Применение пассивного акустического метода для детектирования и оценки потоков мелководных пузырьковых газовыделений

А.А. Будников,^{1, а} Т.В. Малахова,^{2, б} И.Н. Иванова,^{1, в} Е.В. Линченко³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

физический факультет, кафедра физики моря и вод суши.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

² Институт морских биологических исследований имени А.О.

Ковалевского РАН. Россия, 299011, Севастополь, ул. Нахимова, д. 2.

³ Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Севастополе.

Россия, 299001, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, д. 7.

Поступила в редакцию 14.07.2019, после доработки 26.08.2019, принята к публикации 26.08.2019.

В работе предложен и апробирован пассивный акустический метод оценки потока подводных пузырьковых газовыделений для мелководных районов. Метод основан на связи частоты акустического сигнала, производимого пузырьком газа при отрыве от выходного подводного канала, с размером пузырька. В проведенных лабораторных экспериментах при генерации в толще жидкости пузырьков размером от 2 до 15 мм были зафиксированы частоты акустических сигналов, лежащие в диапазоне от 2.7 до 0.4 кГц. При анализе звуковых записей, выполненных вблизи действующих мелководных сипов в бухте Ласпи, идентифицирована серия коротких акустических сигналов, производимых выделяющимися пузырьками метана, длительностью 0.5–2 с, сгруппированных в пакеты, содержащие порядка десяти импульсов. Для двух исследованных сипов в частотном спектре проведенных записей зафиксированы частотные пики с максимумами, приходящимися на 1 и 1.4 кГц. Согласно теоретической оценке, диаметр пузырьков, генерирующих подобный сигнал, составляет 7 мм и 5 мм, соответственно. С учетом интенсивности пузырьковой разгрузки, рассчитанный поток газа составил 40 и 6 л/сут соответственно.

Ключевые слова: пузырьковые газовыделения, пассивный акустический метод, поток газа, резонансная частота.

УДК: 551.46.06. РАСS: 92.05.Нј, 92.10.Lq, 92.60.Ек.

введение

Метановые пузырьковые газовыделения из морского дна (сипы) вызывают интерес исследователей, работающих в различных областях науки. Являясь средообразующей структурой, сипы могут формировать вокруг себя особые биологические сообщества, изменять соотношение растворенных в воде газов, влиять на термохалинную структуру воды [1, 2]. Количественные показатели объемов пузырькового газа, достигающего поверхности и поступающего в атмосферу, имеют важное значение для оценки вклада в пул парниковых газов. Области с метановыми высачиваниями рассматриваются также в качестве перспективных областей для разработки газовых месторождений и добычи газового топлива [3]. К настоящему времени в Черноморском регионе действующие сипы зафиксированы вдоль побережья Крыма [1], Болгарии [4] и Кавказа [5], а также в Азовском море [6].

Для оценки объема выделяющегося газа исследователями используются различные методы, включая видеорегистрацию [7], ловушечный метод [8], а также активную [9] и пассивную гидроакустику [10, 11]. Однако, каждый из этих методов не позволяет проводить количественные измерения объема выделяющегося газа с достаточной точностью. Особую сложность представляют собой продолжительные наблюдения за газовыми потоками, которые, как известно, могут меняться во времени [12, 13]. При этом влияние на данные вариации различных природных процессов изучено недостаточно полно.

Использование пассивной акустики для длительного мониторинга действующих природных сипов представляется достаточно перспективным методом, дающим возможность производить измерения локальных потоков в течение длительного временного интервала в силу небольшого энергопотребления используемого оборудования.

Принцип пассивного гидроакустического метода заключается в том, что «рождающийся» пузырек, начиная с момента отрыва от проводящего газ канала, генерирует акустический сигнал, частота которого напрямую связана с его размером. Для вычисления размеров пузырьков по полученным акустическим данным исследователями часто используется формула Минаерта [11, 14, 15], связывающая резонансную частоту пузырька газа с его радиусом:

$$f = \frac{1}{2\pi r_0} \sqrt{\frac{3\gamma\pi}{\rho}},\tag{1}$$

где r_0 — радиус пузырька, γ — показатель адиабаты газа, содержащегося в пузырьке, p — гидростатическое давление, ρ — плотность окружающей пузырек жидкости.

Анализ данных акустических спектров, полученных в натурных условиях, показывает, что частота сигнала, производимого сипами, может находиться в диапазоне от нескольких сотен герц до нескольких десятков килогерц в зависимости от глубины, на которой находится источник, и ряда других параметров.

^{*a*} E-mail: aa.budnikov@physics.msu.ru

⁶ E-mail: t.malakhova@imbr-ras.ru

^{*e*} E-mail: ivair@yandex.ru

В работе [16] описаны результаты 7-месячного гидроакустического мониторинга струйных газовыделений на глубине 112 м в центральной части Северного моря. Авторы указывают, что зарегистрированные акустические сигналы, соответствующие выделяющимся пузырям, находились в диапазоне от \sim 1 до 10 кГц. В звуковой записи присутствовали относительно широкие спектральные пики с частотой около 1.0, 1.5, 2.2, 3.1, 3.6 и 5.1 кГц. Авторы указывают, что временные изменения в спектральных уровнях, по-видимому, были связаны с приливами. Записи также зафиксировали серию крупных эпизодических событий, включая значительное увеличение (\sim 10 дБ) общих уровней звука и расширение спектра.

Исследования сипа в глубоководной зоне континентального склона западного побережья Тихого океана (1228 м) показали, что частота акустического сигнала пузырьков находилась в диапазоне от 1 до 45 кГц, что соответствует расчетным диаметрам пузырьков 3.48–0.077 см [11].

В работе, проведенной на о. Байкал, показано, что основной сигнал пузырьков находился в диапазоне частот от 3.6 до 4.5 кГц [17]. Самая низкая частота зафиксирована в районе 2.5 кГц, самая высокая частота — 5.5 кГц. Авторы указывают, что расчетные размеры пузырьков, генерирующих подобный сигнал, могут лежать в диапазоне от 2.1 до 0.95 см, что соответствует их реальным размерам.

Таким образом, многие авторы отмечают принципиальную возможность расчета размеров газосодержащих пузырьков и, как следствие, оценку газовых потоков на основании данных пассивной акустики. Зона эффективного мониторинга газового потока может занимать достаточно большую площадь. Оценки затухания акустического сигнала, приводимые в работе [11], показывают, что сигнал, производимый пузырьками газа может быть распознан на расстоянии до 100 м от источника, что соответствует площади вокруг гидрофона от 300 до $3.2 \cdot 10^4$ м² в зависимости от внешних условий. Основным фактором, затрудняющим выделение «чистого звука», производимого потоком пузырькового газа, является наличие постоянных шумов как антропогенного (например, низкочастотный шум судна), так и природного (например, высокочастотный шум от ветрового волнения) происхождения [11]. Исследования на малых глубинах осложняются наличием большого количества дополнительных шумов, отсутствующих на больших глубинах, на которых обычно выполняются подобные исследования [11, 16].

В данной работе исследовалась возможность применимости пассивного акустического метода для мониторинга пузырьковых газовыделений в прибрежной мелководной зоне. Выделяющийся на небольшой глубине газ практически в полном объеме достигает поверхности воды, что упрощает подсчет объема газа, поступающего непосредственно в атмосферу. При этом небольшая глубина прибрежных сипов позволяет проводить комплексные исследования с одновременным использованием нескольких дублирующих методов с минимальными экономическими затратами. При успешной отработке методики длительного мониторинга потока пузырькового метана на малой глубине ее можно будет применять в дальнейшем на любых глубинах.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе исследования были проведены лабораторный и натурный эксперименты. Натурный эксперимент проводился на площадке постоянно действующих пузырьковых газовыделений в прибрежной мелководной зоне Черного моря (бухта Ласпи, глубина 2 м) [18]. Ранее было показано, что метановые сипы в этом районе активны в течение всего года и имеют глубинный источник [18]. Характер газовыделений представляет собой точечную разгрузку серии одноразмерных пузырей, процесс образования которых достаточно хорошо может быть воспроизведен в лабораторном эксперименте.

Экспериментальная установка (рис. 1) состояла из резервуара с водой объемом 1 м³ (глубина жидкости 20 см) с погруженной градуировочной линейкой, воздушного насоса (A), системы подводящих трубок с регулятором потока газа (B), видеокамеры GoPro 3 с микрофоном (B), и блока видеорегистрации (Γ), видеозапись с которого передавалась на персональный компьютер (Д).

Для формирования пузырей использовались различные насадки на газопроводящий канал: иглы диаметром 0.6 и 0.8 мм, а также силиконовые трубки диаметром 0.3, 1 и 1.4 см. Частота выхода пузырей в каждой серии экспериментов варьировалась при помощи регулятора потока. Каждая серия экспериментов была проведена при температуре воды 14°С и различной солености: 0, 17.4, 25.7 и 33.6 ‰.

Звуковая запись пузырьковой разгрузки производилась микрофоном камеры GoPro 3, установленной на дне резервуара в непосредственной близости от точки выхода пузырьков. Длительность каждой записи составляла 3–4 мин. Для каждой насадки газопроводящего канала устанавливалось 5–6 скоростных режимов истечения воздуха, начиная от формирования одиночного пузыря и заканчивая порогом, после которого наблюдался переход в струйный режим выхода пузырей. Анализ звуковых записей (подавление общего фонового шума, спектральный анализ) производился в программе Audacity (2.3.0).



Рис. 1. Схема экспериментальной установки: А воздушный насос, Б — регулятор потока газа, В видеокамера GoPro 3 с микрофоном, Г — блок видеорегистрации, Д — персональный компьютер



Рис. 2. Фотографии пузырьков воздуха различного диаметра (2, 3, 5, 6, 8, 10, 11, 12 и 14 мм) в процессе их движения к поверхности. Фотографии сделаны через равные промежутки времени

Для определения линейных размеров пузырей, а также характера их движения и пульсаций при подъеме сквозь толщу воды велась видеозапись эксперимента скоростной видеокамерой, позволяющей производить ускоренную съемку с частотой кадров до 960 fps (рис. 2). Анализ видеозаписей показал, что форма пузыря изменяется в процессе отрыва и всплытия. Эти изменения зависят от размера пузыря и скорости воздушного потока в канале. Форму, наиболее близкую к шарообразной, пузырь имеет непосредственно в момент отрыва от формирующей пузырь насадки. В связи с этим, размер пузыря измерялся при помощи градуировочной линейки непосредственно в этот момент.

Полевые измерения проводились в бухте Ласпи, где ранее неоднократно регистрировались пузырьковые газовыделения. Звуковая запись велась микрофоном камеры GoPro 3, установленным в непосредственной близости от точки газовыделений. Показатели среды как в лабораторном эксперименте, так и в естественных условиях, по данным мультипараметрического зонда RCM 9 LW (Aanderaa) [19], в течение всего эксперимента оставались постоянными.

2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Частотные характеристики

Примеры форм акустического сигнала от генерируемых в лабораторном эксперименте пузырей различных размеров показана на врезках рис. 3, *а*-*д*. Акустический отклик представляет собой квазипериодический затухающий сигнал для пузырей маленького размера (рис. 3, *а*, *б*) и более сложный сигнал для крупных пузырей, который можно разделить на звук отрыва и возмущение при последующих деформациях пузырька в процессе подъема (рис. 3, *г*, *д*). Для результатов, представленных на рис. 3, характерный уровень шумов не превышал — 25 дБ.

По типу частотных характеристик пузыри в лабораторном эксперименте можно условно разделить на 2 типа: мелкие (формируемые металлическими иглами-насадками с поперечным сечением d = 0.6и 0.8 мм) и крупные (формируемые использованием силиконовых насадок с поперечным сечением d = 3, 10 и 14 мм). Для каждого канала в ходе эксперимента при помощи регулятора потока газа с фиксированным шагом создавались 5 режимов истечения газа, что приводило к изменению скорости формирования и выхода пузырей (от 30 до 1000 пузырей/мин). В зависимости от скорости формирования пузырей менялся их размер. Так, для иглы диаметром d = 0.6размер пузырьков варьировался от 2.3 мм до 3.1 мм, увеличиваясь с увеличением скорости потока. Для иглы 0.8 мм диапазон диаметров пузырьков составил 2.9-5.5 мм. Для силиконовых насадок с поперечным сечением 3, 10 и 14 мм — 5-7 мм, 7-10 мм, 11-12 мм соответственно.

Для мелких пузырей, выделяющихся из металлической иглы, характерен один основной частотный пик, который соответствует моменту отрыва (рис. 3, а, б). Тогда как для более крупных пузырей, выходящих из силиконовой трубки, кроме основного пика, характерно наличие еще нескольких частотных максимумов, лежащих в области более низких частот (рис. $3, e^{-\partial}$). Очевидно, эти максимумы связаны с характером образования и отрыва крупных пузырей от формирующей насадки со сложными колебаниями поверхности пузыря в процессе подъема. В работе [20] также было показано, что на форму наблюдаемых сигналов заметное влияние оказывает взаимодействие пузырька с формирующим газовым каналом. На рис. 3 показано, что для каждого размера пузыря характерная форма акустического сигнала повторялась при всех режимах формирования пузырей: и для слабых потоков газа, и для более интенсивных. В качестве характерной частоты в процессе анализа частотных спектров выбирался наиболее высокочастотный пик, соответствующий моменту отрыва пузыря.

На рис. 4 представлены зависимости, связывающие измеренные в лабораторном эксперименте радиусы пузырьков и зарегистрированные частоты сигналов, которые пузырьки производят при отрыве. Также на рис. 4 приведена рассчитанная по (1) кривая для воды с соленостью 17.4‰. Как показали расчеты, отклонения частот в воде соленостью 17.4‰ расчеты, отклонения частот в воде соленостью 17.4‰ то говорит о хорошем соответствии теоретических оценок радиусов пузырьков и наблюдаемых в эксперименте.

2.2. Форма и размер пузырьков при различных условиях

Установлено, что размер образующихся пузырьков возрастает с увеличением диаметра формирующей насадки и скорости истечения воздуха из нее. Подобный результат был также получен в работе [21].



Рис. 3. Частотный анализ акустического сигнала от пузырей (S = 17.4%о), выходящими из каналов различных диаметров: a - d = 0.6 мм; $\delta - d = 0.8$ мм; e - d = 3 мм; e - d = 10 мм; $\partial - d = 14$ мм. На врезках изображены акустические отклики от отдельных пузырей

По данным измерений, увеличение размера капилляра в 4 раза (от 0.26 мм до 0.84 мм) вызывает увеличение диаметра образующихся пузырьков в два раза. При увеличении расхода газа значительную роль играют динамические эффекты, которые в основном связанны с ускорением масс жидкости, присоединенных к образующемуся пузырю. В таком динамическом режиме увеличение расхода газа ведет к росту отрывного объема пузырька [21]. Выполненная серия экспериментов показала, что интенсивность газовой разгрузки сильнее влияет на пузыри большого размера, формируемые насадками диаметром 10 мм и 14 мм. Так, зависимость диаметра пузырька от интенсивности потока для каналов 10 и 14 мм хорошо описывается квадратичной функцией, тогда как для каналов 3 мм, 0.8 мм и 0.6 мм с увеличением интенсивности наблюдается линейный рост диаметра отрывающегося пузырька.

2.3. Частотная характеристика пузырьковых газовыделений в бухте Ласпи

С целью регистрации звуковых сигналов, производимых выделяющимися под водой пузырьками метана в естественных условиях, на втором этапе работы был выполнен натурный эксперимент. Измерения проводились в июле 2018 г. Температура воды во время измерений была равна 25.4°С, соленость — 18.30‰. Данные параметры в ходе эксперимента оставались практически неизменными.

Для исследования естественной пузырьковой разгрузки были выбраны 2 точки (А и Б) газовыделений из 22 обнаруженных ранее в б. Ласпи. Акустическая запись проводилась в течение 21 мин для точки А и 17 мин — для точки Б. Эти районы отличались периодичностью газовыделений и типом покрытия, из которого выделялись пузырьки. В точке А пузырьки свободно выходили из отверстия в скальном основании, поросшем макрофитами (крупными водорослями) (рис. 5, a), а в точке Б газ проходил через слой песка на поверхности которого также присутствовали макрофиты (рис. 5, 6). Сделанные в точке А видеозаписи показали, что газ во время наблюдений выделялся порциями по 8-12 пузырьков в течение 2 с, затем наступала пауза длительностью также около 2 с (рис. 5, в). Звуковая запись позволила однозначно идентифицировать серию коротких акустиче-



Рис. 4. Зависимость частоты акустического сигнала издаваемого пузырьком от диаметра пузырька при различной солености. Точки — измеренные значения, линии аппроксимации, построенные методом наименьших квадратов. Черная кривая — теоретическая зависимость по формуле Минаерта

ских сигналов, сгруппированных в пакеты, содержащие 8–12 импульсов (рис. 5, *в*, *д*), что соответствует наблюдаемому видеоряду. В среднем интенсивность газовыделений составила 2.7 пузырьков/с.

В точке *Б* газ также выходил порциями, однако сопоставление аудио и видеозаписей показало, что акустический сигнал, генерируемый пузырьками, предшествовал их появлению в зоне видимости камеры (рис. 5, δ). Вероятно, в данной точке выхода пузырьков существует прослойка, замедляющая скорость их всплытия после отрыва от твердой поверхности. Серия состояла из 16–18 акустических сигналов длительностью 0.5–1 с, периодичность которых составляла около 15 с (рис. 5, *г*, *е*).

Частотный анализ звуковых записей показал наличие нескольких пиков в распределении частот как для точки A, так и для точки \mathcal{B} , причем данное частотное распределение характерно для каждого отдельно взятого пузыря. Полученные результаты совпадают с выводами работы [22], в которой приводятся результаты численного решения задачи о колеблющемся пузырьке, закрепленном в нижней точке. При отрыве пузырька от подложки может наблюдаться несколько мод колебаний его поверхности. При этом частота третьей моды, как указывают авторы, близка к резонансной частоте пульсаций свободного пузырька.

На основании данных заключений в частотном спектре аудиозаписей выполненных в точке *A* за частоту свободных колебаний пузырька была принята частота 1 кГц, для точки *Б* — 1.4 кГц.

3. ОЦЕНКА ОБЪЕМА ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ

Общий объем газовыделений оценивался по формуле

$$V = \frac{N \cdot V_{\text{bub}}}{T}$$

где V — общий поток газа; N — количество выделившихся пузырей; $V_{\rm bub}$ — объем пузырька; T — общее время наблюдения.

Объем одиночного пузыря выражается через его радиус *r*:

$$V_{
m bub}=rac{4}{3}\pi r^3.$$

Радиус пузырька рассчитывался на основе его измеренной резонансной частоты по формуле (1) с учетом солености 18.3 ‰ои глубины в точке измерений. Показатель адиабаты для метана был принят равным $\gamma \sim 1.32$. Количество выделившихся пузырей N определялось по количеству характерных импульсов резонансной частоты на спектрограмме за известный интервал времени.

В точке A рассчитанный таким образом средний объем одного пузырька равен 0.17 мл³, для точки \mathcal{B} — 0.06 мл³. Рассчитанная интенсивность пузырьковой разгрузки в точке A составила 2.7 пузырьков/с, в точке \mathcal{B} — 1.1 пузырьков/с. Поток газа составил 40 и 6 л/сут для точки A и точки \mathcal{B} соответственно. Было допущено, что компонентный состав газа для обеих исследованных точек был одинаковый [18] и составил для C1 — 92‰, для C2 — 3‰, для C3 — 0.01‰. Объем выделившихся углеводородов для точки A составил 36.8 (C1), 1.2 (C2) и 0.004 (C3) л/сут, и 5.52 (C1), 0.18 (C2) и 0.0007 (C3) л/сут для точки B соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В лабораторных экспериментах были зарегистрированы частоты, возникающие при образовании пузырьков в воде с различной соленостью. Полученные зависимости в пределах 10‰совпадают с теоретическими расчетами по формуле Минаерта, выполненными для условий проводимого эксперимента.

Для выделяющихся на небольших глубинах пузырьков диаметром более 3 мм зарегистрированы дополнительные колебательные моды, проявляющиеся в частотном спектре. На основе полученных результатов можно предположить, что увеличение размеров пузырька приводит к более сложной деформацииего поверхности при его образовании и всплытии.

Использованный на мелководной площадке пассивный акустический метод оценки пузырьковой газовой разгрузки показал возможность определения размеров выделяющихся газовых пузырьков по зарегистрированным частотам акустического сигнала, производимого пузырьком в момент отрыва от газового канала.

Акустическая запись, сделанная вблизи выхода пузырькового метана на глубине 2 м в бухте Ласпи, позволила однозначно идентифицировать серии коротких аудио-импульсов, сгруппированных в кластеры, возникающие при выходе из газовых каналов пузырьков газа. Для двух исследованных сипов были зарегистрированы характерные частоты пузырьков равные 1 и 1.4 кГц. Расчет диаметра пузырька по измеренным частотам равен 7 и 5 мм соответственно, что совпадает с проведенными ранее оценками других исследователей, полученными по результатам подводной видеосъемки, проведенной в данном районе [18].

С учетом зарегистрированной интенсивности пузырьковой разгрузки поток газа для точек А и Б



Рис. 5. Спектрограмма аудиозаписей в точках А и Б в дБ. Ласпи: а и б — подводные фотографии точек газовыделений и измерительного комплекса; в и е — спектрограммы аудиозаписей газовой разгрузки; д и е — спектрограммы в увеличенном временном масштабе одной импульсной разгрузки; ж и з — частотные спектры аудиозаписей. Стрелками отмечены отдельные пузыри на подводных фотографиях, а также на спектрограммах пакеты импульсов и отдельные сигналы от пузырей

составил 40 и 6 л/сут. В предположении схожести газопроводящих каналов во всех обнаруженных точках (скальные образования либо песок) рассчитанный общий газовый поток со всей площадки в б. Ласпи может составлять до 605 л/сут.

В дальнейшем развитие и автоматизация предложенного метода позволит реализовать задачу мониторинга прибрежных сипов для более точной оценки объема выделяющегося газа и выявления факторов, влияющих на его временные вариации.

Работа подготовлена по теме государственного задания ФГБУН ИМБИ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (номер гос. регистрации АААА-А18-118020890090-2) и при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-45-920057 р_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Егоров В. Н., Артемов Ю. Г., Гулин С. Б. / Под ред. Г. Г. Поликарпова. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». 2011. С. 405.
- 2. *Леин А. Ю., Иванов М. В.* Биохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009.
- Бондур В. Г., Кузнецова Т. В. «Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса» / Под ред. В. Г. Бондура. М.: Научный мир, 2012. С. 272.
- 4. Dimitrov L. // Cont. Shelf Res. 2002. 22. P. 2429.

- 5. Ткешелашвили Г.И., Егоров В.Н., Мествиришвили Ш.А. и др. // Геохимия. 1997. № 3. С. 331.
- 6. Пасынков А.А., Тихоненков Э.П., Смагин Ю.В. Газовые факелы на дне Азовского моряю // ГПИМО. 2009. № 1. С. 77.
- Rumer M., Sahling H., Pape T. et al. // Marine Geology. 2012. 319–322, P. 57.
- Leifer, I., Boles J. R., Luyendyk B.P., Clark J.F. // Environ. Geo. 46, N 8. P. 1038.
- 9. Артёмов Ю. Г. Распределение и потоки метановых струйных газовыделений в Черном море. 2014.
- Vazquez A., Manasseh R., Chicharro R. // Chem. Eng. Sci. 2015. 131. P. 187.
- Dziak R. P. et al. // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2018. 150. P. 210.
- 12. *Marinaro G., Etiope G., Bue N.L.* et al. // Geo-Marine Letters. 2006. **26**, N 5. P. 297.
- Wiggins S. M., Leifer I., Linke P., Hildebrand J. A. // Marine and Petroleum Geology. 2015. 68. P. 776.
- 14. Minnaret M. Philos. Mag. 1933. 16, N 4. P. 235.

- Johnson H. P., Miller U. K., Salmi M. S., Solomon E. A. // Geochem. Geophys. Geosyst. 2015. 16 P. 3825.
- Schneider von Demling et al. // Limnol. Oceanogr. Methods. 2010. 8. P. 155.
- 17. *Макаров М. М.* Иркутск: Автореф. дисс.... канд. геогр. наук, 2016.
- Малахова Т.В., Канапацкий Т.А., Егоров В.Н. и др. // Микробиология. 2015. 84, № 6. С. 743.
- Самолюбов Б. И., Иванова И. Н., Будников А. А., Цветков А. И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2015. № 6. С. 108. (Samolyubov B. I., Ivanova I. N., Budnikov A. A., Tsvetkov A. I. // Mosc. Univ. Phys. Bull. 2015. 70, N 6. P. 536.)
- Максимов А.О., Буров Б. А., Саломатин А.С. // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2. С. 49.
- 21. Караичев И.Е. // Развитие технических наук в современном мире. 2016. № 3. С. 91.
- 22. Горский С.М., Зиновьев А.Ю., Чичагов П.К. //Акустический журнал. 1988. XXXIV, № 6. С. 1024.

Application of a Passive Acoustic Method for Detection and Estimation of Shallow-Water Bubble Gas Emissions

A. A. Budnikov^{1,a}, T. V. Malakhova^{2,b}, I. N. Ivanova^{1,c}, E. V. Linchenko³

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

²A. O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS, Sevastopol, 299011 Russia.
 ³Lomonosov Moscow State University. Sevastopol 299001, Russia.
 E-mail: ^aaa.budnikov@physics.msu.ru, ^bt.malakhova@imbr-ras.ru, ^civair@yandex.ru.

A passive acoustic method for estimating the flow of underwater bubble gas emissions for shallow water areas has been proposed and tested. The method is based on the connection between the frequency of the acoustic signal produced by a gas bubble when it separates from the underwater outlet channel and the size of the bubble. In the conducted laboratory experiments acoustic signals with frequencies in the range from 2.7 to 0.4 kHz were recorded during generation of bubbles with a size from 2 to 15 mm within the fluid. The analysis of acoustic recordings made near existing shallow-water seeps in Laspi Bay showed a series of short audio signals produced by the released methane bubbles of 0.5–2s duration, grouped into packages containing approximately ten pulses. For the two investigated seeps, the frequency peaked at 1 and 1.4 kHz. According to a theoretical estimate, the bubbles generating such a signal are 7 and 5 mm in diameter, respectively. Taking the intensity of the bubble discharge into account, the calculated gas flows were 40 and 6 liters per day, respectively.

Keywords: bubble of gas, a passive acoustic method, the gas stream, a resonance frequency. PACS: 92.05.Hj, 92.10.Lq, 92.60.Ek. *Received 14 July 2019.*

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2019. 74, No. 6. Pp. 690-696.

Сведения об авторах

- 1. Будников Андрей Александрович канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-41-19, e-mail: aa.budnikov@physics.msu.ru.
- 2. Малахова Татьяна Владимировна канд. биолог. наук; ст. науч. сотрудник; e-mail: t.malakhova@imbr-ras.ru.
- 3. Иванова Ирина Николаевна канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: ivair@yandex.ru.
- 4. Линченко Евгений Васильевич магистр; e-mail: joni98@yandex.ru.