

УДК 534-143:534.631

## МОНИТОРИНГ ПУЗЫРЬКОВОГО ПОТОКА МЕЛКОВОДНОГО СИПА ПРИ ПОМОЩИ ПАССИВНОГО АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВИДА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 2022 г. И. Н. Иванова<sup>1, \*</sup>, А. А. Будников<sup>1</sup>, Т. В. Малахова<sup>2</sup>, Н. А. Гришанина<sup>1</sup>, И. Д. Демин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки федеральный исследовательский центр “Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского Российской академии наук”, Севастополь, Россия

\*E-mail: ivair@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.10.2021 г.

После доработки 11.10.2021 г.

Принята к публикации 22.10.2021 г.

Рассмотрено влияние различных типов донного грунта на акустический сигнал, производимый пузырьками воздуха, проходящими через грунт в воду. С учетом погрешности, вносимой грунтом, выполнен расчет газового потока по данным акустической записи сигнала, производимого действующими пузырьковыми выделениями метана в бухте Ласпи. Показано непостоянство интенсивности потоков метана.

DOI: 10.31857/S0367676522020119

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования подводных газовыделений (сипов) имеют большое значение с точки зрения оценки объемов поступления углеродосодержащих газов, в частности метана, в водную среду и атмосферу [1–3]. Для оценки газовых потоков используются различные дополняющие друг друга методы: визуальное наблюдение и видеосъемка [2], сбор пузырькового газа и флюидных потоков при помощи ловушек [4, 5], активная и пассивная акустика [6–9]. Поскольку интенсивность природных газовых потоков может изменяться во времени достаточно существенно, необходимы методы, которые способны обеспечивать длительное наблюдение за источником. Для продолжительного мониторинга пузырьковых газовыделений наиболее простым в реализации представляется пассивный акустический метод [6, 7]. Размещенное вблизи источника звукозаписывающее оборудование позволяет получить длительные аудиогаммы, на которых возможно различить аудиосигналы от отдельных пузырьков газа, отрывающихся от морского дна [7, 8, 10]. Как известно, частота акустического сигнала, производимого при отрыве пузырька, связана с объемом пузырька [7]. Однако на сегодняшний день остаются вопросы, касающиеся точности расчетов пузырькового газового потока с использованием данного метода, в частности влияния на генери-

руемый пузырьком аудиосигнал подстилающей поверхности в месте выхода метана.

Целью данной работы было экспериментальное определение влияния подстилающей поверхности на регистрируемый вблизи сипа акустический сигнал, сравнение расчетного и наблюдаемого размера пузырьков, а также оценка суточного объема газа, выделяющегося на площадке постоянно действующих пузырьковых газовыделений с помощью пассивного акустического метода.

### АППАРАТУРА И МЕТОДИКА СБОРА ДАННЫХ

Лабораторная установка представляла собой стеклянный бассейн с соленой водой (18‰), на дне которого размещался грунт различного вида. С помощью мембранного компрессора и воздухопровода с насадкой, помещенной в грунт на глубину 5 см, в бассейне моделировались пузырьковые выделения из донных подложек различного типа. Интенсивность выхода пузырьков могла изменяться при помощи регулятора скорости воздушного потока и устанавливалась таким образом, чтобы наблюдаемый поток соответствовал пузырьковому потоку, наблюдаемому в природных условиях в бухте Ласпи (от 10 до 240 пузырьков в минуту) [5]. В зоне выхода пузырьков была установлена измерительная линейка с ценой деления 1 мм, позволявшая визуально определять

размер пузырьков. Видеозапись процесса выхода пузырьков из грунта велась с помощью портативной камеры с разрешением 19 Мп со стандартной частотой кадров и возможностью кратковременной активации режима замедленной съемки с частотой кадров 960 FPS. Для записи акустических сигналов использовался широкополосный гидроизолированный микрофон с чувствительностью 60 мВ/Па, установленный в непосредственной близости от источника пузырьков.

На дне бассейна последовательно размещалось несколько типов грунта, моделирующих природную подстилающую поверхность: колотые кирпичи, искусственная гладкая галька с приблизительно одинаковым размером гранул (около 2 мм), природная галька с различающимся размером гранул (диапазон размеров от 0.5 до 3 мм), песок.

Для расчета размеров пузырьков газа с использованием частотных характеристик акустических сигналов, производимых пузырьками при выходе из грунта обычно используется формула Миннарта, связывающая собственную частоту колебаний пузырька с его радиусом [7]:

$$r = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{3\gamma p}{\rho}},$$

где  $r$  – радиус пузырька,  $f$  – частота акустического сигнала,  $\gamma$  – показатель адиабаты газа, содержащегося в пузырьке,  $p$  – давление на пузырек со стороны жидкости,  $\rho$  – плотность жидкости.

Обработка акустических записей выполнялась в свободно распространяемом редакторе звуковых файлов Audacity. При помощи данного редактора анализировался частотный спектр аудиозаписи, на котором определялась основная частота сигнала, генерируемого пузырьками. На рис. 1 представлен пример частотного спектра акустического сигнала, возникающего при выходе пузырька из искусственной гальки. Наибольшая интенсивность сигнала приходится на частоту 830 Гц, что соответствует расчетному диаметру пузырька около 8 мм и совпадает с наблюдаемым размером.

Эксперимент показал, что различные виды грунта оказывают влияние на характер газовой выделений, в том числе на форму и размер образующихся пузырьков при одинаковом потоке воздуха из компрессора в толщу грунта. Замедленная съемка момента выхода пузырьков из донной подложки демонстрирует, что наиболее сильно форма образующегося пузырька отличается от сферической при выходе из искусственной и природной гальки. Обычно, при формировании пузырька из газового канала с твердыми стенками, растущий пузырек имеет форму перевернутой капли. По мере роста пузырька “ножка”, связывающая пузырек с каналом, утончается и разрывается, сообщая колебательный импульс поверхности пузырька. В

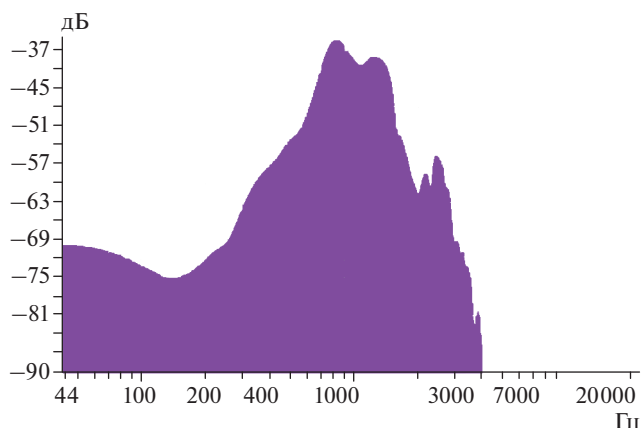


Рис. 1. Пример частотного спектра акустического сигнала, создаваемого при выходе пузырька из искусственной гальки.

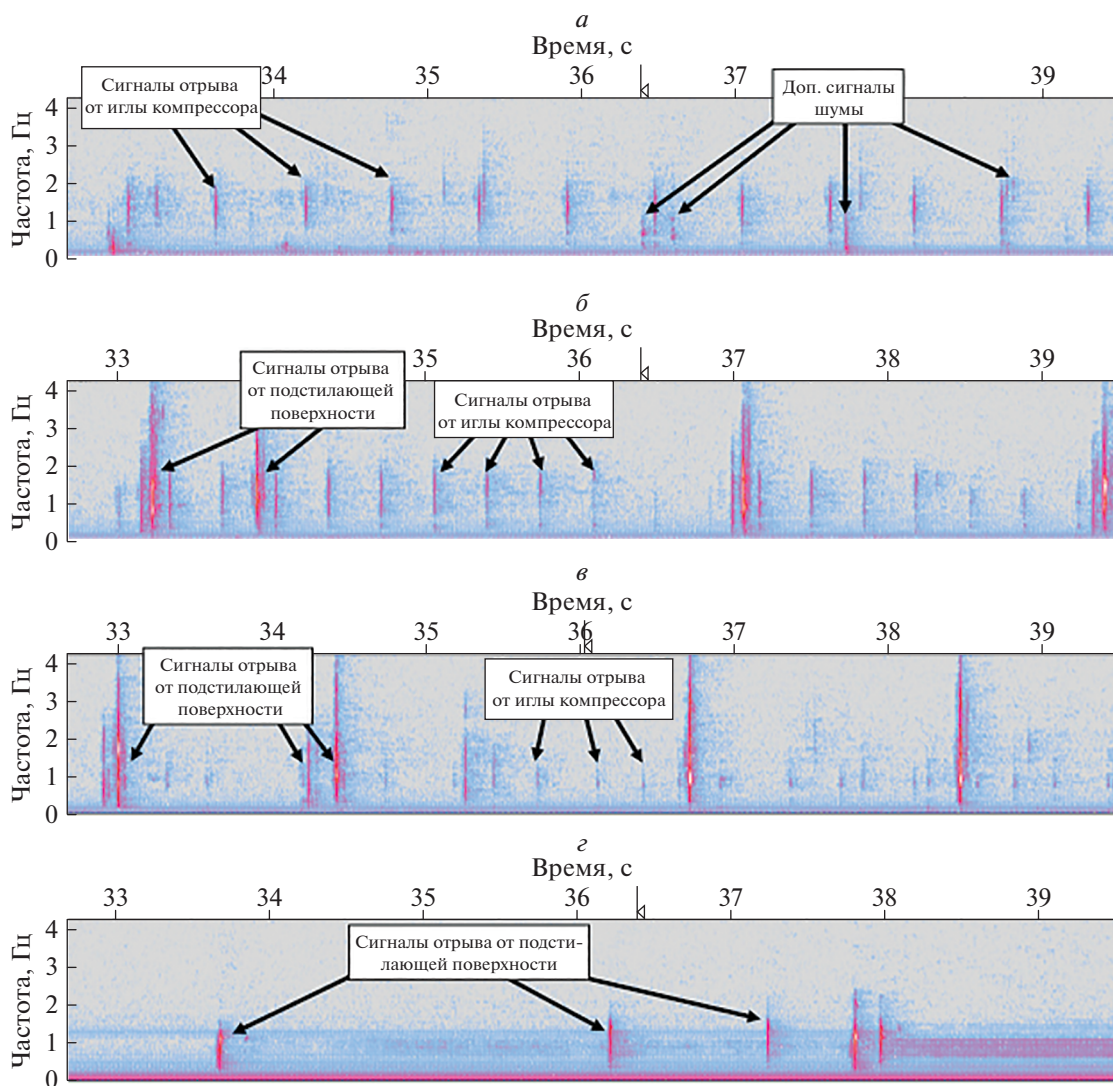
случае, когда размеры гранул грунта сопоставимы с размерами пузырька, форма пузырька может принимать более сложную форму, а количество “ножек” увеличиваться.

Спектрограммы акустических записей для различных видов подстилающей поверхности представлены на рис. 2. В эксперименте с колотыми кирпичами было обнаружено, что на записи не различается акустический сигнал в момент выхода пузырька в водную толщу, но при этом отчетливо различим периодический сигнал, возникающий при выходе пузырьков в толщу грунта из воздуховода компрессора. Это, вероятно, связано с тем, что пузырьки относительно свободно проходят через полости между отдельными осколками кирпичей и значительной деформации их поверхности не происходит.

В случае искусственной гальки, природной гальки и песка, выход пузырьков в водную толщу утрачивает свою периодичность, выделяющиеся пузырьки начинают отличаться по своим размерам. Одновременно с этим, по мере уменьшения размеров гранул подложки, интенсивность периодического сигнала, возникающего при выходе пузырьков из воздуховода, уменьшается и становится вовсе неразличима в случае песка.

Для всех экспериментов была оценена погрешность путем сравнения наблюдаемых размеров пузырьков и их расчетных размеров с использованием формулы Миннарта. Наибольшая погрешность наблюдалась в случае песка. В 90% случаев погрешность находилась в пределах 6%, в то время как для гальки как природной, так и искусственной, в пределах 4.5%.

В дальнейшем оценки погрешности были использованы при расчетах потока метана по данным натурных измерений на мелководной площадке постоянно действующих сипов в Бухте



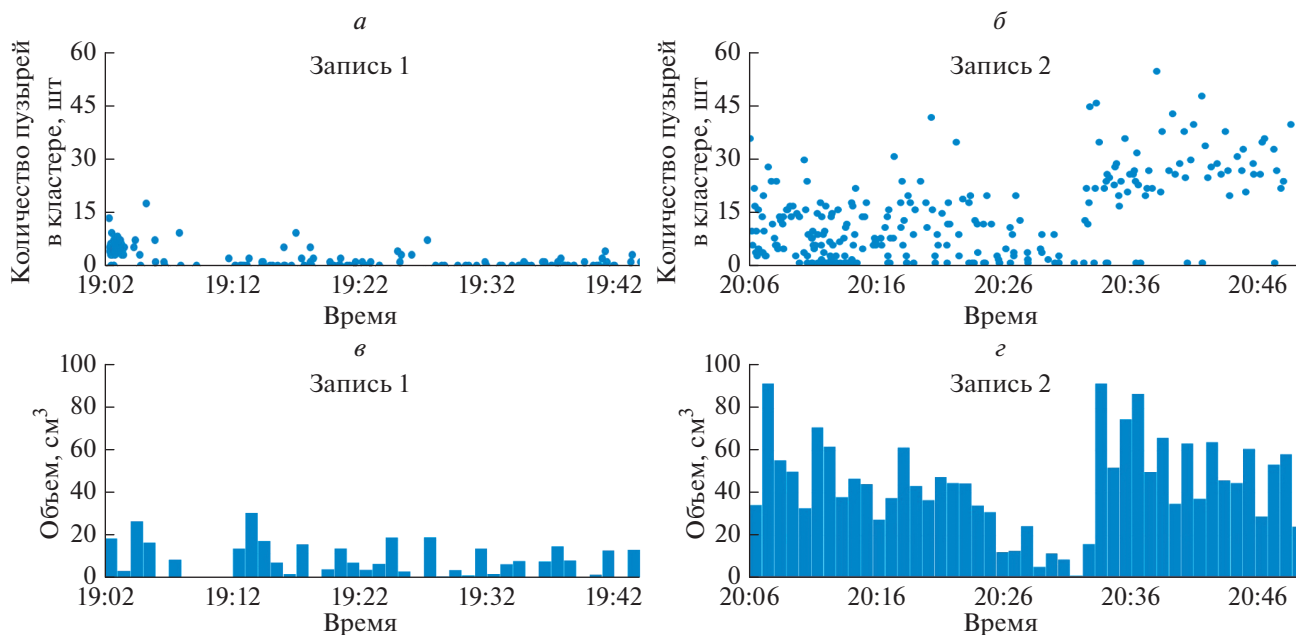
**Рис. 2.** Спектрограммы акустических сигналов, полученные в экспериментах с различными видами подстилающих поверхностей: колотые кирпичи (а); искусственная одноразмерная галька (2 мм) (б); природная галька с размером фракций от 0.5 до 3 мм (в); песок (г).



**Рис. 3.** Подводная фотография гидрофона, установленного рядом с точкой пузырьковых газовыделений в бухте Ласпи.

Ласпи ( $44.42099^\circ$  с.ш.,  $33.70766^\circ$  в.д.), полученных в августе 2020 г. Выход метана в точке, расположенной на глубине около 2.5 м происходил из песчаного дна как периодическими пузырьковыми кластерами, так и отдельными пузырями, при этом визуально наблюдаемый размер пузырьков составлял от 2 до 20 см (рис. 3). На рис. 4 представлены количественные показатели, связанные с временной изменчивостью интенсивности потока пузырьковых газовыделений для двух записей по 45 мин, выполненных с интервалом около 20 мин. По горизонтальной оси отложено местное время.

На рис. 4а и 4в в соответствии с временной шкалой точками отмечены моменты выхода кластеров либо одиночных метановых пузырьков,



**Рис. 4.** Диаграммы, иллюстрирующие временное распределение количества пузырьков в кластерах (а, в) и объема пузырькового газа, выделяющегося за одну минуту из сипа (б, г).

при этом по вертикальной оси отложено количество пузырьков в выделившемся кластере. На рис. 4б и 4г представлены гистограммы временного распределения суммарного объема пузырькового газа с шагом по горизонтальной оси в одну минуту. Следует отметить неравномерность метановых высачиваний, а также изменчивость самого характера газовыделений при схожих внешних условиях. Так во время записи 1 преобладали одиночные пузырьки, а во время записи 2 более мелкие пузырьки, выделяющиеся кластерами. Суммарный объем газа, выделившегося за время первой записи, составил  $0.29 \pm 0.02$  л, а за время второй –  $1.97 \pm 0.12$  л. Такую изменчивость интенсивности потока газовыделений необходимо учитывать при оценке объемов газа, проводимых на основе краткосрочных измерений.

Площадка метановых сипов в бухте Ласпи насчитывает около 20 схожих по характеру газовыделений точек пузырьковых высачиваний. С использованием среднего значения объема выделившегося газа за время двух записей, можно оценить средний поток со всей площадки как  $720 \pm 90$  л/сут. Если же рассматривать значения только первой или только второй записи, то такая оценка может изменяться от  $186 \pm 13$  до  $1260 \pm 80$  л/сут, т.е. почти в 7 раз.

Полученный в работе средний объем суточных газовыделений совпал по порядку величины с величиной газового потока, наблюдаемого в бухте Ласпи в предыдущие годы [11].

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Были проведены лабораторные эксперименты для оценки влияния различных типов грунта на акустический сигнал, производимый проходящими через грунт пузырьками газа, а также выполнен расчет газового потока по данным акустической записи сигнала, производимого действующим сипом, полученной в августе 2020 г. в бухте Ласпи (Черное море).

Эксперименты показали различия в погрешности при определении размеров пузырьков, выделяющихся из различных подложек, с использованием формулы Миннарта. Природа погрешности, возникающей при расчете радиуса пузырька, при различных типах подстилающих поверхностей различна.

В зависимости от состава подстилающей поверхности впервые определены погрешности расчета природных потоков метана из действующих мелководных сипов с использованием пассивного акустического метода.

Показаны существенные вариации пузырькового потока на масштабе времени, не превышающем несколько часов. Изменяются как размеры выделяющихся пузырей, так и их количество. Рассчитанный средний поток метана по данным двух 45-минутных записей акустических сигналов, полученных в непосредственной близости от постоянно действующего метанового сипа в бухте Ласпи, по порядку совпадает с потоком, измеренным на той же площадке в предыдущие годы, но при

этом может значительно варьироваться от  $186 \pm 13$  до  $1260 \pm 80$  л/сут.

Вариации интенсивности метанового потока требуют дальнейшего изучения с целью выявления причин, влияющих на процесс газовой выделенности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемов Ю.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б. // Океанология. 2019. Т. 59. № 6. С. 952.
2. Малахова Т.В., Егоров В.Н., Малахова Л.В. и др. // Морск. биол. журн. 2020. Т. 5. № 4. С. 37.
3. Malakhova T.V., Egorov V.N., Malakhova L.V. et al. // Microbiology (Mikrobiologiya). 2015. V. 84. No. 6. P. 838.
4. Römer M., Sahling H., Pape T. et al. // Marine Geology. 2012. V. 319. P. 57.
5. Малахова Т.В., Будников А.А., Иванова И.Н., Мурашова А.И. // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физ. и астрон. 2020. № 6. С. 162; Malakhova T.V., Budnikov A.A., Ivanova I.N., Murashova A.I. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2020. V. 75. No. 6. P. 705.
6. Li J., Roche B., Bull J.M. et al. // Int. J. Greenhouse Gas Control. 2020. V. 93. Art. No. 102899.
7. Vazquez A., Manasseh R., Chicharro R. // Chem. Eng. Sci. 2015. V. 131. P. 187.
8. Dziak R.P., Matsumoto H., Embley R.W. et al. // Deep-Sea Res. Part II. 2018. V. 150. P. 210.
9. Makarov M.M., Muzyakshin S.I., Kucher K.M. et al. // J. Great Lakes Res. 2020. V. 46(1). P. 95.
10. Будников А.А., Малахова Т.В., Иванова И.Н., Линченко Е.В. // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физ. и астрон. 2019. № 6. С. 106; Budnikov A.A., Malakhova T.V., Ivanova I.N., Linchenko E.V. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2019. V. 74. P. 690.
11. Иванова И.Н., Будников А.А., Малахова Т.В., Якимцев Ю.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 2. С. 289; Ivanova I.N., Budnikov A.A., Malakhova T.V., Yakimchev Yu. A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 2. P. 206.

### Monitoring of the bubble flux of shallow-water seep using a passive acoustic method, considering the effect of the type of underlying surface

I. N. Ivanova<sup>a,\*</sup>, A. A. Budnikov<sup>a</sup>, T. V. Malakhova<sup>b</sup>, N. A. Grishanina<sup>a</sup>, I. D. Dyemin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

<sup>b</sup> Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of the Russian Academy of Sciences, Sevastopol, 299011 Russia

\*e-mail: ivair@yandex.ru

We consider the effect of different soil types on the acoustic signal produced by air bubbles passing through the soil. Taking into account the error introduced by the soil, the gas flux was calculated based on the acoustic recording of the signal produced by the active methane bubbles seepages in Laspi Bay. The inconstancy of the methane fluxes intensity in the bay is shown.