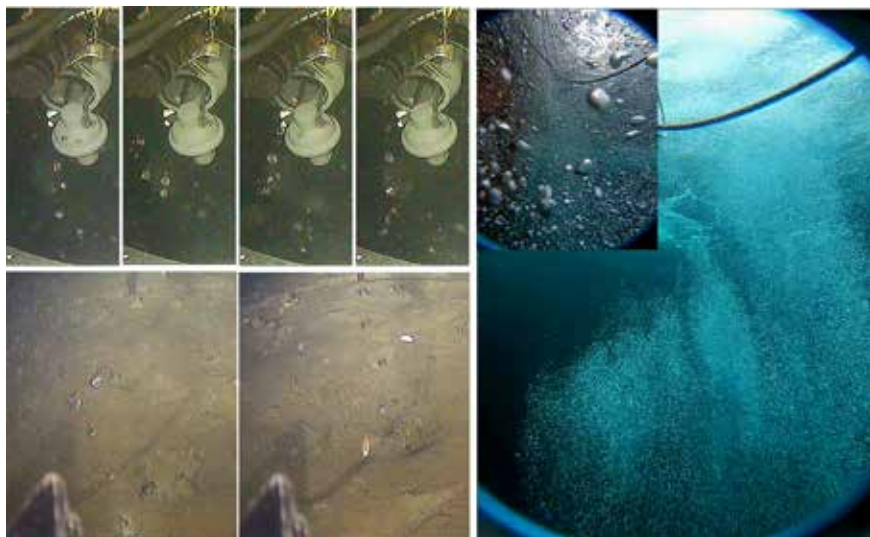


## ЛОКАЛЬНЫЙ АПВЕЛЛИНГ, ВЫЗВАННЫЙ ВСПЛЫВАЮЩИМИ ПУЗЫРЬКАМИ

**Черных Д.В., Шахова Н.Е., Космач Д.А., Саломатин А.С.,  
Дударев О.В., Спивак Э.А., Доманюк А.В., Семилетов И.П.**

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток  
denis.chernykh.vl@gmail.com*

Газовые факелы (ГФ), области непрерывной эмиссии пузырьков из морского дна (рис. 1), зарегистрированы в каждом Земном океане на глубинах от нескольких метров до 3 и более километров. Прямые измерения проб газа, переносимого такими пузырьками, показали, что в их составе преобладает метан. В настоящее время для обнаружения и исследования ГФ используются эхолоты и гидролокаторы, способные записывать акустический сигнал об уровнях обратного рассеяния звука в цифровом виде. Благодаря данным свойствам, в последнюю декаду, был разработан ряд дистанционных методов оценки количества метана, доставляемого ГФ из донных отложений в придонные слои водной толщи [1-5]. Тем не менее ни один из предложенных методов не позволяет получить досто-



*Рис. 1. Фрагменты видеозаписей газовых факела, сформированных из пузырьков, полученные в море Лаптевых [5] и Восточно-Сибирское море в 2011 и 2019 гг.*

верные оценки количества метана, переносимого ГФ в приводные слои атмосферы так как в предложенных методах не учитываются процессы газообмена, происходящие между пузырьками и водной средой, через которую пузырьки всплывают.

В комплексных арктических экспедициях Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева, прошедших в период с 2011 по 2020 гг., авторами были обнаружены ГФ с различной интенсивностью (поток) всплывающих пузырьков (рис. 1) [5]. Установлено, что величина пузырьковой эмиссии метана в атмосферу и степень насыщенности метана, растворенного в окрестностях ГФ определяется величиной пузырькового потока. В некоторых случаях поток всплывающих пузырьков может привести к формированию локального апвеллинга - подъему придонной морской воды к поверхности. При этом величина локального апвеллинга пропорциональна величине потока всплывающих из морского дна пузырьков. В свою очередь, локальный апвеллинг увеличивает скорость всплытия пузырьков, что приводит к сокращению времени взаимодействия всплывающих пузырьков со столбом морской воды, через который они всплывают. Это явление приводит к неучтенному увеличению транспортируемого метана оценить которое, крайне важно в условиях мелководных морей, омывающих российский Арктический шельф. Поэтому, для определения вклада локального апвеллинга в количество метана, переносимого ГФ, был разработан и сконструирован экспериментальный стенд, позволяющий, в условиях максимально приближенных к природным, определить величины локального апвеллинга, вызванного непрерывно всплывающими пузырьками, в зависимости от их геометрических размеров и их интенсивности (потока).

Разработанный стенд состоит из прозрачной камеры, системы соединенных с камерой газовых трубок, выдерживающих высокое давление, технических отверстий, предназначенных для установки датчиков электропроводимости и солености, расходомеров, работающих в диапазоне от 0,1 до 720 л · мин<sup>-1</sup>, воздушного компрессора с буфером объемом 40 л и осветительных приборов. Рабочее давление в водной среде стенда составляет 1 атм., высота водного столба может достигать 850 мм, диаметр генерируемых пузырьков варьируются от 1,0 до 15,0 мм. На рисунке 2 представлен экспериментальный стенд и его принципиальная схема.

Разработанный стенд позволяет определять величины локального апвеллинга, вызванного непрерывно всплывающими пузырьками, в зависимости от их геометрических размеров, и интенсивности их генерации (интенсивности потока газа). От описанной в литературе установки [6], позволяющей изучать газообмен дискретно всплывающих пузырьков со столбом жидкости, данный стенд отличается возможностью исследования зависимости величины газообмена от величин потока (коли-

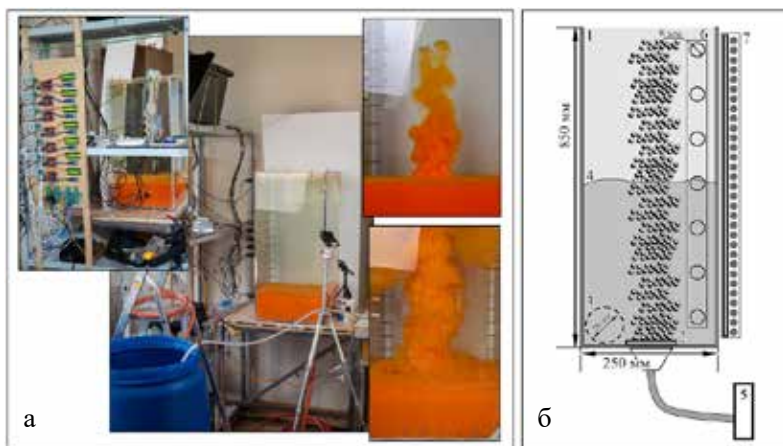


Рис. 2. Фотография стенда, сконструированного для исследования локального апвеллинга (а) и его принципиальная схема (б). 1 – рабочая зона стенда (прозрачная емкость объемом до 50 литров); 2 – система генерации всплывающих пузырьков (распылительные камни, различной плотности, или одиночные сопла); 3 – патрубки для слива или подачи жидкостей в рабочую зону экспериментального стенда; 4 – граница раздела двух жидкостей разной плотности; 5 – система подачи газовой смеси с регулируемым расходом вещества; 6 – технические отверстия для отбора проб жидкости и установки датчиков электропроводности и температуры; 7 – светодиодные осветители с регулируемым спектром светового потока и интенсивностью освещения

чества) непрерывно всплывающих пузырьков и локального апвеллинга, вызванного данными пузырьками. Проводимые эксперименты заключались в следующем: в нижней части рабочей камеры экспериментального стенда, в зависимости от поставленной задачи, устанавливается одиночное сопло или распылительный камень заданной пористости, генерирующее всплывающие пузырьки необходимого размера: 1) в виде одиночно всплывающих пузырьков, 2) в виде одиночной непрерывной цепочки пузырьков или 3) в виде непрерывного массивного пузырькового выброса. Затем через патрубки, предназначенные для наполнения и слива жидкости, в камеру экспериментального стенда поступают водные растворы с различной плотностью, обусловленной степенью солёности жидкости, формируя водную среду с ярко выраженной границей раздела (стратификации). Для эффективного определения параметров апвеллинга более солёная жидкость окрашена красителями, способными окрашивать солёную водой. Далее, через сопло или распылительный камень с помощью воздушного компрессора в камеру с заданным потоком подается газ (воздух или чистый метан). На выходе сопла или распылительного камня образуются пузырьки, которые

отрываются и всплывают, проходя сформированный в камере водный столб разрушая границу раздела воды различной плотности (имитация двуслойной структуры водных масс) и формируя локальный апвеллинг. Цикл проводимых экспериментов составлял от 5 минут до 4 часов в зависимости от интенсивности всплывающих пузырьков.

В результате проведенных экспериментов, с помощью пузырьков характерные размеры которых являются типичными для арктических морей (средний диаметр 10 мм) [5], были смоделированы ГФ поток которых был определен in-situ, с помощью видеозаписей, полученных в натуральных условиях (рис. 1). Локальный апвеллинг наблюдался как при прохождении цепочки пузырьков (потоки  $0,06$  и  $0,12$  л · м<sup>-1</sup>), так и в случае массивованного пузырькового выброса ( $1,0$  л · м<sup>-1</sup>). Путем ввода корректирующих коэффициентов, учитывающих величину газообмена между всплывающими пузырьками и столбом жидкости, через которую они всплывают, полученные результаты позволят повысить точность количественной оценки современной эмиссии метана, поступающего из акваторий морей российской Арктики в атмосферу региона.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания № АААА-А20-120021990003-3 и гранта РФФИ № 22-67-00025.

### Литература

1. Krylov A. A., Ananiev R. A., Chernykh D. V., Alekseev D. A., Balikhin E. I., Dmitrevsky N. N., Novikov M. A., Radiuk E. A., Domaniuk A. V., Kovachev S. A., Timashkevich G. K., Ivanov V. N., Ilinsky D. A., Ganzha O. Y., Gunar A. Y., Pushkarev P. Y., Koshurnikov A. V., Lobkovsky L. I., Semiletov I. P. A complex of marine geophysical methods for studying gas emission process on the Arctic Shelf // *Sensors*. 2023. V. 23. № 8. P. 3872.
2. Chernykh D., Yusupov V., Salomatin A., Kosmach D., Shakhova N., Gershelis E., Konstantinov A., Grinko A., Chuvilin E., Dudarev O., Koshurnikov A., Semiletov I. Sonar estimation of methane bubble flux from thawing subsea permafrost: A case study from the Laptev Sea shelf // *Geosciences (Switzerland)*. 2020. V. 10. № 10. P. 1-14.
3. Chernykh D. V., Salomatin A. S., Yusupov V. I., Shakhova N. E., Kosmach D. A., Dudarev O. V., Gershelis E. V., Silionov V. I., Ananiev R. A., Grinko A. A., Semiletov I. P. Acoustic investigations of the deepest methane seeps in the Okhotsk Sea // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2021. V. 332. № 10. P. 57-68.
4. Römer M., Hsu C.-W., Lohrer M., Macdonald I., Ferreira C., Pape T., Mau S., Bohrmann G., Sahling H. Amount and fate of gas and oil discharged at 3400 m water depth from a natural seep site in the Southern gulf of Mexico // *Frontiers in Marine Science*. 2019. T. 6. P. 1-18.
5. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson O. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 2015. V. 373. № 2052. P. 13.
6. Черных Д., Космач Д., Константинов А., Шахова Н., Саломатин А., Юсупов В., Силионов В., Семилетов И. Стенд для исследования газообмена между всплывающими пузырьками метана и водной средой // *Приборы и техника эксперимента*. 2019. № 1. С. 156-157.