаметром около 4 мм, рассчитанной по формуле Минаерта (рис. 4).

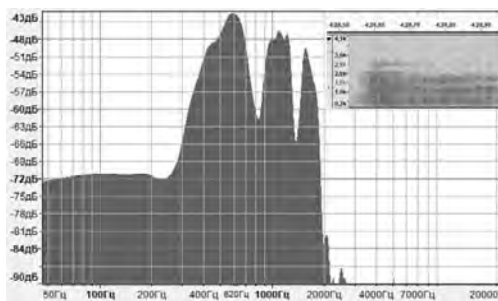


Рисунок 4. Спектральное распределение частоты аудиосигнала, полученное в непосредственной близости от действующего сипа (бухта Ласпи, Черное море, глубина 2 м). В правом верхнем углу развертка спектра сигнала, издаваемого группой пузырьков при выходе во времени (горизонтальная шкала).

В [12] приводится запись акустических шумов пузырькового выхода газа, расположенного на глубине 40 м в дельте р. Селенга, впадающей в Байкал. Основной аудиосигнал от пузырьков, полученный при помощи пассивного акустического метода, находился в диапазоне частот от 500 до 4 500 Гц. Размеры наблюдаемых пузырьков сильно варьировались, но в основном составили от 0.95 до 2.1 см. Отличие в резонансной частоте, полученной в нашей работе для пузырьков в сипе Ласпи, можно объяснить меньшей по сравнению с [12] глубиной и значительным разбросом в диаметрах наблюдаемых пузырьков.

Измерения, проведенные в [9] на глубине 1 228 м, показывают более точное совпадение наблюдаемых размеров пузырьков с рассчитанными по формуле Минаерта, однако авторы отмечают сложность визуализации пузырьков миллиметровых размеров. В [9] отмечено, что звук пузырьковых потоков является серией широкополосных коротких импульсов, объединенных в кластеры около 10 шт., что совпадает с полученными в нашей работе записями натурального эксперимента.

Заключение

В работе показана принципиальная возможность детектирования высачивающихся пузырьков газа на мелководье пассивным акустическим методом, с учетом данных об атмосферном давлении над местом проведения измерений, а также о плотности морской воды.

Для оценки размеров выделяющихся пузырьков газа в естественных условиях возможно использование формулы Минаерта.

Методика, отлаженная в наиболее зашумленной мелководной зоне, может быть распространена в дальнейшем на более глубоководные районы.

В работе использованы данные, полученные в ходе проведения летней студенческой практики кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ и по теме государственного задания ФГБУН ИМБИ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (номер гос. регистрации АААА-А18-118020890090-2).

Литература / References:

1. Егоров В.Н., Артемов Ю.Г., Гулин С.Б. Метановые сипы в Черном море средообразующая и экологическая роль. Севастополь: «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011.
2. Dimitrov L. Contribution to atmospheric methane by natural gas seepages on the Bulgarian continental shelf // Cont. Shelf Res. 2002. V. 22. pp. 2429–2442.
3. Ткешелашвили Г.И., Егоров В.Н., Мествиришвили Ш.А., Пархаладзе Г.Ш., Гулин М.Б., Гулин С.Б., Артемов Ю.Г. Метановые газовыделения со дна Черного моря в приустьевой зоне реки Супса у побережья Грузии // Геохимия. 1997. № 3. С. 331–335.

4. Пасынков А.А., Тихоненков Э.П., Смагин Ю.В. Газовые факелы на дне Азовского моря // ГПИМО. 2009. № 1. С. 77–79.
5. Егоров В.Н., Пименов Н.В., Малахова Т.В., Канапацкий Т.А., Артемов Ю.Г., Малахова Л.В. Биогеохимические характеристики распределения метана в воде и донных осадках в местах струйных газовыделений в акватории Севастопольских бухт // Морск. экол. журнал. 2012. Т. XI. № 3. С. 41–52.
6. Малахова Т.В., Канапацкий Т.А., Егоров В.Н., Малахова Л.В., Артёмов Ю.Г., Евтушенко Д.Б., Гулин С.Б., Пименов Н.В. Микробные процессы и генезис струйных метановых газовыделений прибрежных районов Крымского полуострова // Микробиол. 2015. Т. 84. № 6. С. 743–752.
7. Johnson, H.P., Miller, U.K., Salmi, M.S., Solomon, E.A. Analysis of bubble plume distributions to evaluate methane hydrate decomposition on the continental slope. // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 16. 2015. pp. 3825–3839. <http://dx.doi.org/10.1002/>
8. von Demling S. et al. Acoustic imaging of natural gas seepage in the North Sea: sensing bubbles controlled by variable currents. // *Limnol. Oceanogr. Methods.* 8. 2010. pp. 155–171. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.02.011>
9. Dziak R.P., Matsumoto H., Embley R.W., Merle S.G., Lau T.-K., Baumberger T., Hammond S.R., Raineault N. Passive acoustic records of seafloor methane bubble streams on the Oregon continental margin. // *Deep-Sea Res. P. II.* 150 2018. pp. 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.04.001>
10. Горский С.М., Зиновьев А.Ю., Чичагов П.К. Собственные колебания «закрепленного» газового пузырька в жидкости // *Акуст. журнал.* 1988. Т. XXXIV. № 6. С. 1024–1027.
11. Иванова И.Н., Будников А.А. Особенности температурной стратификации в прибрежной зоне Черного моря // *Проц. в геосредах.* 2018. № 14. С. 741–745.
12. Макаров М.М. Пузырьковые выходы метана из донных отложений метана. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. Иркутск. ФГБУН ЛИН СО РАН. 2016 г.