ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 2, с. 289–293

УДК 534-143:534.631

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ОБЪЕМОВ ГАЗОВОЙ РАЗГРУЗКИ МЕЛКОВОДНЫХ МЕТАНОВЫХ СИПОВ ПО ДАННЫМ ПАССИВНОЙ АКУСТИКИ

© 2021 г. И. Н. Иванова[1, *], А. А. Будников[1], Т. В. Малахова[2], Ю. А. Якимычев[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", Физический факультет, Москва, Россия*

[2]*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 20.07.2020 г.
После доработки 28.08.2020 г.
Принята к публикации 28.09.2020 г.

Разработан алгоритм, позволяющий в автоматическом режиме рассчитывать количество пузырьков газа, выделяющихся из точечного источника, на основе анализа записей акустических сигналов, генерируемых пузырьками. Данный алгоритм успешно апробирован в натурных и лабораторных условиях, и может быть использован для расчета газовых потоков при продолжительном мониторинге природных метановых сипов.

DOI: 10.31857/S0367676521010130

ВВЕДЕНИЕ

Исследования выхода природного газа (холодных сипов, от англ. seep – просачиваться) из морского дна имеют важное прикладное значение во многих сферах: оценка вклада в пул парниковых газов, возможность использования подводных метановых высачиваний в качестве альтернативного источника топлива или в качестве маркера для подземных залежей углеводородов. Также изучение активности и объемов газоотдачи прибрежных сипов необходимо для оценки потенциальной опасности при катастрофических выбросах во время природных катаклизмов. На данный момент для исследования действующих газовыделений используются, зачастую совместно, методы, основанные на обработке видеозаписей, а также акустических данных [1, 2]. При этом, востребованы долгопериодные наблюдения, позволяющие отслеживать вариации газовых потоков. Такие наблюдения в настоящее время проводятся при помощи включающихся по таймеру гидроакустических подводных обсерваторий [3], либо с использованием пассивного акустического метода, использующего для анализа данные непрерывно записываемых собственных аудиосигналов подводных пузырьковых высачиваний [4]. Неоспоримым преимуществом пассивного метода является его низкая энергозатратность, позволяющая производить непрерывную запись в течение длительного времени и фиксировать даже короткопериодные вариации потоков, что, в свою очередь, дает возможность с большей точностью анализировать временную изменчивость объемов газовыделений, а также накапливать данные для выявления причин, влияющих на эту изменчивость.

В акватории Черного моря струйные газовыделения впервые были обнаружены в 1989 г. в сероводородной зоне на глубинах 200–250 м при помощи высокочастотного эхолота [5]. Это событие положило начало многочисленным исследованиям в Черноморском регионе, связанным с поиском новых областей метановых высачиваний. На сегодняшний день найдены и отмечены на картах тысячи подобных областей практически на всем диапазоне глубин от нескольких метров до километра и более.

Актуальной задачей в настоящее время остается расчет объема выделяющегося газа, осложняющийся как трудностью прямых подводных измерений пузырькового потока, так и значительной вариативностью частоты выхода пузырьков, вплоть до полного прекращения высачивания газа.

Целью данной работы была разработка автоматического алгоритма расчета потока пузырьковых газовыделений по записям аудиосигналов,

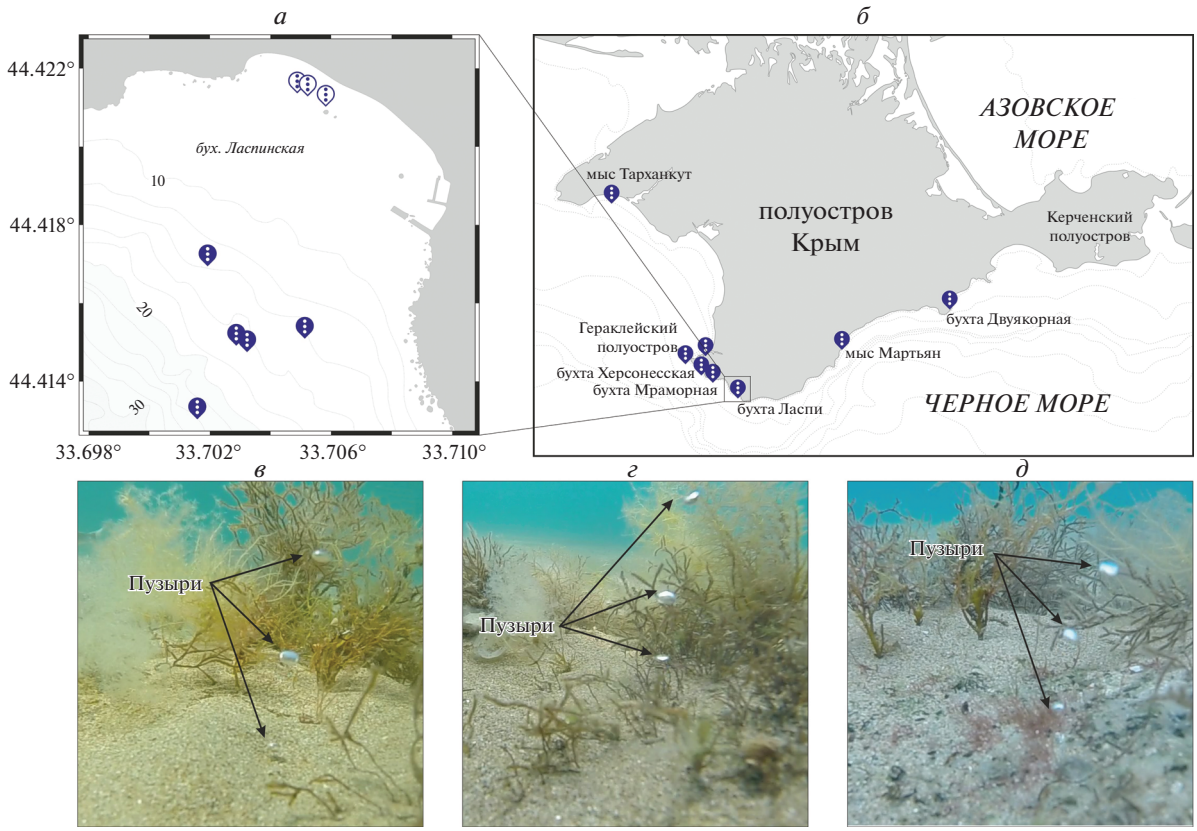

Рис. 1. Схема площадки пузырьковых газовыделений в бухте Ласпи (*а*) и (*б*) общая карта прибрежных сипов Крыма; (*в*, *г*, *д*) подводные фотографии точек газовыделений в бухте Ласпи GP1, GP2, GP3.

генерируемых пузырьковыми газовыделениями, и его проверка с помощью расчета суточных объемов газовыделений на площадке струйных выделений метана в бухте Ласпи.

ОБЪЕКТ, АППАРАТУРА И МЕТОДИКА СБОРА ДАННЫХ

Натурные данные, использованные для проверки алгоритма были получены 26–27 августа 2019 г. на площадке постоянно действующих пузырьковых газовыделений в бухте Ласпи (рис. 1*а*, 1*б*) (N 44.42099°, E 33.70766°) на глубине 2 м. Пузырьковые газовыделения на этой площадке происходят в течение всего года и имеют глубинный источник [6]. Характер газовыделений представлял собой точечную разгрузку непрерывно выделяющихся пузырей (рис. 1*в*–1*д*).

На дне в непосредственной близости от точки высачиваний, располагалась камера GoPro4 со встроенным микрофоном, на которую осуществлялась видеозапись процесса выхода пузырькового газа с одновременной записью аудиосигнала. В ходе проводимых работ были получены 3 видеозаписи различных сипов (далее GP1, GP2 и GP3), длительностью по 17 мин каждая. Местоположение выхода пузырьковых образований отличались: сип GP1 был расположен на песчаном дне, сип GP2 вблизи скалистого образования, сип GP3 на песчаном дне среди водорослей (макрофитов).

АЛГОРИТМ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА ПУЗЫРЬКОВЫХ ВЫДЕЛЕНИЙ

Из полученных видеофайлов были извлечены звуковые дорожки и сохранены в отдельные аудиофайлы в формате WAV. Далее, в интегрированной среде разработки для языка программирования Python (Pycharm), для каждого аудиофайла, с помощью метода scipy.io.wavfile были получены частотные массивы всех содержащихся в аудиофайле сигналов, а затем, с помощью библиотеки matplotlib, были построены спектрограммы каждой аудиозаписи. Пример такой спектрограммы приведен на рис. 2. На ней отчетливо видны сигналы, производимые пузырьками газа при выходе из газового канала в толщу жид-

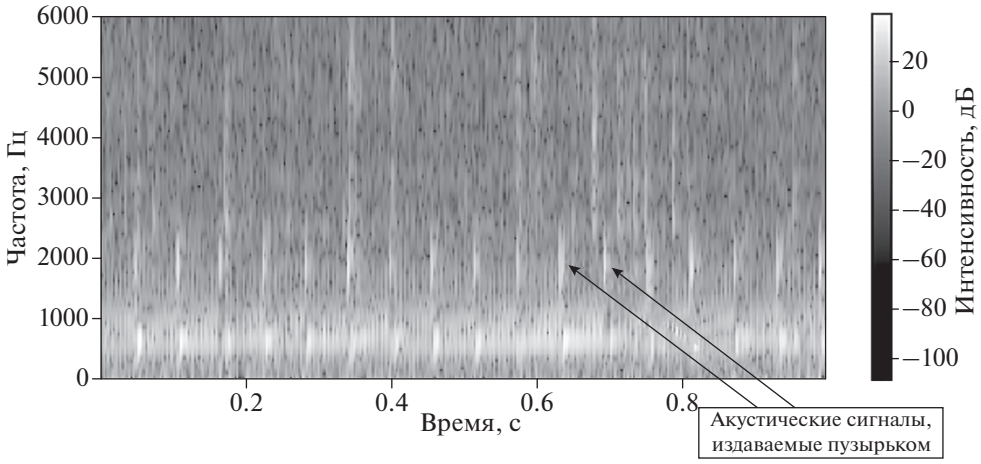

Рис. 2. Спектрограмма аудиозаписи сипа GP3.

кости. Каждый сигнал от одиночного пузырька состоит из двух идущих друг за другом сигналов, которые разделяют сотые доли секунды: первого сигнала с более высокой частотой (1500–2000 Гц) и следующего за ним сигнала более низкой частоты (500–700 Гц). Предположительно, эти сигналы соответствуют 2 фазам. Первый сигнал соответствует моменту отрыва пузырька от подводящего канала, когда пузырек имеет в начале форму капли, а затем деформируется, принимая шарообразную форму. Второй сигнал соответствует низкочастотным модам колебаний поверхности пузырька, сопровождающим основное колебание. Количество таких сигналов, производимых за время всей аудиозаписи, и, соответственно, количество выделяющихся пузырей можно рассчитать с помощью метода find_peaks (рис. 3). Использованный метод определяет и подсчитывает количество максимумов на заданном диапазоне частот, превышающих указанное пороговое значение интенсивности сигнала на определенном интервале времени. На рис. 3 приведен пример обработки фрагмента аудиозаписи GP3 методом find_peaks в диапазоне частот свыше 1800 Гц. При отладке метода была произведена выборочная проверка на произвольных непродолжительных фрагментах полученных аудиозаписей. Количество сигналов, рассчитанное автоматически, совпало с количеством сигналов, определенным вручную по спектрограмме и по видеозаписи, что подтвердило правильность работы программы. Также была проведена проверка программы на протяженной аудиозаписи, выполненной в лабораторном бассейне на физическом факультете МГУ. При помощи иглы-насадки, соединенной с компрессором, в бассейне создавался пузырьковый поток с известной частотой выхода пузырей. Автоматический расчет в пределах погрешности совпал с реальными данными.

По итогам обработки аудиозаписей количество сигналов, производимых пузырьками при выходе в водную толщу, для аудиозаписи GP1 составило 10609 шт., GP2 – 14285 шт., GP3 – 16346 шт., что соответствует интенсивности газовыделений 10, 14 и 16 пузырьков в секунду.

РАСЧЕТ ОБЪЕМОВ СУТОЧНЫХ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ

Для определения частоты, относящейся непосредственно к частоте звучания пузырьковых газовыделений, использовалось бесплатное, открытое кроссплатформенное программное обеспечение Audacity 2.3.1, позволяющее проводить

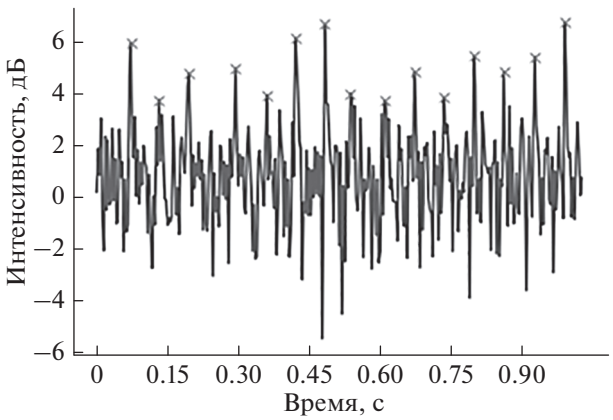

Рис. 3. Пример обработки фрагмента аудиозаписи GP3 методом find_peaks. Крестиками отмечены максимумы интенсивности звукового сигнала в диапазоне частот свыше 1800 Гц, соответствующие пузырькам газа.

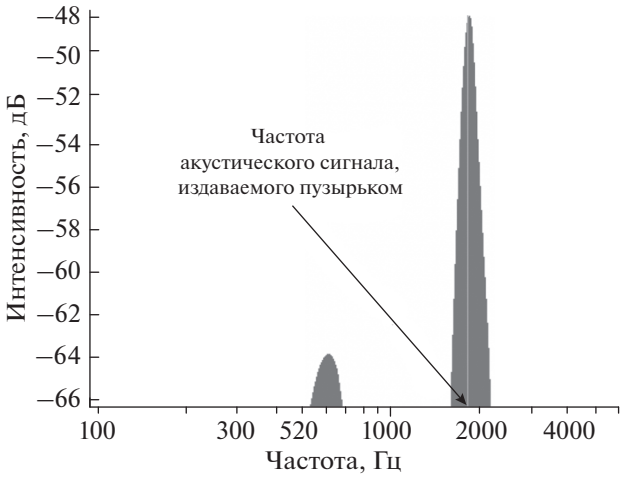

Рис. 4. Спектральный анализ аудиозаписи сипа, где максимум характеризует частоту акустического сигнала, издаваемого пузырьками.

частотный анализ записи и выделение полезного сигнала на фоне шумовой составляющей (рис. 4). После подавления фонового сигнала средствами Audacity 2.3.1 были построены частотные спектры. В частотном диапазоне звучания пузырей, определенном по спектрограммам, был выбран максимум, соответствующий наибольшей интенсивности сигнала. Определенные таким образом частоты, принятые за характеристические частоты пузырьковых газовыделений, составили 1736, 1490 и 1832 Гц для сипов GP1, GP2 и GP3, соответственно.

Для расчета радиусов выделяющихся пузырьков использовалась формула Миннарта [7, 8]:

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

где f – найденная частота аудиосигнала, производимого пузырьком, p – давление газа в пузырьке (~10^5 Па), γ – показатель адиабаты газа (для метана ~1.32), r – радиус пузырька.

Для аудиозаписей сипов GP1, GP2 и GP3 полученные значения радиусов пузырьков составили 1.8, 2.1 и 1.7 мм, соответственно.

Аналогично работе [8], используя формулу для объема шара $V = \frac{4\pi r^3}{3}$ и рассчитав количество регистрируемых сигналов N за время аудиозаписи T по формуле $V_d = \frac{NV}{T}$, можно определить полный объем выделившегося газа V_d за время наблюдения. Рассчитанный таким образом объем газовыделений V_d составил 22.9, 48.4 и 30.1 л/сут для записей GP1, GP2 и GP3.

Полученные данные совпадают по порядку величины с данными измерений газовых потоков в 2018 г. на этой же площадке для двух других аналогичных сипов [9]. Стоит отметить, что в 2018 г. отличался характер газовыделений, пузырьки выделялись порциями с паузами между сериями выходов от 2 до 15 с. Рассчитанный объем газовыделений для этих сипов составил 40 и 6 л/сут.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Разработан алгоритм, позволяющий в автоматическом режиме рассчитывать количество пузырьков газа, выделяющихся из точечного источника, на основе анализа записей акустических сигналов, генерируемых пузырьками. Данный алгоритм апробирован в натурных и лабораторных условиях.

С использованием этого алгоритма рассчитана интенсивность газовыделений для трех мелководных сипов в бухте Ласпи по аудиозаписям, полученным летом 2019 года, которая составила 10, 14 и 16 пуз./с, что соответствует газовому потоку 21, 46 и 28 л/сут, соответственно. Проведено сравнение результатов расчетов с данными 2018 г.

На основании проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработанный метод позволяет проводить расчеты объема газовыделений из точечного источника пузырькового газа при долгосрочных измерениях.

2. Объемы суточных газовыделений для исследованных сипов в 2018 и 2019 г. совпадают по порядку величин, что косвенно подтверждает работоспособность метода и может говорить о небольшой изменчивости активности данных сипов за эти годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li J., Roche B., Bull J.M. et al.* // Int. J. Greenh. Gas Con. 2020. V. 93. Art. No 102899.
2. *Dziak R.P., Matsumoto H., Embley R.W. et al.* // Deep Sea Res. II. 2018. V. 150. P. 210.
3. *Moser M., Bergès B., Ferré B.* // Geophys. Res. Abstr. 2019. V. 21. EGU2019-12940.
4. *Makarov M.M., Muyakshin S.I., Kucher K.M. et al.* // J. Great Lakes Res. 2020. V. 46. No 1. P. 95.
5. *Егоров В.Н., Артемов Ю.Г., Гулин С.Б.* Метановые сипы в Черном море средообразущая и экологическая роль. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 405 с.
6. *Малахова Т.В., Канапацкий Т.А., Егоров В.Н. и др.* // Микробиология. 2015. Т. 84. № 6. С. 743.

7. *Wiggins S.M., Leifer I., Linke P., Hildebrand J.A.* // Marin. Petrol. Geol. 2015. V. 68. P. 776

8. *Johnson H.P., Miller U.K., Salmi M.S., Solomon E.A.* // Geochem. Geophys. Geosyst. 2015. V. 16. P. 3825.

9. *Будников А.А., Малахова Т.В., Иванова И.Н., Линченко Е.В.* // Вестн. МГУ. Сер. Физ. астр. 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.

Automated calculation method for the bubble gas flux using passive acoustics data of shallow-water methane seeps

I. N. Ivanova[a, *], A. A. Budnikov[a], T. V. Malakhova[b], I. A. Iakimychev[a]

[a] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Russia*

[b] *Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, 299011 Russia*

**e-mail: ivair@yandex.ru*

An automatic algorithm has been developed that calculates the amount of bubble gas flux from a point source using the acoustic emission signal of the gas seep. This algorithm was successfully tested in situ and in laboratory conditions and can be used to evaluate gas flows with long-term monitoring of natural methane seepages.