

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 550.83

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ ЭМИССИИ ГАЗОВ НА ШЕЛЬФЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

© 2022 г. Р. А. Ананьев¹, *, Н. Н. Дмитриевский¹, А. Г. Росляков²,
Д. В. Черных³, Е. А. Мороз⁴, Ю. А. Зарайская⁴, И. П. Семилетов³

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

⁴Геологический институт РАН, Москва, Россия

*e-mail: corer@mail.ru

Поступила в редакцию 09.04.2021 г.

После доработки 25.05.2021 г.

Принята к публикации 18.08.2021 г.

Эмиссия природного газа со дна моря к поверхности в шельфовых областях арктических морей вызывает все больший интерес у исследователей. В последнее время для регистрации потоков природного газа, истекающего со дна моря, в основном используются различные типы акустических приборов. Гидро- и сейсмоакустическое оборудование в различных комбинациях было установлено в виде акустического комплекса и успешно использовалось в научных рейсах судов РАН в 2011–2020 гг. в морях арктического шельфа России. Настоящая статья посвящена аспектам использования аппаратуры для обнаружения областей водной и осадочной толщи с повышенным насыщением природными газами, а также описанию некоторых полученных результатов.

Ключевые слова: арктический шельф, акустические методы исследований, газовые выходы, эхолотирование, сейсмопрофилирование, газовые аномалии

DOI: 10.31857/S0030157422010014

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов эмиссии природного газа со дна на шельфе арктических морей приобрело особое значение в течение нескольких последних десятилетий. Так, по некоторым оценкам, выделение большого количества метана в атмосферу в районах арктического шельфа может являться одной из причин климатических изменений со значительными экологическими последствиями [4, 12]. Помимо этого, выделяющиеся со дна газовые потоки в целом ослабляют структуру и природную устойчивость донных осадков и служат потенциальным источником природных рисков при строительстве и эксплуатации подводных сооружений, таких как трубопроводы, нефтедобывающие и разведочные платформы и т.п.

Принимая во внимание значительно более высокую удельную производительность дистанционных геофизических исследований по сравнению с любыми контактными методами, гидроакустика является одним из основных инструментов изучения процессов подводной разгрузки газов и флюидов в океане. В данной работе рассматрива-

ются различные аспекты комплексного использования гидро- и сейсмоакустической аппаратуры с целью выявления и мониторинга выходов природного газа со дна моря, а также картирования газовыводящих путей в осадках на примере шельфовой зоны морей Северного Ледовитого океана.

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные результаты, изложенные в настоящей статье, получены в ходе экспедиций 2011–2021 гг. на научно-исследовательских судах РАН “Академик Николай Страхов”, “Академик Мстислав Келдыш”, “Академик М.А. Лаврентьев” в шельфовой зоне Баренцева, Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского морей [1–3].

Судном, в наибольшей степени отвечающим всем требованиям акустического мониторинга процессов подводной разгрузки газов, является НИС “Академик Николай Страхов”. Оно оборудовано стационарно установленными в его дни-

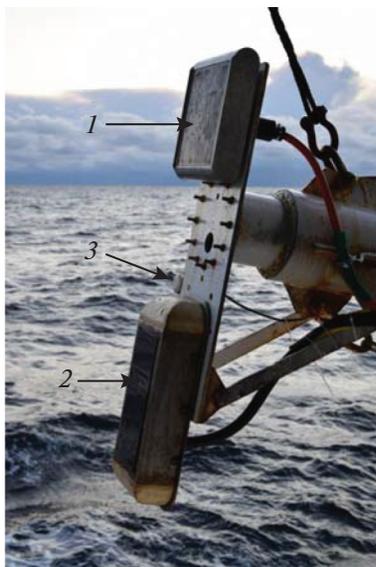


Рис. 1. Штанга с антеннами эхолотов и профилографа в походном положении. 1 – Антенна SES-2000, 2 – WASSP WMB-3250, 3 – антенна Simrad EK-15.

ще в специальной гондole многолучевым эхолотом Reson SeaBat 8111 (рабочая частота 100 кГц) и сейсмопрофилографом Edgetech 3300 (рабочие частоты 2–16 кГц), что позволяет вести непрерывные измерения по ходу судна при любых скоростях его движения. Кроме того, на специальной опускаемой в воду штанге у борта судна были установлены приемо-передающие антенны параметрического эхолота-профилографа SES-2000 Standard (с рабочими частотами 4–15 кГц в параметрическом режиме) и многолучевого эхолота WASSP WMB-3250.

На судах “Академик Мстислав Келдыш” и “Академик М.А. Лаврентьев” антенны акустических приборов устанавливались на опускаемых штангах, аналогичных описанной выше. При этом, в зависимости от поставленных задач в различных комбинациях использовались: эхолот-профилограф SES-2000, многолучевой эхолот WASSP WMB-3250, гидролокатор бокового обзора Гидра-500 и однолучевой научный эхолот Simrad EK15. Механическая конструкция и способ крепления опускаемой штанги позволяла вести измерения при скоростях судна до 5–6 узлов. Внешний вид установленных на штангу приборов приведен на рис. 1.

Помимо этого, нами использовался комплект оборудования “Геонт-Шельф” с излучателем типа спаркер для работ методом непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП) с частотой спектра излучаемого сигнала 300–400 Гц.

Указанный набор акустической аппаратуры позволил решать большинство поисковых и идентификационных задач, используя в отдельных случаях преимущества каждого из имеющих-

ся устройств. Методика работы с комплексом предусматривала движение судна вдоль запланированных галсов с одновременной записью информации акустического оборудования и выводом текущего изображения на экраны соответствующих мониторов.

Для устранения взаимных помех от приемо-передающих антенн, установленных рядом друг с другом, параметры излучения приборов были синхронизированы. Приборы были соединены между собой кабелями, синхроимпульс подавался с многолучевого эхолота.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Газовые “факелы”, связанные с выходящими из донных отложений всплывающими пузырьками, регистрировались во многих районах Мирового океана, в том числе на арктическом шельфе [11–13]. Для их обнаружения и картирования использовались различные типы гидроакустических устройств, в том числе однолучевые и многолучевые эхолоты, эхолоты с расщепленным лучом, гидролокаторы бокового обзора и другие сонары, в том числе пассивные [7–10, 13].

Наши исследования подтвердили, что наиболее информативным с точки зрения прямой регистрации выходящих в воду газовых потоков является высокочастотное эхолотирование, позволяющее идентифицировать практически все формы газовой деления – от одиночных мелких источников до сплошных газовых “факелов”, протяженностью в сотни метров и более. Газовые выходы хорошо регистрируются визуально на экранах таких приборов благодаря существенной разнице в

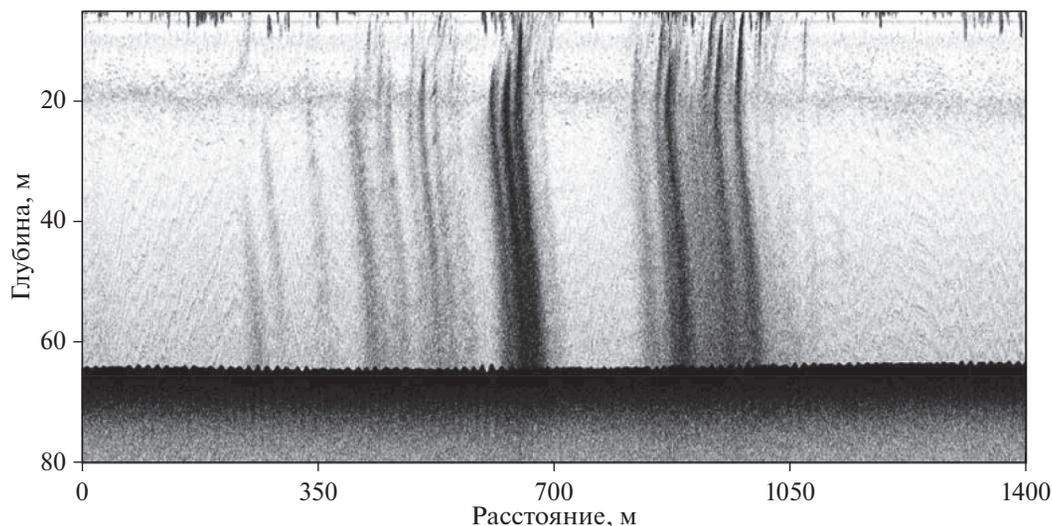


Рис. 2. Пример регистрации газовых выходов в море Лаптевых высокочастотным эхолотом Simrad EK15.

акустическом импедансе между газонаполненным пузырьком и водой. Наличие обнаруженных при помощи эхолотов газовых выходов было в дальнейшем подтверждено при помощи прямой видеосъемки [11].

Под термином “высокочастотные” подразумеваются эхолоты, длина акустической волны излучения λ которых соизмерима или меньше размеров пузырьков высачивающегося из дна газа. Характерные радиусы газовых пузырьков в зонах естественной разгрузки находятся в пределах от 1 до 15 мм [10], что позволяет отнести к категории “высокочастотных” эхолоты с длинами волн излучения около 30 мм и менее. Чем больше частота и соответственно меньше длина волны, тем более мелкие пузырьки будут доступны для регистрации.

Для обнаружения газовых “факелов” в качестве однолучевого высокочастотного эхолота нами использовались научный эхолот Simrad EK15 с частотой 200 кГц ($\lambda = 7.5$ мм) и высокочастотный канал эхолота-профилографа SES-2000 (частота около 100 кГц, $\lambda = 15.0$ мм). Акустическое изображение одиночной струи или “факела” на однолучевом эхолоте имеет вид вертикально ориентированной зоны сплошной засветки с горизонтальным размером близким к реальному горизонтальному размеру струи газа на дне (рис. 2). При этом качество визуального воспроизведения пузырьков на эхограммах существенным образом зависит от целого ряда причин: скорости судна, наличия акустических помех, направления подводных течений, влияющих на траекторию движения поднимающихся вверх пузырьков, а также направления, с которого поток газа облучается гидролокационным прибором.

Важным преимуществом однолучевых эхолотных систем является возможность использования получаемых с их помощью данных для ко-

личественной оценки газового потока в областях его пузырьковой разгрузки. Традиционные методики дистанционного определения потока основаны на оценке объема пузырькового газа по уровню обратного рассеяния звука с использованием дополнительных данных других методов (например, оптических) о размерах, форме и скорости подъема всплывающих пузырьков [6, 13]. В последнее время находит применение метод с использованием калибровочных измерений зависимости вертикального объемного потока от акустического сечения обратного рассеяния всплывающих пузырьков, позволяющий выполнять количественную оценку и по акустическим данным многолучевых эхолотов [9].

Использование однолучевых эхолотов для пространственного картирования положения газовых “факелов”, хотя и позволяет обнаружить признаки эмиссии газа, ограничивается тем фактом, что система является одноканальной, и для обеспечения точного площадного картирования газовых выходов требуется частая сетка галсов. Вместе с тем, одновременное использование высокочастотных однолучевых и многолучевых систем позволяет уверенно выделять области повышенного рассеяния звука, связанные именно с подводной разгрузкой природного газа.

Для оперативного получения картины пространственного распределения газовых факелов авторами успешно использовался многолучевой эхолот WASSP WMB-3250 (рабочая частота 160 кГц). С учетом того, что данный эхолот имеет функцию записи акустического изображения разреза водной толщи и профиля поверхности дна, с его помощью удавалось получать пространственно-привязанную площадную картину эмиссии газа со дна моря (рис. 3). Помимо этого, батиметриче-

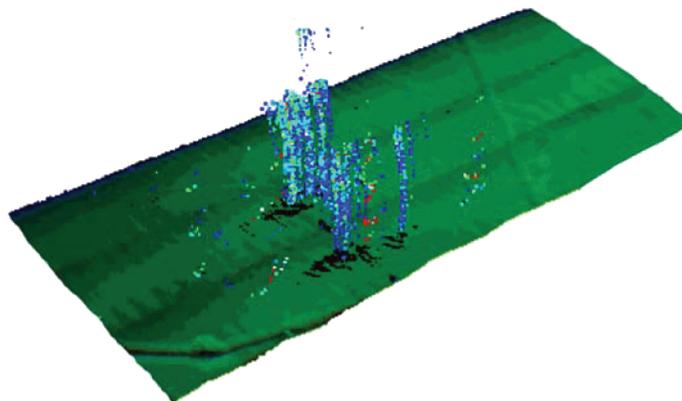


Рис. 3. Пространственная трехмерная картина эмиссии газа из дна, полученная с помощью многолучевого эхолота.

ская площадная съемка позволяла обнаруживать покмарки — формы рельефа, непосредственно связанные с зонами подводной разгрузки природного газа, а также некоторые другие сопутствующие осложнения рельефа морского дна.

В некоторых случаях для поиска участков подводной эмиссии природного газа возможно использовать гидролокационные данные многолучевого эхолота [5]. Их использование, также как и использование данных гидролокатора бокового обзора, целесообразно при рекогносцировочной съемке, так как точное определение местоположения газовых выходов этим методом практически невозможно.

Необходимо отметить, что регистрация параметров водной толщи при использовании высокочастотных многолучевых эхолотов требует весьма значительного объема компьютерной памяти, а их обработка занимает большое количество времени. Поэтому полная запись таких акустических данных целесообразна в местах с подтвержденными или ожидаемыми газовыми выходами, в том числе по данным однолучевого эхолота.

Кроме прямой регистрации исходящего со дна газа большой интерес представляет регистрация мест, где такая эмиссия потенциально возможна и наиболее вероятна. Для этих целей нами использовалось сейсмоакустическое оборудование. С его помощью уверенно выделялись предполагаемые зоны аномального газонасыщения осадков, основными признаками которых на записях сейсмоакустических изображений являлись: резкое возрастание амплитуды отражений, появление большого количества дифрагированных волн, задержка времени регистрации отражений от нижележащих границ, вызывающая их ложное прогибание, а также куполообразные и конусообразные вертикально ориентированные области акустически прозрачной или хаотической записи.

Проведенный в некоторых подобных местах отбор проб и последующий анализ содержания

газа в керне подтвердили интерпретацию таких изображений как зон с повышенным содержанием газа. Концентрация метана в керне на глубине проявления акустической аномалии резко возросла, в некоторых случаях — на два порядка [12].

На рис. 4а показан разрез, сделанный с помощью сейсмопрофилографа Edgetech в Печорском море с признаками аномальной насыщенности осадочной толщи природным газом. Вертикально ориентированные области акустически прозрачной записи (“газовые трубы”) имеют ширину от 10 до 100 м, для их верхней части характерны высокоамплитудные отражения сигнала. Можно отметить, что чем шире “труба”, тем меньше мелких областей прорывов в ее окрестностях. Это указывает на то, что прорывающие флюиды имеют свойство аккумулироваться из мелких в более крупные восходящие колонны. На разрезах сейсмопрофилографа SES-2000 в море Лаптевых хорошо заметны высокоамплитудные аномалии на глубине около 1 м под дном, регистрируемые на записи в виде дифрагированных волн (рис. 4б) и П-образные зоны акустической тени (рис. 4в). Несмотря на относительно низкочастотный (в сравнении с эхолотами) спектр сигналов профилографа, на рис. 4в заметен выход газа в водную толщу, что может указывать на очень мощный и концентрированный поток пузырьков.

Одной из задач исследований являлось одновременное использование различных акустических методов, позволяющее сразу изучать как водную, так и осадочную толщу, что повышало достоверность определения местоположения источников — мест подводной разгрузки газов и флюидов. Кроме того, целью такого комплексирования было определение глубинных “корней” газовых выходов. На рис. 5 показан фрагмент профиля с одновременной записью данных высокочастотного эхолота и НСАП в море Лаптевых.

Вследствие высокого содержания газа в придонных осадках, на сейсмоакустических разрезах

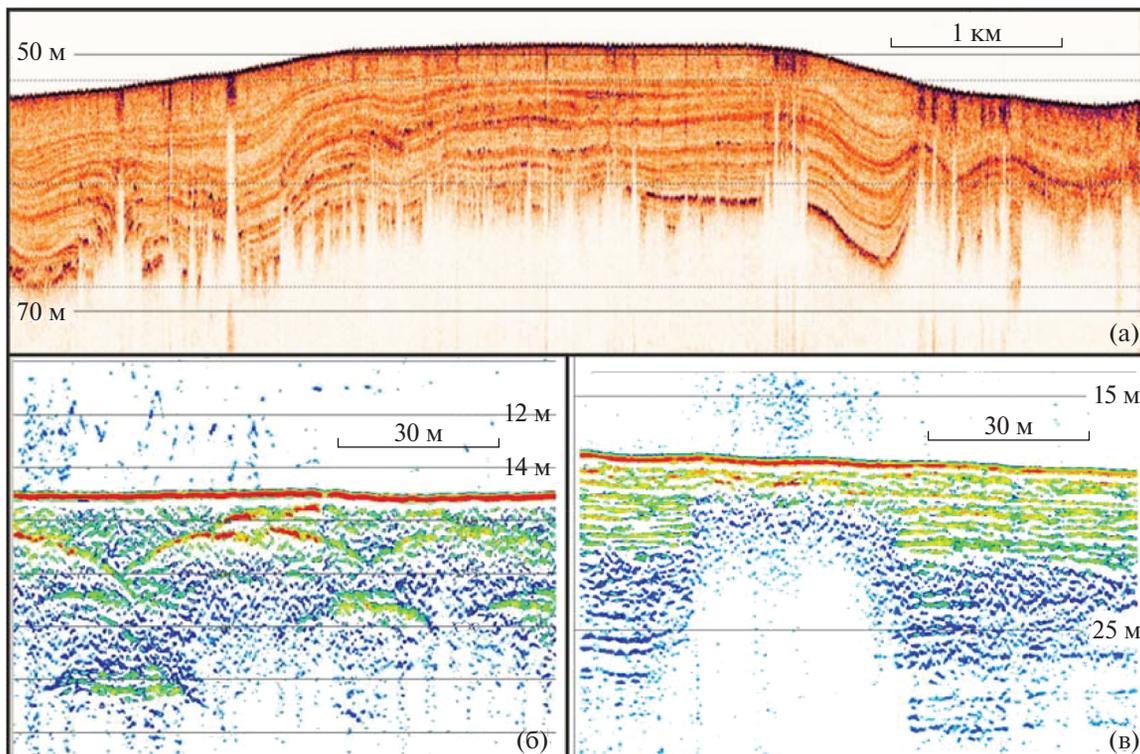


Рис. 4. Фрагменты сейсмоакустических разрезов с признаками аномальной газонасыщенности отложений.

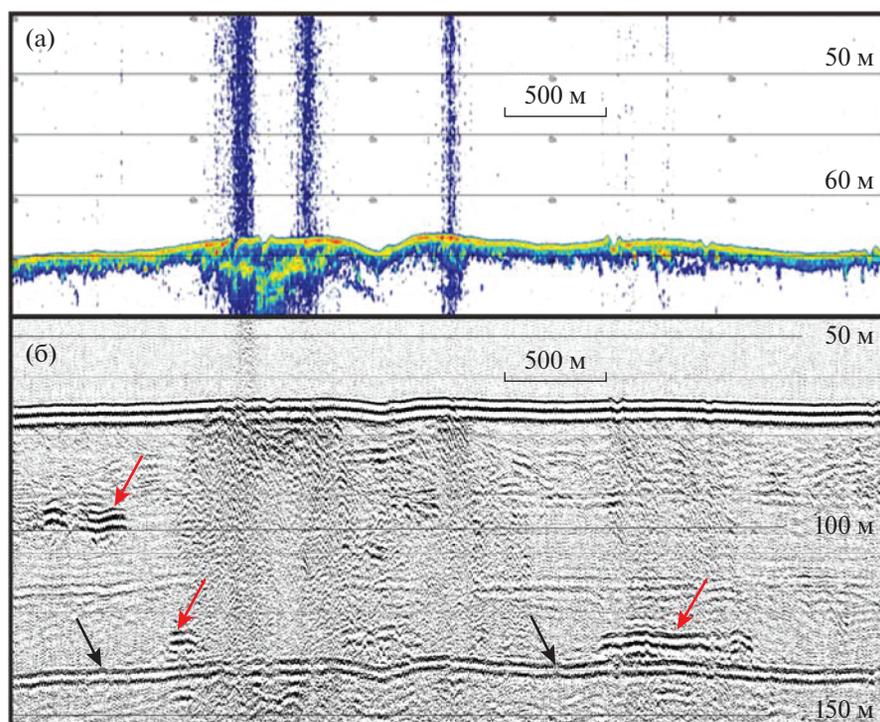


Рис. 5. Фрагмент регионального профиля с одновременной записью данных высокочастотного эхолота (а) и НСАП (б). Кратные от дна отражения показаны черными стрелками, газонасыщенные слои – красными.

далеко не всегда удавалось проследить тонкую структуру верхней части разреза. На профиле НСАП хорошо видны вертикальные зоны нарушения корреляции и зоны тени, вызванные повышенным поглощением сейсмоакустической энергии в придонных слоях (рис. 5б). Кроме того, на разрезе отчетливо выделяются отдельные участки резкого возрастания амплитуд отражений на уровнях 25 и 65 м под дном, интерпретируемые как газонасыщенные слои, на рисунке они показаны стрелками. По этим данным мы можем утверждать, что вертикальная миграция газа к поверхности, совпадающая в плане с местами подводной разгрузки газа по данным эхолотирования (рис. 5а), происходит с глубины как минимум 65 м ниже поверхности дна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный комплекс акустического обораживания позволил решать большинство задач, связанных с обнаружением, картированием и мониторингом процессов подводной разгрузки газов со дна шельфовой зоны морей Северного Ледовитого океана.

Высокое разрешение использовавшейся аппаратуры, а также удачная схема ее совместного расположения и использования позволили успешно определять местоположение газовых выходов в водную толщу, а также выделять аномалии в осадках, связанные с их повышенной газонасыщенностью.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках темы Государственного задания ИО РАН № 0128-2021-0005. Экспедиционные исследования на НИС “Академик Мстислав Келдыш” и “Академик М.А. Лаврентьев” были выполнены в рамках грантов РФ № 21-77-30001 и Минобрнауки РФ (тема № 121021500057-4), на НИС “Академик Николай Страхов” – при поддержке гранта РФФИ № 18-35-20060 и темы госзадания ГИН РАН № 0135-2019-0076. Обработка гидроакустических данных выполнена в рамках темы госзадания АААА-А20-120021990003-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитревский Н.Н., Ананьев Р.А., Мелузов А.А., Ульяновцев А.А.* Исследования верхней осадочной толщи и рельефа морского дна в морях Восточной Арктики в 78-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик М.А. Лаврентьев” // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 1. С. 166–168.
2. *Никифоров С.Л., Ананьев Р.А., Дмитревский Н.Н. и др.* Геолого-геофизические исследования в морях Северного Ледовитого океана в 41-м рейсе НИС

“Академик Николай Страхов” в 2019 г. // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 2. С. 334–336.

3. *Никифоров С.Л., Сорохтин Н.О., Дмитревский Н.Н. и др.* Комплексные исследования в 38-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” в Баренцевом море // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 5. С. 885–887.
4. *Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др.* Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики, как возможная причина “метановой катастрофы”: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // *Докл. РАН*. 2012. Т. 446. № 3. С. 330–335.
5. *Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Абрамова А.С. и др.* Картирование звукорассеивающих объектов в северной части Баренцева моря и их геологическая интерпретация // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 4. С. 655–662.
6. *Черных Д.В., Юсупов В.И., Саломатин А.С. и др.* Новый акустический метод количественной оценки пузырькового потока метана в системе донные отложения – водная толща и его реализация на примере моря Лаптевых, Северный Ледовитый океан // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 11. С. 153–167.
7. *Bergès B., Leighton T., White P.* Passive acoustic quantification of gas fluxes during controlled gas release experiments // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2015. V. 38. P. 64–79.
8. *Blomberg A., Sæbø T., Hansen R. et al.* Automatic detection of marine gas seeps using an interferometric sidescan sonar // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2016. V. 42 (3). P. 590–602.
9. *Leifer I., Chernykh D., Shakhova N., Semiletov I.* Sonar gas flux estimation by bubble insonification: application to methane bubble fluxes from the East Siberian Arctic shelf seabed // *The Cryosphere*. 2017. № 11. P. 1333–1350.
10. *Li J., Roche B., Bull J. et al.* Broadband acoustic inversion for gas flux quantification – Application to a methane plume at Scanner Pockmark, central North Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. V. 125. № 9. e2020JC016360.
11. *Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al.* The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2015. V. 373. № 2052. 20140451.
12. *Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. et al.* Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Communications*. 2017. V. 8. № 15872.
13. *Weidner E., Weber T.C., Mayer L. et al.* A wideband acoustic method for direct assessment of bubble-mediated methane flux // *Continental Shelf Research*. 2019. V. 173. P. 104–115.

Acoustic Monitoring of Gas Emission Processes in the Arctic Shelf Seas

R. A. Ananiev^{a, #}, N. N. Dmitrevsky^a, A. G. Roslyakov^b, D. V. Chernykh^c, E. A. Moroz^d,
Yu. A. Zarayskaya^d, I. P. Semiletov^c

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^c*Pacific Oceanological Institute, Far-East Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

^d*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: corer@mail.ru*

The emission of natural gas from the seabed to the surface in the shelf areas of the Arctic seas is of increasing interest among researchers. Recently, various types of acoustic instruments have been used to record streams of natural gas flowing out from the seabed. Hydro- and seismoacoustic equipment in various combinations was installed in the form of an acoustic complex and was successfully used in scientific cruises of the RAS vessels in 2011–2020 in the seas of the Russian Arctic shelf. This article is devoted to the issues of using the equipment for detecting areas of increased gas saturation, as well as to the description of some obtained results.

Keywords: Arctic shelf, acoustic research methods, gas flares, echo sounding, seismic profiling, gas anomalies