

УДК 551.463.621.391

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УЧАСТКОВ ГАЗОВОЙ РАЗГРУЗКИ МОРСКОГО ДНА

© 2024 г. В. И. Каевицер, В. М. Смирнов, И. В. Смольянинов*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,
г. Фрязино Московской обл., Россия*

** E-mail: ilia159@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.07.2023 г.

После доработки 27.08.2023 г.

Принята к публикации 28.12.2023 г.

Приведены и проанализированы экспериментальные результаты геолого-геоморфологических наблюдений в некоторых морских районах с активной газовой разгрузкой из донных отложений. Работы были выполнены с использованием инструментального комплекса геофизической гидролокационной аппаратуры, который включал акустический профилограф и батиметрический гидролокатор бокового обзора, использующий интерферометрический метод измерения глубин в полосе обзора. Полученные результаты подтверждают возможность применения комплекса для классификации морфологии морского дна и контроля процессов газовой разгрузки. Также эти данные дистанционного картирования дна могут быть использованы для интерпретации результатов спутникового дистанционного зондирования.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, газовая разгрузка, акустический профилограф, интерферометрический гидролокатор бокового обзора, покмарки, подводные вулканы

DOI: 10.31857/S0030157424040132, **EDN:** PQXVZT

ВВЕДЕНИЕ

Среди первоочередных мер по обеспечению национальных интересов Российской Федерации в Арктике и развитию арктической зоны РФ должны быть рассмотрены вопросы по созданию системы дистанционного мониторинга Арктической зоны, в первую очередь, методами и средствами космических активных и пассивных радиолокационных комплексов, дополненных средствами наблюдений и измерений наземного базирования.

Развитие на основе этих данных геоинформационных технологий обеспечит решение важных научных и прикладных задач: экологической безопасности в Арктике, классификации подстилающих покровов, выявления локальных и масштабных изменений, динамики естественных подстилающих покровов (ледовые покровы, береговая линия, грунты вечной мерзлоты) и инженерной инфраструктуры вследствие активной хозяйственной деятельности, обеспечения навигации во льдах, контроля экономической деятельности в прибрежных водах и др.

Для получения оперативной информации о состоянии подстилающей поверхности и явлениях, происходящих в атмосфере, широкими возможностями обладают спутниковые средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). При этом проблема интерпретации полученной информации и пригодность ее для практического использования отрабатывается с применением прямых измерений необходимых вычисляемых параметров в подспутниковых экспериментах [3, 8].

В последние годы большое внимание уделяется экологическим проблемам, связанным с выделением метана и других газов в атмосферу, при этом методы ДЗЗ позволяют оперативно обнаруживать в атмосфере места появления газовых сипов над участками акваторий морей. В работе [2] приведены данные о связи газовых сипов с источниками газовой разгрузки из водной среда и поверхности дна. Отмечено, что источниками газовой разгрузки могут быть подводные грязевые вулканы, газовые поля, с которыми связывают распространение покмарков. Экспериментальные данные об источниках газовой разгрузки, глубины и характерных размеров могут быть по-

лучены с помощью гидролокационных систем площадного картирования поверхности дна и донных отложений.

Гидролокационные технологии, позволяющие детектировать звукорассеивающие объекты при сканировании значительных объемов водной толщи в непрерывном режиме, обладают большим потенциалом для картирования очагов газовой разгрузки и получения количественных характеристик струйных газовых выделений [1, 5, 6].

В связи с возрастающими требованиями к контролю и обеспечению безопасности прокладки подводных трубопроводов, кабелей связи и других подводных сооружений в последние годы большое внимание уделяется разработке и внедрению в практику новых методов и средств диагностики морского дна. В ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН разработан и использовался в ряде инженерных обследований морских акваторий многоканальный цифровой гидролокационный комплекс, включающий интерферометрические гидролокаторы бокового обзора (ИГБО), промерный высокочастотный эхолот и низкочастотный профилограф с единым управляющим контроллером и программой регистрации, обеспечивающими синхронную регистрацию как сигнальных, так и навигационных данных. Комплекс отличается небольшими габаритами и весом и легко устанавливается на различные исследовательские суда. При проведении инженерных обследований с его использованием и обработки экспериментальных данных были определены участки дна

с характерными признаками возможной газовой разгрузки [7].

Учитывая, что нефтяные и газовые сипы сохраняются на поверхности моря только в течение нескольких часов, достаточно быстро подвергаясь процессам диффузии, поглощения и рассеяния, их дальнейшее исследование целесообразно проводить в режиме мониторинга с использованием комплекса дистанционных и наземных методов [2]. Поэтому данные ДЗЗ в совокупности с наземными (подводными) измерениями позволяют изучить особенности пространственно-батиметрического распределения газовых сипов и их приуроченность к разведанным углеводородным месторождениям, оценить потоки метана от отдельных струй и получить осредненные потоки газовой разгрузки участков морского дна.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ГИДРОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА УЧАСТКЕ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

Рассмотрим некоторые результаты гидролокационных исследований, проведенных с помощью ИГБО диапазона 70 кГц и эхолота профилографа диапазона 6 кГц. Район Мотовского и Кольского залива Баренцева моря, где проводилось гидролокационное обследование, показан на рис. 1. Средняя глубина 250 м. Цифрами 1 и 2 отмечены рассматриваемые далее участки обследованного

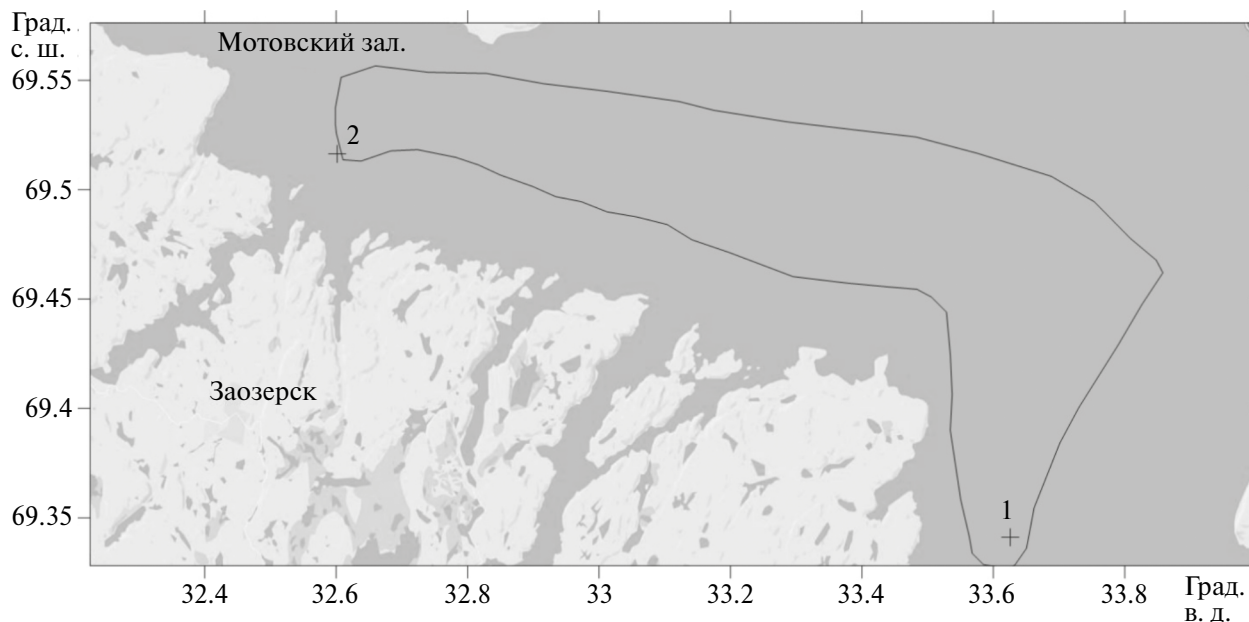


Рис. 1. Участок арктического шельфа, при гидролокационном зондировании которого экспериментально обнаружены объекты, связанные с разгрузкой газа (покмарки).

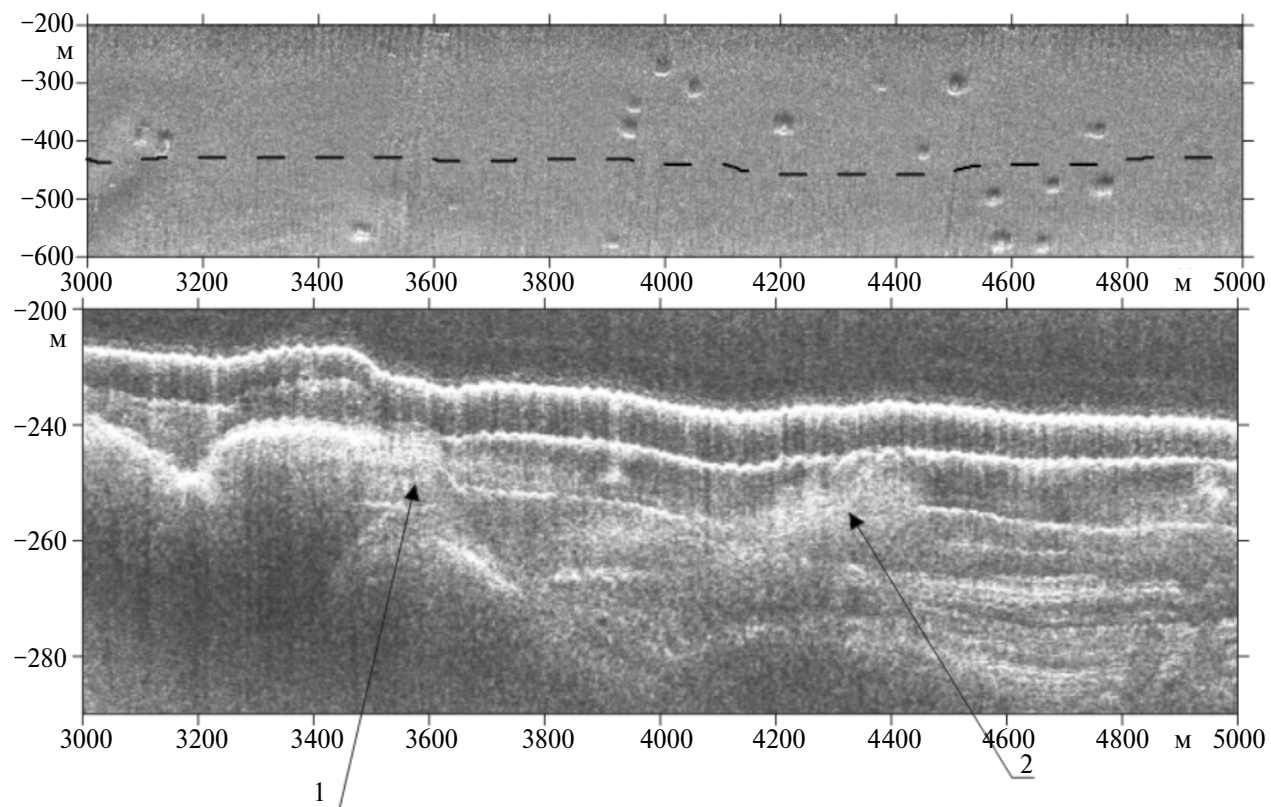


Рис. 2. Пример синхронного представления гидролокационного обследования участка 2.

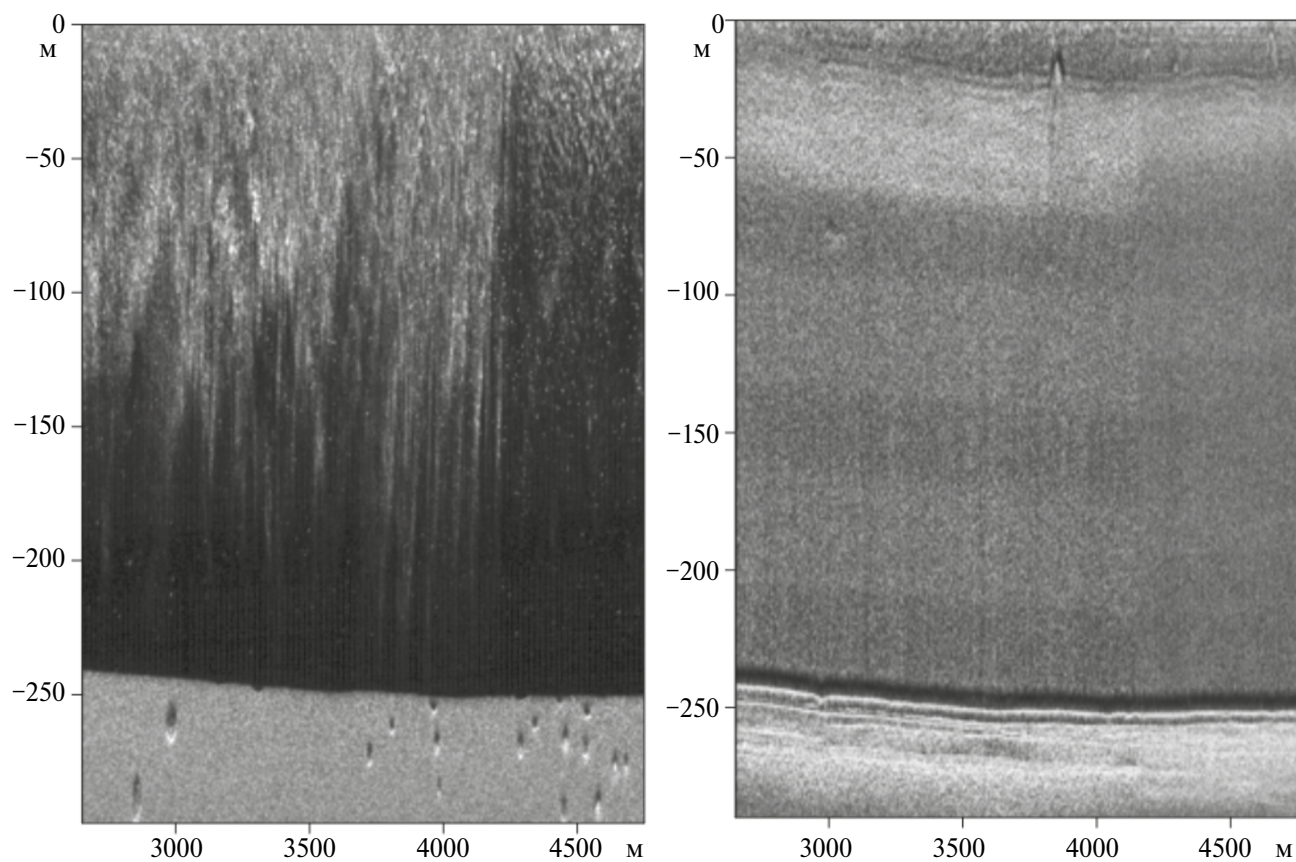


Рис. 3. Пример синхронного представления гидролокационной, батиметрической и геофизической съемки участка 1.

района, с характерными признаками разгрузки газа (покмарки). Измерения на участках 1 и 2 проводились с разницей в 4 года. При этом характерные признаки газовой разгрузки имеют долговременную стабильность. Черная линия ограничивает район гидролокационного обследования, где были обнаружены покмарки.

На рис. 2 приведены результаты промера на участке 2. В верхней части рисунка приведено гидролокационное изображение поверхности дна, на котором хорошо видны объекты типа покмарок — по акустическим теням это углубления в грунте, как правило, приуроченные к местам подводной разгрузки газообразных углеводородов. В нижней части рисунка приведено изображение разреза верхней 50-метровой толщи донных отложений, полученное с помощью акустического профилографа вдоль штриховой линии, отмеченной на гидролокационном изображении донной поверхности. Верхняя линия является границей воды и грунта и отражает изменение глубины вдоль разреза от 225 до 285 м. Донные отложения в данной области слоистые, представлены глинистым илом. При этом структура слоев частично экранируется газовыми скоплениями, отмеченными стрелками 1, 2. Особенно это заметно в области 2.

Приведенные результаты отражают возможности комплекса при проведении картирования дна и донных отложений. Структура водной толщи при этом частично или полностью отсекается. Однако при архивировании она сохраняется и может быть дополнительно исследована. Проанализируем результаты обработки архивных материалов для области 1 на рис. 1. На рис. 3 показаны результаты исследований водной тощи

ГБО на частоте 70 кГц и профилографа на частоте 6 кГц. Обработка проводилась программой профилирования, что позволяет сопоставить результаты для водной толщи в одном вертикальном масштабе. При этом профиль донных отложений сохраняет масштаб, а поверхность дна имеет геометрические искажения и приведена для иллюстрации наличия в этом районе покмарок. На рис. 3 хорошо видны следы газовой разгрузки, причем в диапазоне 6 кГц они видны в виде слоев (рисунок правая часть), а в диапазоне 70 кГц видна структура газовых факелов (рисунок левая часть).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА УЧАСТКЕ С ПРОЯВЛЕНИЯМИ ПОДВОДНОГО ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНИЗМА В АКВАТОРИИ ТАМАНСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Как отмечено в работе [2], газовая разгрузка в морях может быть также связана с подводным грязевым вулканизмом. В работах [4, 5] приведены результаты исследований в провинции грязевого вулканизма в акватории Таманского полуострова. Пример характерного проявления грязевого вулканизма на профилограмме донных отложений приведен на рис. 4. Область, помеченную цифрой 1, можно характеризовать сильным насыщением газов, а область 2 — это грязевой вулкан, образовавшийся в результате прорыва под давлением газов с большой глубины. Отметим, что приведенные результаты получены на малых глубинах, что не позволяет объективно оценить активность газовой разгрузки в водной толще.

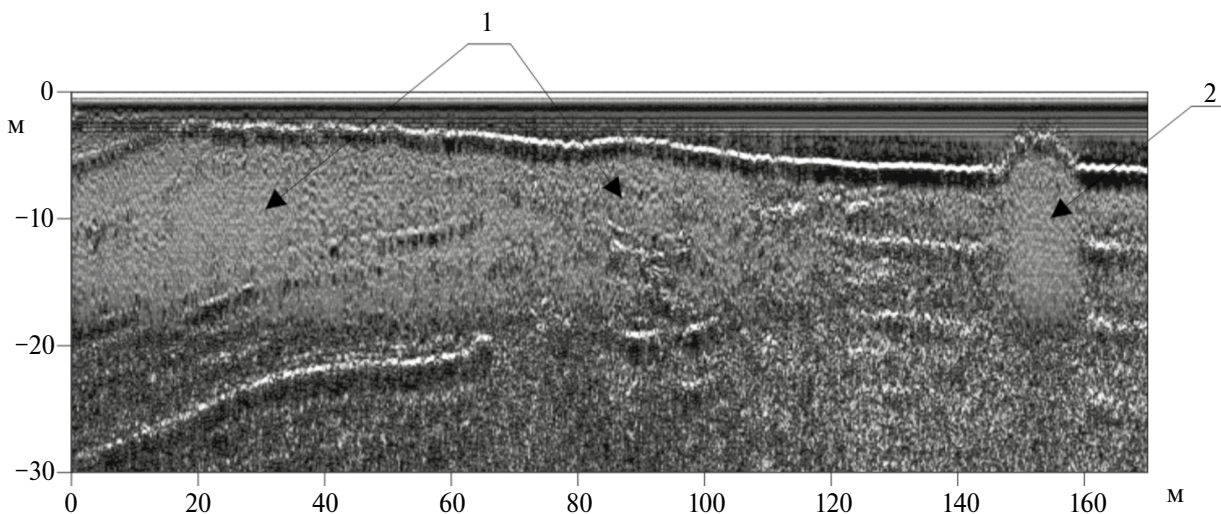


Рис. 4. Пример характерного проявления грязевого вулканизма на профилограмме донных отложений.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ,
ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ
РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ
НА УЧАСТКЕ С ВОЗМОЖНОЙ
РАЗГРУЗКОЙ ГАЗА
В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ**

При проведении гидрографических работ с помощью ИГБО диапазона 240 кГц и эхолота профилографа диапазона 6 кГц в районе Балтийского моря с координатами ($59^{\circ}16'$ с. ш., $21^{\circ}30'$ в. д.) было обнаружено наличие сильного акустического рассеяния в водной толще. На рис. 5 приведен характерный пример таких наблюдений, который

мог бы быть связан с активной газовой разгрузкой с морского дна. Глубина моря около 120 м, на верхней части рисунка приведено акустическое изображение дна, полученное с одного борта ИГБО, в средней части — профилограмма. В нижней части приведено акустическое профилирование водной толщи, полученное с помощью ИГБО. Граница водной толщи и дна видна как светлая линия на глубине 120 м. Как видно на акустическом изображении, водная толща заполнена акустическими отражателями, природа которых может быть различна. Отметим, что имеется мощный звукорассеивающий слой, экранирующий

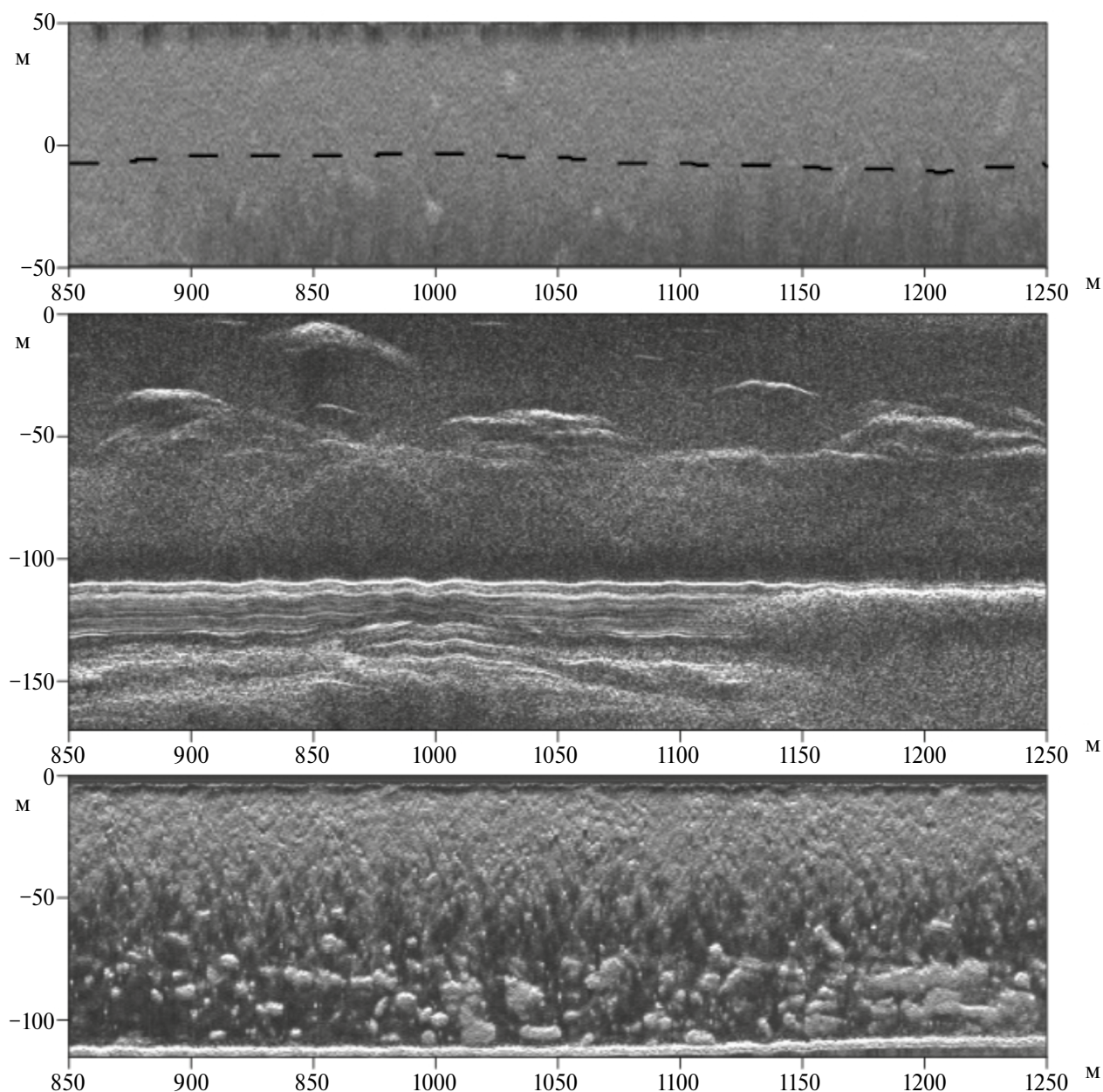


Рис. 5. Пример синхронного представления гидролокационного изображения и профилограммы в Балтийском море с координатами ($59^{\circ}16'$ с. ш., $21^{\circ}30'$ в. д.).

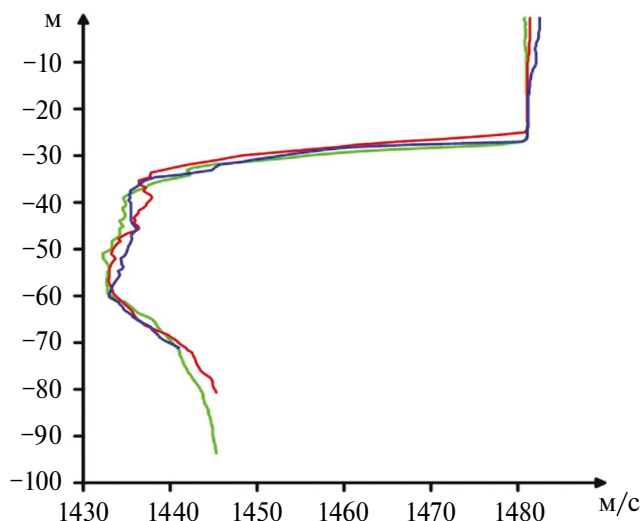


Рис. 6. Вертикальный профиль скорости звука, измеренный в районе съемки в Балтийском море.

сигналы ГБО при съемке морского дна (верхняя часть рис. 5). Сравнивая результаты профилирования воды на частотах 6 и 240 кГц, приведенных на средней и нижней частях рис. 5, можно предположить, что основной вклад в рассеяние звука вносят биологические объекты. Экспериментальные профили скорости звука в воде, полученные в районе съемки, приведены на рис. 6. Кроме того, по результатам профилирования на частоте 6 кГц на рис. 5 стрелками отмечена область насыщения донных осадков газами и разгрузки их в водную среду. С учетом расположения участка, газовая разгрузка может быть связана с наличием залежей горючих сланцев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные результаты измерений показывают, что разработанный многофункциональный инструментальный комплекс геофизической гидролокационной аппаратуры, работающий в диапазонах частот 6, 70 и 240 кГц, позволяет обнаруживать и классифицировать объекты с разгрузкой газа с морского дна. Необходимо обратить внимание, что приведенные данные о рассеянии звука в водной толще, полученные ИГБО и профилографом носят информативный характер, поскольку получены приборами с широкой характеристикой диаграммы направленности. Отмечено, что наряду с проявлениями газовой разгрузки в водной толще наблюдаются звукорассеивающие объекты и слои различной протяженности и мощности, связанные с биологическими объектами и геофизическими неоднородностями. С учетом возможностей гидролокационного комплекса на

различных частотах, обеспечивающего одновременные исследования морского дна, донных отложений и структуры водной толщи, можно говорить о целесообразности и эффективности его применения для уточнения источников возникновения газовых сипов при ДЗЗ.

Источники финансирования. Работа выполнена по государственному заданию ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-23-01.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьев Р.А., Дмитриевский Н.Н., Росляков А.Г. и др.* Использование комплексных акустических методов для мониторинга процессов эмиссии газов на шельфе Арктических морей // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 1. С. 151–157.
2. *Бондур В.Г., Кузнецова Т.В.* Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 4. С. 30–43.
3. *Захаров А.И., Захарова Л.Н., Красногорский М.Г.* Мониторинг оползневой активности методами радарной интерферометрии с помощью трехгранных угловых отражателей // *Исследование Земли из космоса*. 2018. № 3. С. 80–92.
4. *Каевецер В.И., Слоцов И.Б., Кривцов А.П. и др.* Подводные грязевые вулканы Таманского полуострова по данным гидролокационного исследования // *Вулканология и сейсмология*. 2016. № 4. С. 27–33.
5. *Каевецер В.И., Римский-Корсаков Н.А., Смольянинов И.В. и др.* Возможные проявления подводных грязевых вулканов по результатам гидролокационных исследований в акватории Таманского полуострова // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 5. С. 784–790.
6. *Каевецер В.И., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В.* Экспериментальные измерения следов газовой разгрузки участков морского дна в водной толще при применении многофункциональных гидролокационных комплексов // *Журнал радиоэлектроники: электронный журнал*. 2022. № 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.12>
7. *Каевецер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М. и др.* Разработка и результаты испытаний гидроакустического комплекса для исследования дна шельфовой зоны Арктических морей // *Журнал радиоэлектроники: электронный журнал*. 2016. № 11. <http://jre.cplire.ru/jre/nov16/1/text.pdf>
8. *Родионова Н.В.* Связь радарных данных Sentinel 1 с наземными измерениями температуры почвы // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 5. С. 65–78.

THE USE OF SONAR SYSTEMS TO DETECT AREAS OF GAS DISCHARGE OF THE SEABED

V. I. Kaevitser, V. M. Smirnov, I. V. Smolyaninov

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, г. Фрязино Московской обл., Россия*

** e-mail: ilia159@mail.ru*

Experimental results of geological and geomorphological observations in some marine areas with active gas emission from bottom sediments are presented and analyzed. The work was carried out using an instrumental complex of geophysical sonar equipment, which included a subbottom profiler and a side scan bathymetric sonar using an interferometric method for measuring depths in the field of view. The results obtained confirm the possibility of using the complex to classify the morphology of the seabed and control the processes of gas emission. The use of sonar equipment for remote mapping of the bottom under satellite observations can be used to interpret the results of satellite remote sensing of the atmosphere.

Keywords: remote sensing of the Earth, gas discharge, subbottom profiler, interferometric side-scan sonar, pokmark, underwater volcanoes