

УДК 551.46.062.3

DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4788

Шифр специальности ВАК: 25.00.28

Количественная оценка пузырькового метана, достигающего приводных слоев атмосферы в Арктике

Д.В. Черных^{1,2} ✉, Д.А. Космач^{1,2}, Н.Е. Шахова^{1,3}, А.С. Саломатин¹,
А.Н. Салюк^{1,2}, А.В. Доманюк^{1,2}, Э.А. Спивак^{1,2}, Е.В. Гершелис⁴,
О.В. Дударев^{1,2}, В.А. Красиков¹, Р.А. Ананьев⁵, И.П. Семилетов^{1,2}

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, г. Владивосток

² Международный центр дальневосточных и арктических морей им. адмирала С.О. Макарова,
СахТех – Сахалинский государственный университет, Россия, г. Южно-Сахалинск

³ Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, Россия, г. Москва

⁴ Международный научный центр в области экологии и вопросов изменения климата,
Научно-технологический университет "Сириус", Россия, пгт. Сириус

⁵ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, г. Москва

✉ denis.chernykh.vl@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Газовые факелы, или сипы, состоящие из непрерывно всплывающих из морского дна пузырьков, зарегистрированы повсеместно в Мировом океане на глубинах от нескольких метров до трех и более километров. Измерения газового состава всплывающих пузырьков показало, что в них преобладает метан (CH₄). На территории Восточно-Сибирского шельфа сосредоточено более 30 % мирового запаса CH₄ и двуокиси углерода, за консервированных в донных отложениях подводной мерзлотой. В случае мелководных морей Восточно-Сибирского шельфа основным механизмом транспортировки CH₄ из донных отложений в воду является пузырьковый транспорт. Поэтому крайне актуально оценить количество CH₄, транспортируемого всплывающими пузырьками из донных отложений в водную толщу и атмосферу. **Цель.** Оценка количества CH₄, транспортируемого цепочками всплывающих пузырьков из морского дна до приводных слоев атмосферы. **Методы.** В работе представлено исследование механизма газообмена между всплывающими пузырьками и столбом жидкости, выполненное с помощью специально сконструированного стенда, позволяющего смоделировать локальный апвеллинг. **Результаты и выводы.** Показано, что цепочки пузырьков, поступающие из морского дна, с интенсивностями ~40 и ~110 мл·мин⁻¹ с учетом гидростатического давления доставляют в придонный слой водной толщи 206 и 616 мг·мин⁻¹ CH₄, соответственно. Согласно полученным в ходе лабораторных исследований результатам поток CH₄ из донных отложений до приводных слоев атмосферы с учетом величины газообмена и локального апвеллинга составил 69 и 286 мг·мин⁻¹. В работе представлена акустическая оценка количества CH₄, транспортируемого сипом, в состав которого входят рассмотренные цепочки всплывающих пузырьков. Согласно расчетам, поток CH₄ в воду из данной области в 2012 г. составил ~40 г·мин⁻¹. При этом величина CH₄, транспортируемого данным сипом в приводные слои атмосферы, с учетом локального апвеллинга и газообмена, происходящего между всплывающими пузырьками и столбом жидкости, составляет ~24,5 кг в сутки, или ~9 т в год.

Ключевые слова: Восточно-Сибирский шельф, пузырьковый транспорт, газовый факел, сип, метан, всплывающие пузырьки, взаимодействие океана и атмосферы, апвеллинг, море Лаптевых

Благодарности: Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 22-67-00025 лабораторные исследования механизмов локального апвеллинга, № 21-77-30001 оценка потока метана из донных отложений в воду), Приоритета 2030 СахГу – СахТех определение величины скорости всплытия пузырьков в зависимости от их интенсивности, Государственного задания № 124022100074-9 вычисление математическими методами величины газообмена, между всплывающим пузырьком и столбом жидкости. Авторы работы выражают благодарность экипажу научно-исследовательского судна «Виктор Буйницкий» за помощь в проведении исследований.

Для цитирования: Количественная оценка пузырькового метана, достигающего приводных слоев атмосферы в Арктике / Д.В. Черных, Д.А. Космач, Н.Е. Шахова, А.С. Саломатин, А.Н. Салюк, А.В. Доманюк, Э.А. Спивак, Е.В. Гершелис, О.В. Дударев, В.А. Красиков, Р.А. Ананьев, И.П. Семилетов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 12. – С. 184–197. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4788

UDC 551.46.062.3

DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4788

Quantification of bubble methane reaching atmosphere in the Arctic

D.V. Chernykh^{1,2} ✉, D.A. Kosmach^{1,2}, N.E. Shakhova^{1,3}, A.S. Salomatin¹, A.N. Salyuk^{1,2},
A.V. Domaniuk^{1,2}, E.A. Spivak^{1,2}, E.V. Gershelis⁴, O.V. Dudarev^{1,2},
V.A. Krasikov¹, R.A. Ananiev⁵, I.P. Semiletov^{1,2}

¹ Pacific Oceanological Institute of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

² International Center of the Far Eastern and Arctic seas named after admiral S.O. Makarov,
SakhalinTech – Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

³ Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

⁴ International Scientific Center in the Field of Ecology and Climate Change Issues, «Sirius»,
Sirius, Russian Federation

⁵ Shirshov institute of oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ denis.chernykh.vl@gmail.com

Abstract. Relevance. Gas flares or seeps consisting of bubbles continuously rising from the seabed have been recorded throughout the World Ocean at depths ranging from several meters to three kilometers or more. Measurements of the gas composition of the rising bubbles shown that they are dominated by methane (CH₄). The East Siberian Arctic Shelf contains more than 30% of the world CH₄ and carbon dioxide reserves, preserved in bottom sediments by underwater permafrost. In the shallow seas of the East Siberian Arctic Shelf, the main mechanism for transporting CH₄ from bottom sediments into water is bubble transport. Therefore, it is extremely important to estimate the amount of CH₄ transported by rising bubbles from bottom sediments into the water column and the atmosphere. **Aim.** Estimation of CH₄ quantity transported by chains of rising bubbles from the seabed to the atmospheric surface layers. **Methods.** The manuscript presents a study of the mechanism of gas exchange between rising bubbles and a liquid column, carried out using a specially designed stand that allows simulating local upwelling. **Results and conclusions.** The paper shows that chains of bubbles coming from the seabed with intensities of ~40 and ~110 ml·min⁻¹, taking into account the hydrostatic pressure, deliver 206 and 616 mg·min⁻¹ of CH₄ to the bottom layer of the water column, respectively. The results obtained during laboratory studies allowed us to specify the flux of CH₄ from bottom sediments to the atmospheric surface layers. Taking into account the quantity of gas exchange and local upwelling, the amount of methane delivered to the atmospheric surface layers was 69 and 286 mg·min⁻¹. The paper presents an acoustic estimate of the amount of CH₄ transported by the seep, which includes the considered chains of rising bubbles. According to calculations, the flux of CH₄ into water from this area in 2012 was ~40 g·min⁻¹. At the same time, the amount of CH₄ transported by this seep into the atmospheric surface layers, taking into account local upwelling and gas exchange occurring between the rising bubbles and the liquid column, is ~24.5 kg per day or ~9 tons per year.

Keywords: East Siberian Arctic Shelf, bubble transport, gas flare, seep, methane, rising bubbles, ocean–atmosphere interaction, upwelling, Laptev Sea

Acknowledgements: The work was supported by grants from the Russian Science Foundation no. 22-67-00025 laboratory studies of the mechanisms of “bubbling” local upwelling; no. 21-77-30001 assessment of the methane release from bottom sediments into the water as well as from the state assignments, Priority 2030 Sakhalin State University – SakhTech determination of the rate of bubble ascent depending on their intensity, no. 124022100074-9 theoretical modeling of the amount of gas exchange between a rising bubble and a water column. The authors of the work express their gratitude to the crew of the research vessel “Viktor Buinitsky” for their assistance in conducting research.

For citation: Chernykh D.V., Kosmach D.A., Shakhova N.E., Salomatin A.S., Salyuk A.N., Domaniuk A.V., Spivak E.A., Gershelis E.V., Dudarev O.V., Krasikov V.A., Ananiev R.A., Semiletov I.P. Quantification of bubble methane reaching atmosphere in the Arctic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 12, pp. 184–197. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4788

Введение

Газовые факелы (рис. 1, а), или сипы, состоящие из пузырьков, всплывающих из морского дна, зарегистрированы во всех Земных океанах на глубинах от нескольких метров до трех и более километров

[1–25]. Установлено, что в составе газа, формирующего всплывающие пузырьки, преобладает метан [7, 21]. Измерения атмосферной концентрации метана (CH₄), непрерывно проводимые в две первые декады XXI в., показали, что его доля в Земной ат-

мосфере увеличилась на 9 %, или на 50 млн т [26]. Согласно мониторингу атмосферной концентрации CH_4 , выполняемому с 1984 г., его наибольшие величины наблюдаются в северном полушарии Земли и в последние три года ежегодно обновляют свои максимальные значения [27–29].

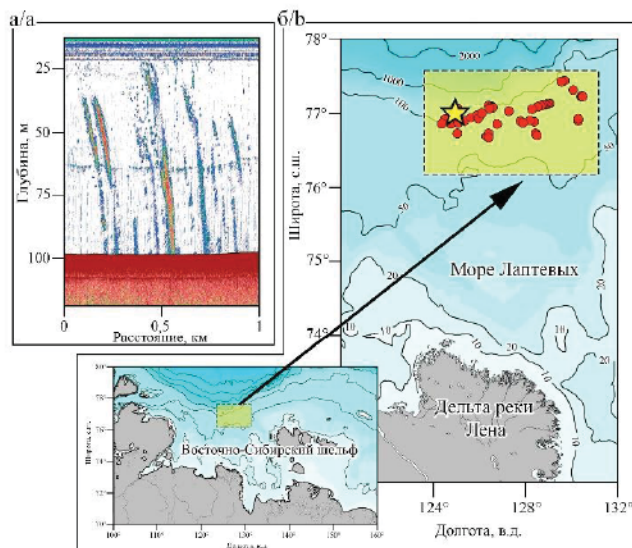


Рис. 1. а) эхограмма газовых факелов, обнаруженных на территории Восточно-Сибирского шельфа; б) карта района с обнаруженными в 2011 г. газовыми факелами (красные точки) [21]; желтой звездой отмечена гидрологическая станция, на которой были получены видеозаписи цепочек всплывающих пузырьков

Fig. 1. а) image of seeps detected at East Siberian Arctic Shelf; б) study area with seeps detected in 2011 (red dots) [21]; the hydrological station, where the chains of rising bubbles were recorded, marked with a yellow star

Роль Арктики, особенно Восточно-Сибирского шельфа (ВСШ), является крайне значимой при климатических изменениях, происходящих на нашей планете. На территории ВСШ сосредоточено более 30 % мирового запаса CH_4 и двуокиси углерода, законсервированных в донных отложениях подводной мерзлоты [30]. При этом постоянно увеличивающийся тренд атмосферной концентрации CH_4 в регионе позволяет предположить наличие механизма его транспортировки из донных отложений в атмосферу. В случае мелководных морей ВСШ таким механизмом могут являться всплывающие пузырьки и сформированные из них сипы.

Установлено, что в морях ВСШ сипы являются индикатором районов, в которых начались процессы деградации подводной мерзлоты и эманации морским дном газообразного CH_4 [30, 31]. В вод-

ной толще моря Лаптевых, на глубинах от 1 до 460 м (рис. 1, б) зарегистрировано более 700 сипов. При этом консервативная оценка количества CH_4 , переносимого данными сипами, составляет $1,94 \cdot 10^{10}$ г·д⁻¹ [21]. Исходя из изложенного, крайне важно оценить количество CH_4 , транспортируемого всплывающими с морского дна пузырьками до приводных слоев атмосферы.

В настоящее время для подобной оценки применяются математические модели, описывающие газообмен между одиночным пузырьком и столбом жидкости, через который данный пузырек всплывает [32, 33]. В работе [34] модель, предложенная в [33], была апробирована для всплывающих с глубин мене 10 м пузырьков и показала хорошее совпадение между результатами расчетов и прямыми измерениями.

Видео- и фотосъемка сипов, проводимая на глубинах от 10 до 1000 м, позволила установить, что данные явления формируются из постоянно всплывающих в виде цепочек или массивных выбросов пузырьков [21, 22, 34–36]. При этом величина газообмена между одиночными пузырьками, цепочкой пузырьков и массивным выбросом может различаться в зависимости от гидрологических процессов, происходящих в водной среде и неучтенных ни в одной математической модели. Одним из таких процессов является локальный апвеллинг, вызываемый непрерывно всплывающими пузырьками, и как следствие данного процесса – изменение значения скорости всплытия пузырьков. Для определения вклада локального апвеллинга в величину CH_4 , транспортируемого пузырьками до приводных слоев атмосферы, авторами был разработан экспериментальный лабораторный стенд, имитирующий в условиях, приближенных к естественным, всплытие пузырьков в виде непрерывной цепочки или массивного выброса.

В представленной работе с помощью данных, собранных как в полевых, так и в лабораторных условиях, получена оценка количества CH_4 , транспортируемого двумя разнесенными в пространстве цепочками всплывающих пузырьков, обнаруженных в море Лаптевых в 2012 г.

Оценка количества метана, переносимого цепочками всплывающих пузырьков в воду, с помощью видеозаписей

Во время суточной гидрологической станции, выполненной 16 сентября 2012 г. в северной части моря Лаптевых (рис. 1, б), с помощью подводного телеуправляемого комплекса «ГНОМ» (ПТОК ГНОМ, рис. 2, а) было получено более 2 часов видеозаписей, на которых зафиксированы две разнесенные в пространстве цепочки всплывающих с глубины 72 м пузырьков.

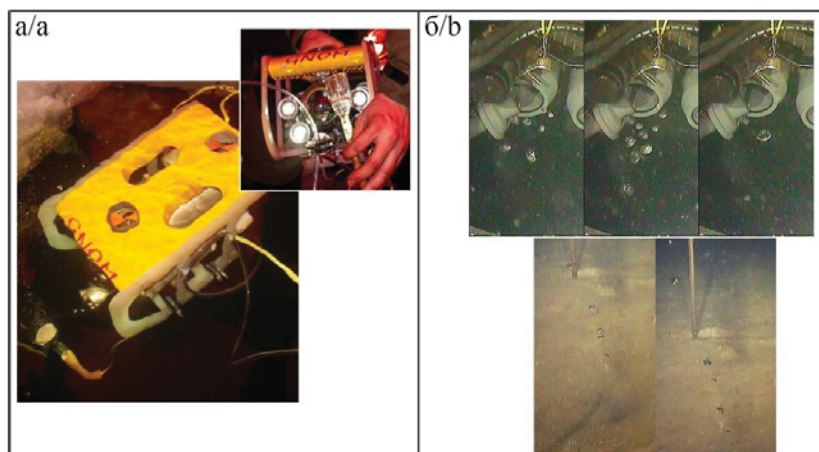


Рис. 2. а) подводный телеуправляемый комплекс «ГНОМ»; б) фрагменты видеозаписи всплывающих из морского дна пузырьков

Fig. 2. а) underwater remotely operated vehicle "GNOM"; б) fragments of video recording of bubbles rising from the seabed

После определения с помощью полученных видеозаписей поперечных размеров 1081 всплывающего пузырька была построена гистограмма их распределения по размерам. Подробное описание выполненной работы представлено в [21]. На рис. 3 проиллюстрирована гистограмма распределения количества всплывающих пузырьков в зависимости от их радиуса, построенная на основе имеющихся данных. Из анализа данного рисунка следует, что радиус более 40 % всплывающих пузырьков, зарегистрированных в районе работ, составлял $5,0 \pm 0,5$ мм (рис. 3). При этом их средний радиус был равен $4,3 \pm 0,5$ мм.

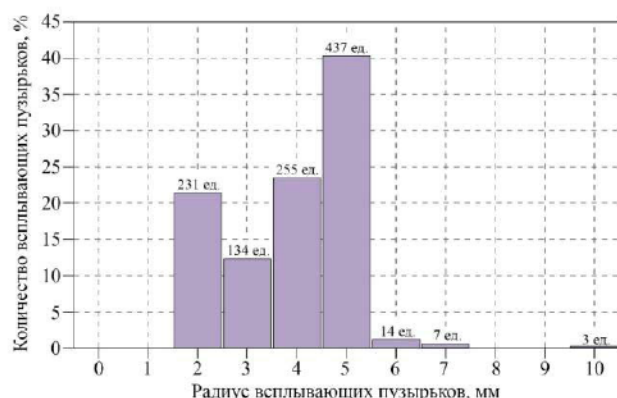


Рис. 3. Гистограмма распределения всплывающих пузырьков по размерам. На высотах столбцов отмечено количество формирующих столбцы всплывающих пузырьков

Fig. 3. Histogram of size distribution of rising bubbles. The number of rising bubbles forming columns is marked at the heights of the columns

Для оценки величины CH_4 , переносимого одиночными цепочками пузырьков, было использовано два фрагмента длительностью 35 и 10 минут.

Выбор данных фрагментов обусловлен двумя факторами:

- 1) на данных фрагментах отчетливо видно, что всплывающие пузырьки выходят из морского дна (рис. 4);
- 2) качество записи удовлетворительное и позволяет определить их размеры.

Для оценки потока CH_4 была использована следующая модель, описывающая цепочки пузырьков:

1. Всплывающие пузырьки поступают из морского дна в воду непрерывно и с постоянной скоростью (интенсивностью), равной 2 и 6 пузырьков в секунду для соответствующих цепочек.
2. Радиус всплывающих пузырьков в среднем составляет $4,0 \pm 0,5$ мм. Пузырьки имеют объем $0,3 \text{ см}^3$, или $0,3 \text{ мл}$.
3. Всплывающие пузырьки состоят из 100 % метана.

При интенсивности поступления пузырьков из морского дна в воду $120 \text{ ед.}\cdot\text{мин}^{-1}$ для первой цепочки и $360 \text{ ед.}\cdot\text{мин}^{-1}$ для второй цепочки всплывающих пузырьков количество CH_4 , выделяемого из морского дна ежеминутно, с учетом гидростатического давления, составит $206 \text{ мг}\cdot\text{мин}^{-1}$ для первой цепочки пузырьков (рис. 4, а) и $616 \text{ мг}\cdot\text{мин}^{-1}$ для второй цепочки (рис. 4, б). При этом средний поток газа от обнаруженных струй составил $411 \text{ мг}\cdot\text{мин}^{-1}$.

Оценка количества метана, транспортируемого всплывающими пузырьками до приводных слоев атмосферы

Пузырек при всплытии непрерывно отдает часть CH_4 в воду, а из воды в него поступают азот и кислород. Для определения величины CH_4 , доставленного всплывающими пузырьками до приводных слоев атмосферы, была использована модель, описывающая механизм газообмена между одиночным пузырьком и столбом жидкости, через который он всплывает [33].

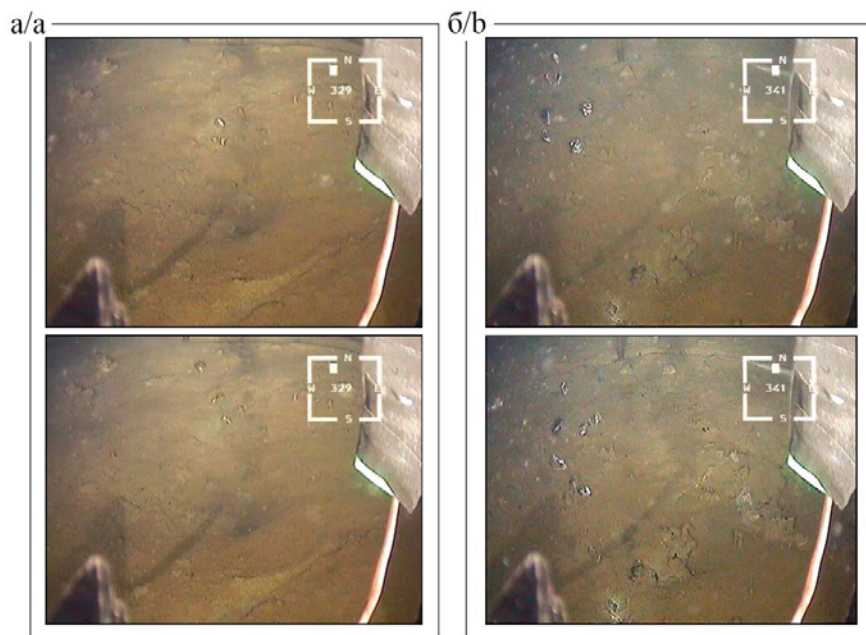


Рис. 4. Примеры цепочек всплывающих пузырьков, выходящих из морского дна, с интенсивностью: а) 2,0 пузырька в секунду; б) 6,0 пузырьков в секунду

Fig. 4. Examples of chains of rising bubbles floating from the seabed, with an intensity of: a) 2.0 bubbles per second; б) 6.0 bubbles per second

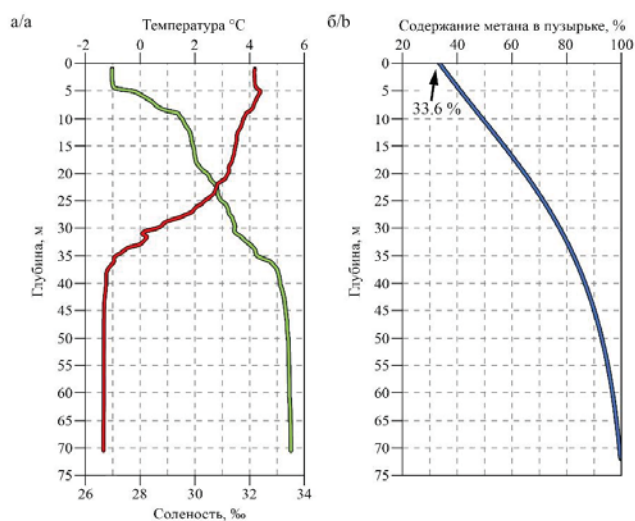


Рис. 5. а) графики изменения температуры и солёности; зеленая линия – солёность, красная линия – температура; б) график изменения количества CH_4 , содержащегося в пузырьке, при всплытии

Fig. 5. Graphs of changes in: а) temperature and salinity; green line – salinity, red line – temperature; б) CH_4 amount contained in the bubble during rise

Предложенная модель учитывает влияние солёности и гидростатического давления на величину газообмена между столбом жидкости и всплывающим пузырьком, а также его несферическую форму [33]. Данная модель была успешно верифицирована для глубин менее 10 м [34] и на сегодняшний день применяется для определения величины газообме-

на между всплывающими пузырьками и водной толщей морских и пресноводных водоемов [2, 7, 13, 37–42]. При моделировании были использованы гидрологические данные, полученные в районе работ в 2012 г. с помощью гидрологического зонда SBE 19+ (рис. 5, а).

В результате проведенного моделирования показано, что с глубины 72 м при температуре придонного слоя $1,317^\circ\text{C}$ и солёности 33 ‰ до поверхности (приводных слоев атмосферы) со скоростью всплытия $24\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ пузырек, имеющий радиус 4 мм, доставляет 33,6 % метана (рис. 5, б). При этом концентрация CH_4 в одиночном всплывающем пузырьке уменьшается на $0,2\text{ ‰}\cdot\text{с}^{-1}$. При начальном количестве CH_4 , выделяемого морским дном, и величине его потери при всплытии цепочки всплывающих пузырьков, рассмотренные в данной работе, при скорости всплытия пузырьков $24\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ транспортируют в приводные слои атмосферы $69\text{ мг}\cdot\text{мин}^{-1}$ для цепочки на рис. 4, а и $207\text{ мг}\cdot\text{мин}^{-1}$ для второй цепочки (рис. 4, б).

Вклад локального апвеллинга в величину метана, транспортируемого всплывающими пузырьками до приводных слоев атмосферы

Для определения вклада локального апвеллинга в величину CH_4 , транспортируемого всплывающими пузырьками до приводных слоев атмосферы, на разработанном в лаборатории стенде были смоделированы цепочки пузырьков, максимально приближенные к зарегистрированным в море Лаптевых (рис. 6).

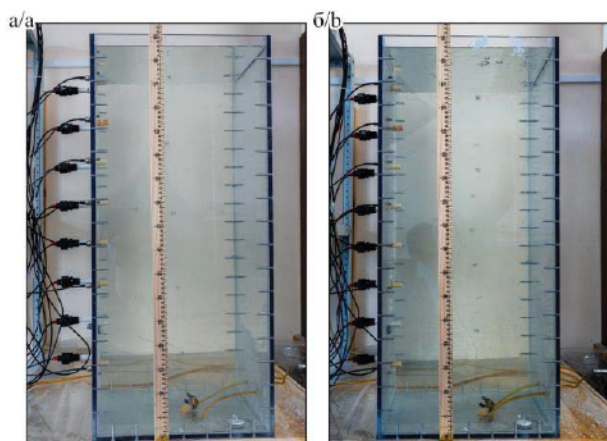


Рис. 6. Примеры цепочек всплывающих пузырьков, полученных в экспериментальном стенде: а) ~ 40 мл·мин $^{-1}$; б) ~ 110 мл·мин $^{-1}$

Fig. 6. Examples of chains of rising bubbles obtained in an experimental stand: а) ~ 40 ml·min $^{-1}$; б) ~ 110 ml·min $^{-1}$

Генерация цепочек осуществлялась с помощью установленного на дно экспериментального стенда одиночного сопла, формирующего пузырьки, радиус которых, согласно пункту 2, составлял $4,0 \pm 0,5$ мм. В работах [33, 43] показано, что основным параметром, влияющим на скорость всплытия пузырьков, являются их поперечные размеры, а величинами температуры и солености можно пренебречь. Исходя из данного допущения экспериментальный стенд был заполнен 125 л пресной воды комнатной температуры.

Локальный апвеллинг может увеличить величину транспортируемого до приводных слоев атмосферы CH_4 двумя способами:

- 1) за счет инициации всплывающими пузырьками вертикального движения (подъема) морской воды, насыщенной растворенным CH_4 , от морского дна к границе пикноклина или к поверхности;

- 2) за счет уменьшения времени взаимодействия пузырьков с морской водой, через которую они всплывают, путем увеличения скорости их всплытия.

В первом случае локальный апвеллинг проявляется при массированных выбросах всплывающих пузырьков. Подобный эффект характерен для сипов, занимающих большую площадь на морском дне, или для сипов с высокой интенсивностью выходящих из морского дна пузырьков, зарегистрированных как на территории мелководного ВСШ [8, 21, 23, 30, 31, 44], так и в различных районах Мирового океана [18, 20, 45–47].

В работе рассматриваются две отдельные цепочки пузырьков с небольшой интенсивностью, равной ~ 40 мл·мин $^{-1}$ и ~ 110 мл·мин $^{-1}$ (рис. 4). В лабораторных условиях такие цепочки способны инициировать вертикальное движение морской воды к границе пикноклина или к поверхности. Однако при наличии в районе исследований сильных течений, которые могут достигать величин 15 и более см·с $^{-1}$ [48], вклад данных цепочек в вертикальное движение придонных слоев морской воды, насыщенной растворенным CH_4 , будет минимален и в данном тексте рассматриваться не будет.

Во втором случае для определения скорости всплытия пузырьков в зависимости от величины их потока и оценки времени их взаимодействия со столбом жидкости на разработанном стенде было выполнено два эксперимента общей длительностью 115 минут. В ходе проведения экспериментов в водной среде стенда были сформированы цепочки всплывающих пузырьков с интенсивностью ~ 40 мл·мин $^{-1}$ и ~ 110 мл·мин $^{-1}$ (рис. 6). Суть проводимых экспериментов заключалась в определении скорости всплытия пузырьков, составляющих одиночную цепочку. Для этого определялось время, за которое всплывающий пузырек преодолеет 0,45 м водной толщи (рис. 7, а).

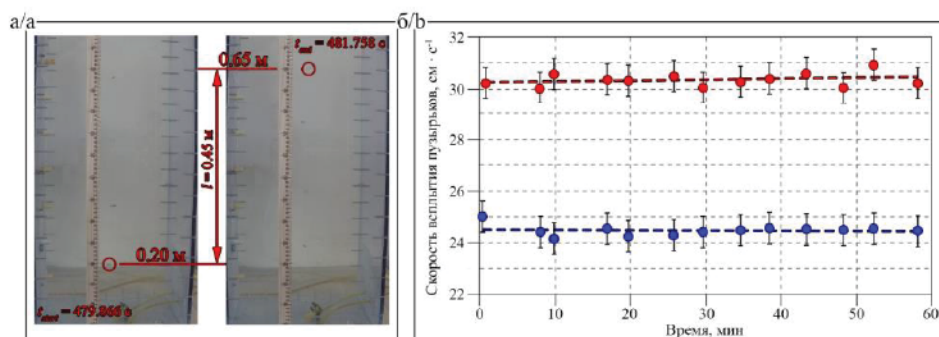


Рис. 7. а) графическое представление экспериментов по определению скорости всплытия пузырьков в зависимости от величины их потока; б) графики зависимости скорости всплытия цепочек пузырьков от времени наблюдения. Синяя линия ~ 40 мл·мин $^{-1}$, красная линия ~ 110 мл·мин $^{-1}$

Fig. 7. а) graphical interpretation of experiments to determine the rate of bubble velocities depending on the magnitude of their flux; б) graphs of the dependence of the rate of bubbles chains rise on the observation time. Blue line ~ 40 ml·min $^{-1}$, red line ~ 110 ml·min $^{-1}$

С помощью формулы (1) была определена скоростью всплытия 546 пузырьков (273 пузырька для потока ~ 40 мл·мин⁻¹ и 273 пузырька для ~ 110 мл·мин⁻¹ соответственно).

$$v_{bc} = l / (t_{end} - t_{start}) \quad (1)$$

где v_{bc} – скорость всплытия пузырька, м·с⁻¹; l – дистанция, пройденная всплывающим пузырьком, м; t_{start} – время начала измерения, с; t_{end} – время завершения измерения, с.

В результате проведенной работы был построен график зависимости скорости всплывающих в одиночной цепочке пузырьков от времени (рис. 7, б). Показано, что средняя скорость всплытия пузырьков, выходящих из морского дна в виде цепочки интенсивностью ~ 40 мл·мин⁻¹, составляет $24,5 \pm 0,5$ см·с⁻¹, а для цепочки пузырьков с интенсивностью ~ 110 мл·мин⁻¹ – $30,4 \pm 0,5$ см·с⁻¹. При этом значение скорости всплытия пузырьков при потоке ~ 110 мл·мин⁻¹ на 38 % выше значения скорости всплытия одиночного пузырька такого же размера, определенной экспериментально в работе [33] и равной 24 см·с⁻¹.

Выводы

Представлено подробное исследование двух разнесенных в пространстве цепочек пузырьков, поступающих из морского дна в воду, с интенсивностями ~ 40 и ~ 110 мл·мин⁻¹. Воспользовавшись видеозаписями, полученными с помощью ПТОК ГНОМ, авторы оценили поток CH_4 , транспортируемый данными пузырьками из морского дна в придонный слой водного столба, который, с учетом гидростатического давления, составил 206 мг·мин⁻¹ для первой цепочки пузырьков (рис. 4, а) и 616 мг·мин⁻¹ для второй (рис. 4, б).

Для оценки величины CH_4 , доставляемого данными цепочками до приводных слоев атмосферы, были использованы результаты математического моделирования [33] и экспериментальных исследований, выполненных на специально сконструированном стенде. В результате проведенного модели-

рования установлено, что с глубины 72 м до поверхности всплывающий со скоростью 24 см·с⁻¹ пузырек транспортирует 33,6 % метана от изначальных 100 %. При начальном количестве CH_4 , выделяемого морским дном, и величине его потери при всплытии цепочки всплывающих пузырьков, рассмотренные в данной работе, транспортируют в приводные слои атмосферы 69 мг·мин⁻¹ и 207 мг·мин⁻¹ метана.

Для определения вклада локального апвеллинга количество CH_4 , доставляемого всплывающими пузырьками до приводных слоев атмосферы, в лаборатории были смоделированы цепочки всплывающих пузырьков, максимально приближенные к зарегистрированным в море Лаптевых (рис. 6). В результате выполненных экспериментов было показано, что средняя скорость всплытия пузырьков, выходящих из морского дна в виде цепочки интенсивностью ~ 40 мл·мин⁻¹, составляет $24,5 \pm 0,5$ см·с⁻¹, а для цепочки пузырьков с интенсивностью ~ 110 мл·мин⁻¹ – $30,4 \pm 0,5$ см·с⁻¹. Во втором случае значение скорости всплытия на 38 % выше значения скорости всплытия одиночного пузырька, определенной экспериментально [33] и равной 24 см·с⁻¹. Принимая во внимание данный факт и полагая, что величина газообмена между пузырьком и столбом жидкости постоянная и сохраняется в течение всего времени всплытия, количество CH_4 , содержащегося во всплывающих с глубины 72 м пузырьках, формирующих первую цепочку (рис. 4, а), в момент их контакта с атмосферой составит 33,6 %. В случае второй цепочки (рис. 4, б) данная величина достигнет 46 %. При этом поток CH_4 из донных отложений до приводных слоев атмосферы, с учетом локального апвеллинга, составит 69 мг·мин⁻¹ и 286 мг·мин⁻¹ соответственно.

Воспользовавшись методом дистанционной количественной оценки потока CH_4 в воду, изложенным в [21], было определено количество CH_4 , выделяемого сипом, занимающим на морском дне площадь 820 м², в состав которого входят рассмотренные в работе цепочки пузырьков (рис. 8).

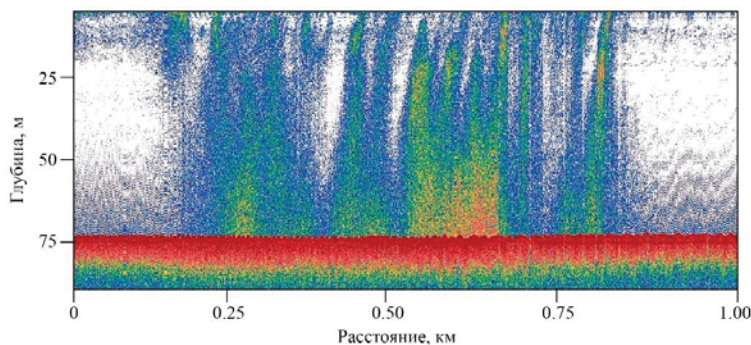


Рис. 8. Эхограмма газового факела, в границах которого были получены видеозаписи цепочек всплывающих пузырьков

Fig. 8. Echogram of the gas seep, within the boundaries of which the video recordings of rising up bubble chains were obtained

Количество CH_4 , транспортируемого данной областью в придонные слои водного столба, составляет $\sim 40 \text{ г} \cdot \text{мин}^{-1}$. При допущении, что в среднем каждая цепочка пузырьков транспортирует в придонный слой $0,4 \text{ г} \cdot \text{мин}^{-1} \text{ CH}_4$, данный сип должен состоять не менее чем из 100 подобных цепочек. Основываясь на полученных экспериментальных

результатах о скорости всплытия пузырьков, сгруппированных в цепочку, предположим, что средняя их скорость составляет $27,5 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$. Тогда величина CH_4 , транспортируемого данным сипом в придонные слои атмосферы с учетом локального апвеллинга, будет достигать $24,5 \text{ кг}$ в сутки, или $\sim 9 \text{ т}$ в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lalk E., Velez A., Ono S. Methane clumped isotopologue variability from ebullition in a mid-latitude lake // *ACS Earth and Space Chemistry*. – 2024. – Vol. 8. – № 4. – P. 689–701. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.3c00282>.
2. Cardoso S., Cartwright J. Bubble plumes in nature // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2024. – Vol. 56. – P. 295–317.
3. Leifer I. Decadal cyclical geological atmospheric emissions for a major marine seep field, offshore Coal Oil Point, Southern California // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28067-4>
4. Исследование суточной динамики вертикального распределения метана в аэробной зоне Черного моря в комплексе с акустическими исследованиями звукорассеивающих слоев / Т.В. Малахова, Ю.Г. Артёмов, А.И. Хурчак, Л.В. Решетник, А.В. Федирко, В.Н. Егоров // *Морской гидрофизический журнал*. – 2023. – Т. 39. – № 2. – С. 249–265.
5. Quantitatively monitoring bubble-flow at a seep site offshore Oregon: field trials and methodological advances for parallel optical and hydroacoustical measurements / M.E. Veloso-Alarcón, P. Urban, T. Weiss, K. Köser, M. She, J. Greinert // *Frontiers in Earth Science*. – 2022. – Vol. 10. – P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.858992>
6. Estimates of methane release from gas seeps at the Southern Hikurangi Margin, New Zealand / F. Turco, Y. Lacroix, S.J. Watson, S. Seabrook, C.S. Law, G.J. Crutchley, J. Mountjoy, I.A. Pecher, J.I.T. Hillman, S.A.R. Woelz, Gorman // *Frontiers in Earth Science*. – 2022. – Vol. 10. – P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.834047>
7. Marine bubble flow quantification using wide-baseline stereo photogrammetry / M. She, T. Weiß, Y. Song, P. Urban, J. Greinert, K. Köser // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 190. – P. 322–341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.06.014>
8. Cold-seep carbonates of the Laptev Sea continental slope: constraints from fluid sources and environment of formation / A. Ruban, M. Rudmin, A. Mazurov, D. Chernykh, O. Dudarev, I. Semiletov // *Chemical Geology*. – 2022. – Vol. 610. – P. 121103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.121103>
9. World atlas of submarine gas hydrates in continental margins / J. Mienert, C. Berndt, A. Camerlenghi, A. Tréhu, C.-S. Liu. – Switzerland: Springer Cham, 2022. – 501 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-81186-0>
10. Deep ocean bubble transport model coupled with multiple hydrate behavior characteristics / Z. Liu, B. Sun, Z. Wang, L. Chen, X. Sun // *AIChE Journal*. – 2022. – Vol. 68. – № 7. – P. e17666. DOI: [10.1002/aic.17666](https://doi.org/10.1002/aic.17666)
11. Methane transport and sources in an Arctic deep-water cold seep offshore NW Svalbard (Vestnesa Ridge, 79°N) / S. Sauer, W.-L. Hong, H. Yao, A. Lepland, M. Klug, F. Eichinger, T. Himmler, A. Crémière, G. Panieri, C.J. Schubert, J. Knies // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. – 2021. – Vol. 167. – P. 103430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103430>
12. Hydrocarbon-seep deposits in the lower Permian Angie Formation, Central Lhasa Block, Tibet / C. Liu, A. Xianyin, A. Munnecke, Y. Zhang, T. Zhu // *Gondwana Research*. – 2021. – Vol. 90. – P. 258–272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.10.017>
13. Gas emissions in a transtensional regime along the western slope of the Mid-Okinawa Trough / A. Li, F. Cai, N. Wu, Q. Li, G. Yan, Y. Sun, G. Dong, D. Luo, X. Wang // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. – Vol. 9. – P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.557634>
14. Fu X., Waite W.F., Ruppel C.D. Hydrate formation on marine seep bubbles and the implications for water column methane dissolution // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2021. – Vol. 126, – № 9. – P. e2021JC017363. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021JC017363>
15. Automatic Detection and segmentation on gas plumes from multibeam water column images / J. Zhao, D. Mai, H. Zhang, S. Wang // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12. – № 18. – P. 3085. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12183085>
16. Oppo D., De Siena L., Kemp D. A record of seafloor methane seepage across the last 150 million years // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol. 10. – P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59431-3>
17. A wideband acoustic method for direct assessment of bubble-mediated methane flux / E. Weidner, T.C. Weber, L. Mayer, M. Jakobsson, D. Chernykh, I. Semiletov // *Continental Shelf Research*. – 2019. – Vol. 173. – P. 104–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.12.005>
18. Amount and fate of gas and oil discharged at 3400 m water depth from a natural seep site in the Southern Gulf of Mexico / M. Römer, C.-W. Hsu, M. Loher, I. Macdonald, C. Ferreira, T. Pape, S. Mau, G. Bohrmann, H. Sahling // *Frontiers in Marine Science*. – 2019. – Vol. 6. – P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00700>
19. Postglacial response of Arctic Ocean gas hydrates to climatic amelioration / P. Serov, S. Vadakkepuliambatta, J. Mienert, H. Patton, A. Portnov, A. Silyakova, G. Panieri, M.L. Carroll, J. Carroll, K. Andreassen, A. Hubbard // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2017. – Vol. 114. – № 24. – P. 6215–6220. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1619288114>
20. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor / K. Andreassen, A. Hubbard, M. Winsborrow, H. Patton, S. Vadakkepuliambatta, A. Plaza-Faverola, E. Gudlaugsson, P. Serov, A. Deryabin, R. Mattingdsal, J. Mienert, S. Bunz // *Science*. – 2017. – Vol. 356. – № 6341. – P. 948–952. DOI: [10.1126/science.aal4500](https://doi.org/10.1126/science.aal4500)

21. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice / N. Shakhova, I. Semiletov, V. Sergienko, L. Lobkovsky, V. Yusupov, A. Salyuk, A. Salomatin, D. Chernykh, D. Kosmach, G. Panteleev, D. Nicolsky, V. Samarkin, S. Joye, A. Charkin, O. Dudarev, A. Meluzov, O. Gustafsson // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2015. – Vol. 373. – № 2052. – P. 20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451
22. Acoustic estimates of methane gas flux from the seabed in a 6000 km² region in the Northern Gulf of Mexico / T.C. Weber, L. Mayer, K. Jerram, J. Beaudoin, Y. Rzhano, D. Lovalvo // *Geochim. Geophys. Geosyst.* – 2014. – Vol. 15. – № 5. – P. 1911–1925. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014GC005271>
23. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, I. Leifer, V. Sergienko, A. Salyuk, D. Kosmach, D. Chernykh, C. Stubbs, D. Nicolsky, V. Tumskoy, Ö. Gustafsson // *Nature Geoscience*. – 2014. – Vol. 7. – № 1. – P. 64–70. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2007>
24. Авдейко Г.П., Гавриленко Г.М., Черткова Л.В. "Вулканолаг" исследует подводный факел (О геологических изысканиях научно-исследовательского судна в Тихом океане) // *Природа*. – 1986. – № 7. – С. 80–87.
25. Обжиров А.И., Соколова Н.Л. Телегин Ю.А. Геологические условия формирования и разрушения газогидратов в Охотском море: аспекты тектоники и генезиса // *Литология и полезные ископаемые*. – 2021. – Т. 56. – № 4. – С. 333–342. DOI: 10.31857/S0024497X21040066
26. Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources / R.B. Jackson, M. Saunio, P. Bousquet, J.G. Canadell, B. Poulter, A.R. Stavert, P. Bergamaschi, Y. Niwa, A. Segers, A. Tsuruta // *Environmental Research Letters*. – 2020. – Vol. 15. – № 7. – C. 071002. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2>
27. Lan X., Thoning K.W., Dlugokencky E.J. Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2024-06. – 2024. URL: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_doi.htmlhttps://doi.org/10.15138/P8XG-AA10 (дата обращения 10.06.2024)
28. The growth rate and distribution of atmospheric methane / E.J. Dlugokencky, L.P. Steele, P.M. Lang, K.A. Masarie // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 1994. – Vol. 99. – № D8. – P. 17021–17043. DOI: <https://doi.org/10.1029/94JD01245>
29. Masarie K.A., Tans P.P. Extension and integration of atmospheric carbon dioxide data into a globally consistent measurement record // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 1995. – Vol. 100. – № D6. – P. 11593–11610. DOI: <https://doi.org/10.1029/95JD00859>
30. Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the permafrost-hydrate system and associated methane releases in the East Siberian Arctic Shelf // *Geosciences*. – 2019. – Vol. 9. – № 6. – P. 251. DOI: 10.3390/geosciences9060251
31. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, O. Gustafsson, V. Sergienko, L. Lobkovsky, O. Dudarev, V. Tumskoy, M. Grigoriev, A. Mazurov, A. Salyuk, R. Ananiev, A. Koshumikov, D. Kosmach, A. Charkin, N. Dmitrevsky, V. Karnaukh, A. Gunar, A. Meluzov, D. Chernykh // *Nature Communications*. – 2017. – Vol. 8. – № 1. – P. 15872. DOI: 10.1038/ncomms15872
32. A new numerical model for understanding free and dissolved gas progression toward the atmosphere in aquatic methane seepage systems / P. Jansson, B. Ferré, A. Silyakova, K.O. Dølvén, A. Omstedt // *Limnology and Oceanography: Methods*. – 2019. – Vol. 17. – № 3. – P. 179–239. DOI: 10.1002/lom3.10307
33. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: how much methane reaches the atmosphere? / D.F. McGinnis, J. Greinert, Y. Artemov, S.E. Beaubien, A. Wüest // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2006. – Vol. 111. – № C9. – P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005JC003183>
34. First calibrated methane bubble wintertime observations in the Siberian Arctic Seas: selected results from the fast ice / D. Chernykh, N. Shakhova, V. Yusupov, E. Gershelis, B. Morgunov, I. Semiletov // *Geosciences*. – 2023. – Vol. 13. – № 8. – C. 228. DOI: 10.3390/geosciences13080228
35. Leifer I., Culling D. Formation of seep bubble plumes in the Coal Oil Point seep field // *Geo-Marine Letters*. – 2010. – Vol. 30. – P. 339–353. DOI: 10.1007/s00367-010-0187-x
36. Using Time-series videos to quantify methane bubbles flux from natural cold seeps in the South China Sea / P. Di, D. Feng, J. Tao, D. Chen // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. – № 3. – P. 1–17. DOI: 10.3390/min10030216
37. You K. Biodegradation of ancient organic carbon fuels seabed methane emission at the Arctic Continental Shelves // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2024. – Vol. 38. – № 2. – P. e2023GB007999. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023GB007999>
38. A synthesis of global coastal ocean greenhouse gas fluxes / L. Resplandy, A. Hogikyan, J.D. Müller, R.G. Najjar, H.W. Bange, D. Bianchi, T. Weber, W.-J. Cai, S.C. Doney, K. Fennel, M. Gehlen, J. Hauck, F. Lacroix, P. Landschützer, C. le Quéré, A. Roobaert, J. Schwinger, S. Berthet, L. Bopp, T.T.T. Chau, M. Dai, N. Gruber, T. Ilyina, A. Kock, M. Manizza, Z. Lachkar, G.G. Laruelle, E. Liao, I.D. Lima, C. Nissen, C. Rödenbeck, R. Séférian, K. Toyama, H. Tsujino, P. Regnier // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2024. – Vol. 38. – № 1. – P. e2023GB007803. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023GB007803>
39. Aerobic methane production by phytoplankton as an important methane source of aquatic ecosystems: Reconsidering the global methane budget / Y. Mao, T. Lin, H. Li, R. He, K. Ye, W. Yu, Q. He // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 907. – P. 167864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167864>
40. Evaluation of the methane paradox in four adjacent pre-alpine lakes across a trophic gradient / C. Ordóñez, T. DelSontro, T. Langenegger, D. Donis, E.L. Suarez, D.F. McGinnis // *Nature Communications*. – 2023. – Vol. 14. – № 1. – C. 2165. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37861-7>
41. Detritus-hosted methanogenesis sustains the methane paradox in an alpine lake / M. Bartosiewicz, J. Venetz, S. Läubli, O. Sepúlveda Steiner, D. Bouffard, J. Zopfi, M.F. Lehmann // *Limnology and Oceanography*. – 2023. – Vol. 68. – № 1. – C. 248–264. DOI: <https://doi.org/10.1002/lno.12263>
42. Sources and sinks of methane in sea ice: Insights from stable isotopes / C. Jacques, C.J. Sapart, F. Fripiat, G. Carnat, J. Zhou, B. Delille, T. Röckmann, C. van der Veen, H. Niemann, T. Haskell, J.-L. Tison // *Elementa: Science of the Anthropocene*. – 2021. – Vol. 9. – № 1. – P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.2020.00167>
43. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, drops, and particles. – New York: Academic Press, 1978. – 380 p.

44. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, A. Salyuk, V. Yusupov, D. Kosmach, Ö. Gustafsson // *Science*. – 2010. – Vol. 327. – № 5970. – P. 1246–1250. DOI: doi:10.1126/science.1182221
45. Widespread natural methane and oil leakage from sub-marine Arctic reservoirs / P. Serov, R. Mattingdal, M. Winsborrow, H. Patton, K. Andreassen // *Nature Communications*. – 2023. – Vol. 14. – № 1. – P. 1782. DOI: 10.1038/s41467-023-37514-9
46. Акустические исследования глубоководных газовых факелов Охотского моря / Д.В. Черных, А.С. Саломатин, В.И. Юсупов, Н.Е. Шахова, Д.А., Космач О.В. Дударев, Е.В. Гершлис, В.И. Силионов, Р.А. Ананьев, А.А. Гринько, И.П. Семилетов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 57–68. DOI: 10.18799/24131830/2021/10/3286
47. Judd A. The global importance and context of methane escape from the seabed // *Geo-Mar Lett.* – 2003. – Vol. 23. – P. 147–154. DOI: 10.1007/s00367-003-0136-z
48. Роль баротропных изменений уровня моря в формировании режима течений на шельфе восточной части моря Лаптевых / И.А. Дмитренко, Й.А. Хьюлеманн, С.А. Кириллов, С.Л. Березовская, Х. Кассенс // *Доклады Академии Наук*. – 2001. – Т. 377. – № 5. – С. 243–249.

Информация об авторах

Денис Вячеславович Черных, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории акустической океанографии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43; старший научный сотрудник Международного центра дальневосточных и арктических морей им. адмирала С.О. Макарова, СахТЕСН – Сахалинский государственный университет, Россия, 693000, г. Южно-Сахалинск, пр. Коммунистический, 33. denis.chernykh.vl@gmail.com

Денис Алексеевич Космач, научный сотрудник Лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43; старший научный сотрудник Международного центра дальневосточных и арктических морей им. адмирала С.О. Макарова, СахТЕСН – Сахалинский государственный университет, Россия, 693000, г. Южно-Сахалинск, пр. Коммунистический, 33. den-kosmach@mail.ru

Наталья Евгеньевна Шахова, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43; главный научный сотрудник Института динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, Россия, 119334, г. Москва, Ленинский пр., 38, корп. 1. nataliaeshakhova@gmail.com

Александр Сергеевич Саломатин, кандидат физико-математических наук, заведующий Лабораторией акустической океанографии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. salomatin@poi.dvo.ru

Анатолий Назарович Салюк, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43; ведущий научный сотрудник Международного центра дальневосточных и арктических морей им. адмирала С.О. Макарова, СахТЕСН – Сахалинский государственный университет, Россия, 693000, г. Южно-Сахалинск, пр. Коммунистический, 33. san@poi.dvo.ru

Анна Витальевна Доманюк, старший инженер Лаборатории акустической океанографии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43; старший инженер Международного центра дальневосточных и арктических морей им. адмирала С.О. Макарова, СахТЕСН – Сахалинский государственный университет, Россия, 693000, г. Южно-Сахалинск, пр. Коммунистический, 33. domaniuk.av@poi.dvo.ru

Эдуард Альбертович Спивак, научный сотрудник Лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43; научный сотрудник Международного центра дальневосточных и арктических морей им. адмирала С.О. Макарова, СахТЕСН – Сахалинский государственный университет, Россия, 693000, г. Южно-Сахалинск, пр. Коммунистический, 33. stilo@poi.dvo.ru

Елена Владимировна Гершлис, кандидат геолого-минералогических наук, исполнительный директор Международного научного центра в области экологии и вопросов изменения климата научно-технологического университета «Сириус», Россия, 354340, федеральная территория «Сириус», Олимпийский пр., 1. gershelis.ev@talantiuspeh.ru

Олег Викторович Дударев, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Лаборатории арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43; главный научный сотрудник Международного центра дальневосточных и арктических морей им. адмирала С.О. Макарова, СахТЕСН – Сахалинский

государственный университет, Россия, 693000, г. Южно-Сахалинск, пр. Коммунистический, 33. dudarev@poi.dvo.ru

Владислав Александрович Красиков, старший инженер, Лаборатория перспективных методов морских исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. krasikov.va@poi.dvo.ru

Роман Александрович Ананьев, старший научный сотрудник, Лаборатория сейсмостратиграфии Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36. corer@mail.ru

Игорь Петрович Семилетов, член-корреспондент РАН, доктор географических наук, заведующий Лабораторией арктических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43; научный руководитель Международного центра дальневосточных и арктических морей им. адмирала С.О. Макарова, СахТЭСН – Сахалинский государственный университет, Россия, 693000, г. Южно-Сахалинск, пр. Коммунистический, 33. ipsemiletov@gmail.com

Поступила в редакцию: 12.08.2024

Поступила после рецензирования: 18.11.2024

Принята к публикации: 28.11.2024

REFERENCES

1. Lalk E., Velez A., Ono S. Methane clumped isotopologue variability from ebullition in a mid-latitude lake. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2024, vol. 8, no. 4, pp. 689–701. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.3c00282>.
2. Cardoso S., Cartwright J. Bubble plumes in nature. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2024, vol. 56, pp. 295–317.
3. Leifer I. Decadal cyclical geological atmospheric emissions for a major marine seep field, offshore Coal Oil Point, Southern California. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28067-4>
4. Malakhova T.V., Artemov Yu.G., Khurchak A.I., Reshetnikov L.V., Fedirko A.V., Egorov V.N. Study of the daily dynamics of the vertical distribution of methane in the aerobic zone of the Black Sea in combination with acoustic studies of sound-scattering layers. *Marine Hydrophysical Journal*, 2023, vol. 39, no. 2, pp. 249–265. (In Russ.)
5. Veloso-Alarcón M.E., Urban P., Weiss T., Köser K., She M., Greinert J. Quantitatively monitoring bubble-flow at a seep site offshore Oregon: field trials and methodological advances for parallel optical and hydroacoustical measurements. *Frontiers in Earth Science*, 2022, vol. 10, pp. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.858992>
6. Turco F., Lacroix Y., Watson S.J., Seabrook S., Law C.S., Crutchley G.J., Mountjoy J., Pecher I.A., Hillman J.I.T., Woelz S., Gorman A.R. Estimates of methane release from gas seeps at the Southern Hikurangi Margin, New Zealand. *Frontiers in Earth Science*, 2022, vol. 10, pp. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.834047>
7. She M., Weiß T., Song Y., Urban P., Greinert J., Köser K. Marine bubble flow quantification using wide-baseline stereo photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, vol. 190, pp. 322–341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.06.014>
8. Ruban A., Rudmin M., Mazurov A., Chernykh D., Dudarev O., Semiletov I. Cold-seep carbonates of the Laptev Sea continental slope: Constraints from fluid sources and environment of formation. *Chemical Geology*, 2022, vol. 610, pp. 121103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.121103>
9. Mienert J., Berndt C., Camerlenghi A., Tréhu A., Liu C.-S. *World atlas of submarine gas hydrates in continental margins*. Switzerland, Springer Cham, 2022. 501 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-81186-0>
10. Liu Z., Sun B., Wang Z., Chen L., Sun X. Deep ocean bubble transport model coupled with multiple hydrate behavior characteristics. *AIChE Journal*, 2022, vol. 68, no. 7, pp. e17666. DOI: 10.1002/aic.17666
11. Sauer S., Hong W.-L., Yao H., Lepland A., Klug M., Eichinger F., Himmler T., Crémère A., Panieri G., Schubert C.J., Knies J. Methane transport and sources in an Arctic deep-water cold seep offshore NW Svalbard (Vestnesa Ridge, 79°N). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2021, vol. 167, pp. 103430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103430>
12. Liu C., Xianyin A., Munnecke A., Zhang Y., Zhu T. Hydrocarbon-seep deposits in the lower Permian Angie Formation, Central Lhasa Block, Tibet. *Gondwana Research*, 2021, vol. 90, pp. 258–272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.10.017>
13. Li A., Cai F., Wu N., Li Q., Yan G., Sun Y., Dong G., Luo D., Wang X. Gas emissions in a transtensional regime along the western slope of the Mid-Okinawa Trough. *Frontiers in Earth Science*, 2021, vol. 9, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.557634>
14. Fu X., Waite W.F., Ruppel C.D. Hydrate formation on marine seep bubbles and the implications for water column methane dissolution. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, vol. 126, no. 9, pp. e2021JC017363. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021JC017363>
15. Zhao J., Mai D., Zhang H., Wang S. Automatic detection and segmentation on gas plumes from multibeam water column images. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 18, pp. 3085. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12183085>
16. Oppo D., De Siena L., Kemp D. A record of seafloor methane seepage across the last 150 million years. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59431-3>
17. Weidner E., Weber T.C., Mayer L., Jakobsson M., Chernykh D., Semiletov I. A wideband acoustic method for direct assessment of bubble-mediated methane flux. *Continental Shelf Research*, 2019, vol. 173, pp. 104–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.12.005>

18. Römer M., Hsu C.-W., Loher 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, vol. 6, pp. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00700>
19. Serov P., Vadakkepuliambatta S., Mienert J., Patton H., Portnov A., Silyakova A., Panieri G., Carroll M.L., Carroll J., Andreassen K., Hubbard A. Postglacial response of Arctic Ocean gas hydrates to climatic amelioration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, vol. 114, no. 24, pp. 6215–6220. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1619288114>
20. Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M., Patton H., Vadakkepuliambatta S., Plaza-Faverola A., Gudlaugsson E., Serov P., Deryabin A., Mattingdal R., Mienert J., Bunz S. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. *Science*, 2017, vol. 356, no. 6341, pp. 948–952. DOI: [10.1126/science.aal4500](https://doi.org/10.1126/science.aal4500)
21. 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, vol. 373, no. 2052, pp. 20140451. DOI: [10.1098/rsta.2014.0451](https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0451)
22. Weber T.C., Mayer L., Jerram K., Beaudoin J., Rzhano Y., Lovalvo D. Acoustic estimates of methane gas flux from the seabed in a 6000 km² region in the Northern Gulf of Mexico. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2014, vol. 15, no. 5, pp. 1911–1925. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014GC005271>
23. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernykh D., Stubbs C., Nicolsky D., Tumskey V., Gustafsson O. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Geoscience*, 2014, vol. 7, no. 1, pp. 64–70. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2007>
24. Avdeiko G.P., Gavrilenko G.M., Chertkova L.V. “Volcanologist” explores the underwater torch (On geological surveys of a research vessel in the Pacific Ocean). *Nature*, 1986, vol. 7, pp. 80–87. (In Russ.)
25. Obzhairov A.I., Sokolova N.L., Telegin Y.A. Geological conditions of the formation and dissociation of gas hydrates in the Sea of Okhotsk: tectonic and genetic aspects. *Lithology and Mineral Resources*, 2021, vol. 56, no. 4, pp. 333–342. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024490221040064>
26. Jackson R.B., Saunio M., Bousquet P., Canadell J.G., Poulter B., Stavert A.R., Bergamaschi P., Niwa Y., Segers A., Tsuruta A. Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. *Environmental Research Letters*, 2020, vol. 15, no. 7, pp. 071002. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2>
27. Lan X., Thoning K.W., Dlugokencky E.J. Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2024-06. 2024. Available at: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_doi.htmlhttps://doi.org/10.15138/P8XG-AA10 (accessed 10 June 2024).
28. Dlugokencky E.J., Steele L.P., Lang P.M., Masarie K.A. The growth rate and distribution of atmospheric methane. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, vol. 99, no. D8, pp. 17021–17043. DOI: <https://doi.org/10.1029/94JD01245>
29. Masarie K.A., Tans P.P. Extension and integration of atmospheric carbon dioxide data into a globally consistent measurement record. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, vol. 100, no. D6, pp. 11593–11610. DOI: <https://doi.org/10.1029/95JD00859>
30. Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the permafrost-hydrate system and associated methane releases in the East Siberian Arctic Shelf. *Geosciences*, 2019, vol. 9, no. 6, pp. 251. DOI: [10.3390/geosciences9060251](https://doi.org/10.3390/geosciences9060251)
31. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., Sergienko V., Lobkovsky L., Dudarev O., Tumskey V., Grigoriev M., Mazurov A., Salyuk A., Ananiev R., Koshurnikov A., Kosmach D., Charkin A., Dmitrevsky N., Karnaukh V., Gunar A., Meluzov A., Chernykh D. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Communications*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 15872. DOI: [10.1038/ncomms15872](https://doi.org/10.1038/ncomms15872)
32. Jansson P., Ferré B., Silyakova A., Dølven K.O., Omstedt A. A new numerical model for understanding free and dissolved gas progression toward the atmosphere in aquatic methane seepage systems. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2019, vol. 17, no. 3, pp. 179–239. DOI: [10.1002/lom3.10307](https://doi.org/10.1002/lom3.10307)
33. McGinnis D.F., Greinert J., Artemov Y., Beaubien S.E., Wüest A. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, vol. 111, no. C9, pp. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005JC003183>
34. Chernykh D., Shakhova N., Yusupov V., Gershelis E., Morgunov B., Semiletov I. First calibrated methane bubble wintertime observations in the Siberian Arctic Seas: selected results from the fast ice. *Geosciences*, 2023, vol. 13, no. 8, pp. 228. DOI: [10.3390/geosciences13080228](https://doi.org/10.3390/geosciences13080228)
35. Leifer I., Culling D. Formation of seep bubble plumes in the Coal Oil Point seep field. *Geo-Marine Letters*, 2010, vol. 30, pp. 339–353. DOI: [10.1007/s00367-010-0187-x](https://doi.org/10.1007/s00367-010-0187-x)
36. Di P., Feng D., Tao J., Chen D. Using time-series videos to quantify methane bubbles flux from natural cold seeps in the South China Sea. *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 1–17. DOI: [10.3390/min10030216](https://doi.org/10.3390/min10030216)
37. You K. Biodegradation of ancient organic carbon fuels seabed methane emission at the Arctic Continental Shelves. *Global Biogeochemical Cycles*, 2024, vol. 38, no. 2, pp. e2023GB007999. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023GB007999>
38. Resplandy L., Hogikyan A., Müller J.D., Najjar R.G., Bange H.W., Bianchi D., Weber T., Cai W.-J., Doney S.C., Fennel K., Gehlen M., Hauck J., Lacroix F., Landschützer P., Le Quéré C., Roobaert A., Schwinger J., Berthet S., Bopp L., Chau T.T.T., Dai M., Gruber N., Ilyina T., Kock A., Manizza M., Lachkar Z., Lauerle G.G., Liao E., Lima I.D., Nissen C., Rödenbeck C., Séférian R., Toyama K., Tsujino H., Regnier P. A synthesis of global coastal ocean greenhouse gas fluxes. *Global Biogeochemical Cycles*, 2024, vol. 38, no. 1, pp. e2023GB007803. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023GB007803>
39. Mao Y., Lin T., Li H., He R., Ye K., Yu W., He Q. Aerobic methane production by phytoplankton as an important methane source of aquatic ecosystems: reconsidering the global methane budget. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 907, pp. 167864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167864>

40. Ordóñez C., DelSontro T., Langenegger T., Donis D., Suarez E.L., McGinnis D.F. Evaluation of the methane paradox in four adjacent pre-alpine lakes across a trophic gradient. *Nature Communications*, 2023, vol. 14, no. 1, pp. 2165. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37861-7>
41. Bartosiewicz M., Venetz J., Läubli S., Sepúlveda Steiner O., Bouffard D., Zopfi J., Lehmann M.F. Detritus-hosted methanogenesis sustains the methane paradox in an alpine lake. *Limnology and Oceanography*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 248–264. DOI: <https://doi.org/10.1002/lno.12263>
42. Jacques C., Sapart C.J., Fripiat F., Carnat G., Zhou J., Delille B., Röckmann T., Van der Veen C., Niemann H., Haskell T., Tison J.-L. Sources and sinks of methane in sea ice: Insights from stable isotopes. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.2020.00167>
43. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. *Bubbles, drops, and particles*. New York, Academic Press, 1978. 380 p.
44. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 2010, vol. 327, no. 5970, pp. 1246–1250. DOI: [doi:10.1126/science.1182221](https://doi.org/10.1126/science.1182221)
45. Serov P., Mattingsdal R., Winsborrow M., Patton H., Andreassen K. Widespread natural methane and oil leakage from sub-marine Arctic reservoirs. *Nature Communications*, 2023, vol. 14, no. 1, pp. 1782. DOI: [10.1038/s41467-023-37514-9](https://doi.org/10.1038/s41467-023-37514-9)
46. 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, vol. 332, no. 10, pp. 57–68. DOI: [10.18799/24131830/2021/10/3286](https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3286)
47. Judd A. The global importance and context of methane escape from the seabed. *Geo-Mar Lett*, 2003, vol. 23, pp. 147–154. DOI: [10.1007/s00367-003-0136-z](https://doi.org/10.1007/s00367-003-0136-z)
48. Dmitrenko I., Hoelemann J., Kirillov S., Berezovskaya S.L., Kassens H. Role of barotropic sealevel changes in current formation on the eastern shelf of the Laptev Sea. *Doklady earth sciences*, 2001, vol. 377, no. 5, pp. 243–249. (In Russ.)

Information about the authors

Denis V. Chernykh, Cand. Sc., Researcher, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiiskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation; Researcher, International Center of the Far Eastern and Arctic seas named after admiral S.O. Makarov, SakhalinTech – Sakhalin State University, 33, Kommunistichesky avenue, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation. denis.chernykh.vl@gmail.com

Denis A. Kosmach, Researcher, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiiskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation; Researcher, International Center of the Far Eastern and Arctic seas named after admiral S.O. Makarov, SakhalinTech – Sakhalin State University, 33, Kommunistichesky avenue, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation. den-kosmach@mail.ru

Natalia E. Shakhova, Dr. Sc., Professor, Chief Researcher, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiiskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation; Chief Researcher, Institute of Geosphere Dynamics RAS, 38, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119334, Russian Federation. nataliae-shakhova@gmail.com

Alexander S. Salomatin, Cand. Sc., Head of the Laboratory, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiiskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation. salomatin@poi.dvo.ru

Anatoly N. Salyuk, Cand. Sc., Researcher, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiiskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation; Researcher, International Center of the Far-Eastern and Arctic seas named after admiral S.O. Makarov, SakhalinTech – Sakhalin State University, 33, Kommunistichesky avenue, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation. san@poi.dvo.ru

Anna V. Domaniuk, Researcher, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiiskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation; Researcher, International Center of the Far-Eastern and Arctic seas named after admiral S.O. Makarov, SakhalinTech – Sakhalin State University, 33, Kommunistichesky avenue, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation. domaniuk.av@poi.dvo.ru

Eduard A. Spivak, Researcher, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiiskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation; Researcher, International Center of the Far-Eastern and Arctic seas named after admiral S.O. Makarov, SakhalinTech – Sakhalin State University, 33, Kommunistichesky avenue, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation. stilo@poi.dvo.ru

Elena V. Gershelis, Cand. Sc., Executive Director of International Scientific Center in the Field of Ecology and Climate Change Issues, 1, Olympic avenue, "Sirius" Federal Territory, 354340, Russian Federation. gershelis.ev@talantiuspeh.ru

Oleg V. Dudarev, Dr. Sc., Chief Researcher, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiiskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation; Chief Researcher, International Center of the Far-Eastern and Arctic seas named after admiral S.O. Makarov, SakhalinTech – Sakhalin State University, 33, Kommunistichesky avenue, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation. dudarev@poi.dvo.ru

Vladislav A. Krasikov, Researcher, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiiskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation. krasikov.va@poi.dvo.ru

Roman A. Ananiev, Researcher, Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 36, Na-khimovskiy avenue, Moscow, 117997, Russian Federation. corer@mail.ru

Igor P. Semiletov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc., Professor, Head of the Laboratory of Arctic Research, Russian Academy of Sciences, Pacific Oceanological Institute, 43, Baltiiskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation; Scientific Adviser of International Center of the Far Eastern and Arctic seas named after admiral S.O. Makarov, SakhalinTech – Sakhalin State University, 33, Kommunistichesky avenue, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000, Russian Federation. ipsemiletov@gmail.com

Received: 12.08.2024

Revised: 18.11.2024

Accepted: 28.11.2024