

СЕЙСМОАКУСТИКА ШЕЛЬФОВЫХ МОРЕЙ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ МОНИТОРИНГА

© 2024 г. А.Л. Собисевич^{а,*}, В.П. Дмитриченко^{б,**}

^аИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

^бАО «Концерн “Морское подводное оружие – Гидроприбор”», Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: sobisevich@yandex.ru

**E-mail: dmitrichenko-v@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.05.2024 г.

После доработки 10.06.2024 г.

Принята к публикации 04.07.2024 г.

В статье представлены результаты разработки научных основ технологии пассивного геогидроакустического мониторинга покрытых льдом акваторий, включая теоретические исследования условий формирования и распространения волновых полей, порождаемых навешенными геодинамическими процессами в слоистой структуре “литосфера – гидросфера – ледовый покров”. Рассмотрены задачи, касающиеся создания инновационных, экологически безопасных геофизических технологий оконтуривания локальных неоднородностей, а также конструирования опытных образцов, лабораторно-стендовых и натуральных испытаний рабочих макетов вмораживаемых геогидроакустических буёв нового поколения. Особое внимание уделяется научно-практическому заделу в области развития методов пассивного геогидроакустического мониторинга северных морей России в условиях ледовитости.

Ключевые слова: слоистая геофизическая среда, Арктическая зона РФ, арктический шельф, геогидроакустические поля, поверхностные волны, ледовый покров, изгибно-гравитационные волны, сейсмогидроакустические дрейфующие ледовые антенны, пассивные сейсмотомаграфические методы, мониторинг локальных неоднородностей, геоэкология.

DOI: 10.31857/S0869587324080045, EDN: FDERCE

Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, утверждённая Указом Президента РФ от 28 февраля 2024 г., определила приори-



СОБИСЕВИЧ Алексей Леонидович – член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией 703 ИФЗ РАН. ДМИТРИЧЕНКО Владимир Петрович – кандидат технических наук, начальник отделения АО «Концерн “МПО – Гидроприбор”».

теты дальнейшего укрепления позиций нашей страны в области экономического, научного и военного освоения суверенных арктических территорий, ресурсный потенциал которых позволяет отнести их к наиболее перспективным регионам по добыче нефти, природного газа и других полезных ископаемых [1–6]. Важно отметить, что применение классических методов промышленной сейсморазведки при освоении месторождений полезных ископаемых на континентальном шельфе Арктики может быть осложнено ледовыми условиями, а использование активных источников – необходимостью сохранить биоразнообразие и краснокнижных морских обитателей [7, 8]. В то же время гео- и гидроакустические волновые поля, порождаемые навешенными геодинамическими процессами в сложно построенной геофизической среде, несут полезную информацию, способствующую развитию новых методов пассивного сейсмоакустического мониторинга локальных неоднородностей и запасов углеводородов как на шельфе, так и в других, покрытых сплошным ледовым покровом районах Северного Ледовитого океана [9–12].

Российские учёные и специалисты всесторонне изучили различные сейсмоакустические приёмники, включая волоконно-оптические системы [13], и продемонстрировали их возможности для регистрации сейсмо- и гидроакустических волновых процессов на поверхности ледового покрова [13, 14]. Были предложены новые технические решения, которые позволяют организовать долговременные наблюдения на покрытых льдом акваториях путём создания вмораживаемых дрейфующих антенных систем для выделения сейсмических сигналов, несущих информацию о донных неоднородностях континентального шельфа [15–18]. Одновременно активизировались зарубежные исследователи, которые реализовали ряд комплексных проектов по изучению Арктики с привлечением научно-исследовательских судов различных классов. Под контролем международных научно-прикладных консорциумов были развёрнуты системы наблюдений на основе заякоренных измерителей, автономных подводных аппаратов и гидрофизических буёв, регулярно передающих данные наблюдений посредством спутниковой телеметрии [19].

К ответным действиям со стороны России логично отнести реализацию плана фундаментальных научных исследований и серию натурных экспериментов, проведённых совместными усилиями учёных Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), МГУ имени М.В. Ломоносова (Физфак), Центра молекулярной электроники Московского физико-технического института (МФТИ) и концерна “Морское подводное оружие – Гидроприбор” (“МПО – Гидроприбор”) на базе внештатной лаборатории последнего [20–23]. Полученные результаты подтвердили целесообразность разработки технических предложений с целью создания автономных модулей дрейфующей ледовой антенны [24], сочетающей гидроакустические и сейсмо-разведочные возможности экологически безопасной технологии поиска локальных неоднородностей [25].

Несмотря на известные преимущества пассивных технологий мониторинга (низкая стоимость, техническая простота, минимизация экологических проблем), способы их применения для решения ряда практически значимых задач всё ещё не получили исчерпывающего теоретического обоснования. По этой причине актуальны совершенствование научных основ существующих и разработка новых методов исследования слоистой структуры “морское дно – водный слой – ледовый покров” (с учётом главных положений “Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года”) в рамках комплексной задачи, связанной с необходимостью дальнейшего развития пассивных сейсмоакустических технологий и аппаратурных средств мониторинга акваторий в условиях ледовитости [18, 20].

Основы сейсмоакустической шумовой интерферометрии. Пассивные методы неразрушающей ди-

агностики, получившие в иностранной литературе название “шумовая интерферометрия” [26, 27], опираются на возможности оценки характеристик функции Грина из анализа функции взаимной корреляции шумовых полей в исследуемой области. Одно из основных ограничений – время накопления данных, требуемых для получения достоверных оценок искомым характеристикам среды. Именно поэтому широкое применение находят пассивные сейсмотомографические методы, так как упругие свойства слоистой геологической среды практически не изменяются в течение периода накопления шумов в ходе эксперимента, который может длиться месяцы и даже годы [28, 29].

В задачах пассивной сейсмоакустической томографии также используются техники оценки времени распространения волнового возмущения между приёмниками путём анализа регистрируемых ими шумовых сигналов. Рассмотрим замкнутую колебательную систему, которая испытывает воздействие случайных источников шума. Производную по времени флуктуаций давления можно представить в виде суммы собственных мод $u_n(\mathbf{r})$ этой системы [29, 30]:

$$\dot{p}(\mathbf{r}, t) = \sum_n (a_n \sin \omega_n t + b_n \cos \omega_n t) u_n(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где a_n и b_n – случайные числа с нулевым средним. При этом предполагается, что источники шумов некоррелированы ($a_n b_m = 0$), скобки означают усреднение по множеству реализаций шума, а моды возбуждаются с одинаковой энергией $D: a_n a_m = b_n b_m = D \delta_{nm}$, где δ_{nm} – символ Кронекера. Функция Грина волнового поля для разнесённых в пространстве точек приёма \mathbf{r}_A и \mathbf{r}_B в модовом представлении записывается в виде:

$$G(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, t) = \sum_n u_n(\mathbf{r}_A) u_n(\mathbf{r}_B) \cos \omega_n t \cdot H(t), \quad (2)$$

где $H(t)$ – ступенчатая функция Хевисайда, равная 0 при $t < 0$ и 1 при $t \geq 0$; ω_n – циклическая частота моды с номером n . Рассмотрим усреднённую по времени наблюдения функцию взаимной корреляции шумовых полей:

$$K(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{p}(\mathbf{r}_A, t + \tau) \dot{p}(\mathbf{r}_B, t) dt, \quad (3)$$

где T определяет временной интервал интегрирования, по которому производится усреднение, а τ – временная задержка функции взаимной корреляции. Подставляя в уравнение (3) модовое разложение (1), можно получить:

$$\begin{aligned} K(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \tau) &= \sum_n D u_n(\mathbf{r}_A) u_n(\mathbf{r}_B) \frac{1}{T} \times \\ &\times \int_0^T \left[\cos[\omega_n(t + \tau)] \cos \omega_n t + \right. \\ &\left. + \sin[\omega_n(t + \tau)] \sin \omega_n t \right] dt = \\ &= \sum_n D u_n(\mathbf{r}_A) u_n(\mathbf{r}_B) \cos \omega_n \tau. \end{aligned} \quad (4)$$

Сопоставляя выражения (2) и (4), получим взаимосвязь между функцией взаимной корреляции $K(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \tau)$ шумовых полей, зарегистрированных в пространственно разнесённых точках с координатами \mathbf{r}_A и \mathbf{r}_B , и запаздывающей $G(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, -\tau)$ и опережающей $G(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \tau)$ функциями Грина волнового уравнения для выбранной пары точек:

$$K(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \tau) = D[G(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \tau) + G(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, -\tau)], \quad (5)$$

при этом D – коэффициент, зависящий от поглощающих свойств волновода и характеристик источников [11].

По-видимому, впервые соотношения, аналогичные (5), были получены в квантовой теории поля [31, с. 97] для связи двухточечной корреляционной функции, усреднённой по основному состоянию поля (вакуумное среднее), и функции Грина этого поля, что и было затем “переоткрыто” в акустике [32].

Строго математически корреляционная функция шумов не позволяет определить ни абсолютное значение амплитуды функции Грина, ни её фазу, и несёт информацию лишь о мнимой части функции Грина с амплитудным коэффициентом, который является неизвестным во многих практических ситуациях. Несмотря на это, соотношение (5) широко используется для решения обратных задач. Дело в том, что в большинстве работ, посвящённых пассивной томографии параметров среды, в качестве исходных данных для решения обратной задачи рассматриваются времена распространения сигналов между точками регистрации шума, которые оцениваются

на основе частотно-временного анализа корреляционной функции шумов (или её производной). При этом оценки абсолютных значений амплитуды или фазы функции Грина не используются.

Проиллюстрируем типичный вид взаимокорреляционной функции на основе выполненного двумерного численного моделирования случайного шумового поля, принимаемого двумя разнесёнными на плоскости приёмниками. Среда распространения считалась однородной, со скоростью продольных волн $c_0 = 5$ км/с. На рисунке 1, *a* представлена одна из реализаций случайного распределения 1024 источников сигнала, расстояние между приёмниками составляло 4 км. Каждый источник излучал импульсный сигнал в виде модулированного гауссоидой синуса и действовал в отдельные интервалы времени. Регистрируемые на двух приёмниках сигналы с добавлением некоррелированной помехи использовались для расчёта взаимокорреляционной функции, которая в результате усреднялась по всем источникам. Результаты численного эксперимента показали (рис. 1, *б*), что функция имеет два максимума, симметричных относительно нулевой временной задержки. Положения максимумов соответствуют времени распространения волнового возмущения вдоль прямой, соединяющей приёмники (см. рис. 1, *a*). Это означает, что основной вклад в формирование информативных пиков итоговой усреднённой взаимокорреляционной функции вносят источники, расположенные вблизи этой прямой, поля же других источников формируют помеху.

Определённые ограничения на рассматриваемый подход накладывает неравномерное распределение

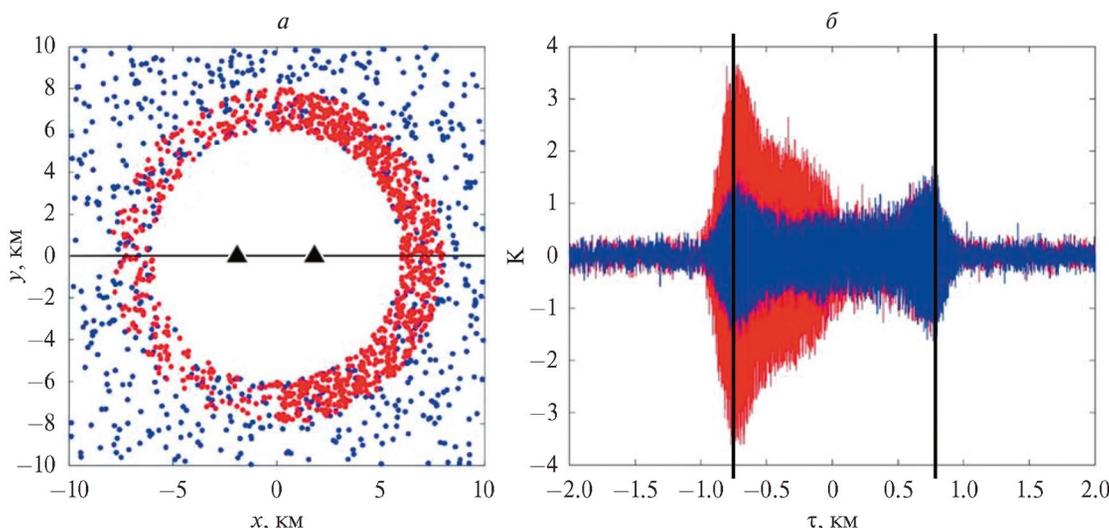


Рис. 1. Результаты численного моделирования случайного шумового поля, принимаемого двумя разнесёнными на плоскости приёмниками

a – пространственное распределение случайных шумовых источников (точки) относительно приёмников (треугольники); *б* – взаимокорреляционные функции двух разнесённых в пространстве приёмников, которые получены с учётом вклада различных групп источников, отмеченных соответствующим цветом; вертикальные чёрные линии соответствуют истинным временам распространения сигналов между приёмниками [18]

источников шума относительно пары приёмников в условиях реального эксперимента, что зачастую приводит к несимметричному виду корреляционной функции (см. рис. 1, б): один из её максимумов становится более слабым и может быть неразличим на фоне помехи. Для получения близкого к изотропному распределению шумовых источников важно и обоснование необходимого времени накопления шумового сигнала. В зависимости от расстояния между точками приёма, пространственной анизотропии шумового поля, а также технических характеристик приёмной системы время накопления может превышать несколько дней и даже недель, что делает невозможным применение пассивных методов для мониторинга быстро протекающих процессов в океане. При этом для оценки отдельных параметров волновода, например, приповерхностных характеристик дна, допускается использование шумовой интерферометрии, даже на фоне быстро меняющихся гидрологических условий [18].

В пассивном мониторинге важную роль играет возможность выделения из регистрируемого шумового поля отдельных мод с последующей их корреляционной обработкой [33]. Основное преимущество модовой корреляционной обработки по сравнению с корреляцией полных полей заключается в сокращении времени накопления шумов, которое требуется для достоверной оценки дисперсионных зависимостей отдельных мод. Дальнейшее сокращение времени накопления шумов связано с применением комбинированных приёмников, регистрирующих в одной точке пространства как скалярные, так и векторные характеристики геоакустических полей [33–35]. Работая в паре, такие приёмники позволяют выделить из всех шумов, приходящих с различных направлений, лишь те, которые распространяются преимущественно вдоль линии, соединяющей точки регистрации (см. рис. 1, а). Возможность совместного восстановления гидрологии, профиля течений и приповерхностных характеристик дна единой пассивной томографической схемой [11, 33] определяется тем, что дисперсионные зависимости мод различных номеров в достаточно широкой полосе частот по-разному искажаются при возмущениях искомым параметров. При этом для инверсии исходных данных используется линейное приближение, а уточнение получаемых оценок волновода происходит итерационно.

Следует отметить, что применяемые на практике алгоритмы решения задач акустической томографии в подавляющем большинстве являются приближёнными. Это накладывает ограничения на контроль состояния водного слоя, например, при взаимодействии между гидроакустическими модами. Кроме того, внутренние волны, влияние рельефа дна и ледового покрова в условиях арктического шельфа, наличие температурных контрастов в Северном Ледовитом океане требуют учёта неадиабатического характера распространения модовых сигналов [18].

Пассивные методы диагностики слоистых геофизических сред. Главное преимущество использования шумовой интерферометрии в сейсмологии заключается в существенно большей стабильности геологической среды по сравнению с гидросферой. Однако физическая основа у пассивных гидро- и сейсмоакустических методов одна и та же — возможность оценки характеристик функции Грина из шумовых корреляций. В океане этот подход позволяет оценить времена распространения гидроакустических мод (сравнительно высокие частоты), а в сейсмоакустических приложениях — характеристики поверхностных волн рэлеевского типа (низкие и сверхнизкие частоты).

Исходя из анализа сигналов от локализованных источников (местные землетрясения) и накопления случайного шумового фона, развиваемые в настоящее время пассивные сейсмоакустические методы можно разделить на две группы. К первой относятся локальная томография по временам прихода продольных и поперечных волн [36] и эмиссионная томография, базирующаяся на присутствии доминантных частот [37]. Методы второй группы работают с естественным микросейсмическим шумом, сформированным в основном поверхностными волнами рэлеевского типа. При этом для зондирования среды используется зависимость глубины проникновения волны от её длины. Таким образом, максимально возможная глубина исследования определяется не мощностью источника, а частотным составом регистрируемых микросейсм. Отдельно следует упомянуть метод низкочастотного микросейсмического зондирования [38, 39], суть которого заключается в определении пространственных вариаций амплитудного спектра естественных шумов. Метод достаточно прост в реализации и успешно применяется для изучения субвертикальных геологических неоднородностей земной коры.

Методы томографии и анализа микросейсмического шума объединяются в так называемом методе пассивной поверхностно-волновой томографии [40], который подразумевает анализ частотной зависимости скоростей, то есть дисперсионных кривых поверхностных волн, в различных пространственных областях. Данный метод наиболее обоснован с математической точки зрения и в настоящее время становится всё более популярным при изучении глубинного строения коры и верхней мантии нашей планеты.

Важное преимущество пассивной поверхностно-волновой томографии — упрощение решения обратной задачи, так как при использовании поверхностных волн, распространяющихся вдоль плоской границы, трёхмерная обратная задача решается на набор двумерных [41]. На первом этапе решается томографическая задача восстановления пространственного распределения скоростей поверхностных волн в горизонтальной плоскости для

различных частотных диапазонов (восстановление дисперсии поверхностных волн), затем для каждой точки в горизонтальной плоскости осуществляется обращение дисперсионных кривых для определения слоистой модели по глубине [42].

Накопленный в ИФЗ РАН опыт исследования разномасштабных разломно-блоковых структур земной коры, возможности применения методов пассивной сейсмотомографии с использованием донных сейсмостанций, а также упругих волн в ледяных пластинах [43] позволили в рамках единого подхода перейти к теоретическому и экспериментальному изучению волновых структур, распространяющихся в системе “литосфера – гидросфера – ледовый покров”. Важнейший этап создания экологически безопасных технологий пассивного сейсмогидроакустического мониторинга арктического шельфа – решение вопросов аппаратного обеспечения для одновременной регистрации различных типов волновых возмущений.

Вмораживаемый автономный геогидроакустический буй. Геогидроакустический ледовый буй (рис. 2) представляет собой модульную информационно-измерительную платформу в прочном водонепроницаемом корпусе, способном выдерживать давление до 30 атм., штатно комплектуемую сейсмо- и гидроакустическими приёмниками совместимых конструкций, а также многоканальным цифровым регистратором с интерфейсами удалённого управления и достаточным запасом автономности [24]. В зависимости от поставленных задач прибор допускает как самостоятельное, так и групповое применение при проведении геоакустических измерений на суше и в море, в том числе в составе многокомпонентных дрейфующих антенн ледового класса.

В качестве первичного преобразователя (1) штатно устанавливается однокомпонентный молекулярно-электронный велосиметр СМЕ-4211V, разработанный Центром молекулярной электроники МФТИ [44–47]. Источник питания (2) с номинальным напряжением 9–12.6 В состоит из набора стандартных литий-ионных элементов общей ёмкостью при комнатной температуре около 7000 мАч, а также платы согласования с регистратором серии NDAS-8224 (3), обладающим малым (менее 300 мВт) энергопотреблением при оцифровке сигналов с частотой 1, 10, 50, 100, 250, 500 и 1000 Гц. Блок интерфейсов для управления регистратором, дистанционной калибровки сейсмоприёмников и доступа к данным предполагает проводное (USB) и беспроводное (Wi-Fi) подключение, а общий объём внутренней памяти достигает 32 Гб. В этот блок также интегрирован приёмник GPS, обеспечивающий не только постоянную географическую привязку модуля, но и работу службы точного времени с возможностью включения записи по расписанию.

Лабораторно-стендовые испытания макетов подтвердили жизнеспособность предусмотренных конструкторских решений в построении основных составных частей вмораживаемых модулей и требуемых характеристик. Благодаря результатам научно-исследовательской работы на базе внештатной лаборатории концерна “МПО – Гидроприбор” и при участии Центра молекулярной электроники МФТИ была создана экспериментальная партия сейсмоакустических станций ледового класса, реализующих концепцию автономного режима работы. Сравнительные испытания рабочих макетов геогидроакустических буйев, проведённые на измерительных постах обсерватории Единой геофизической службы РАН, показали (см. рис. 2, б),

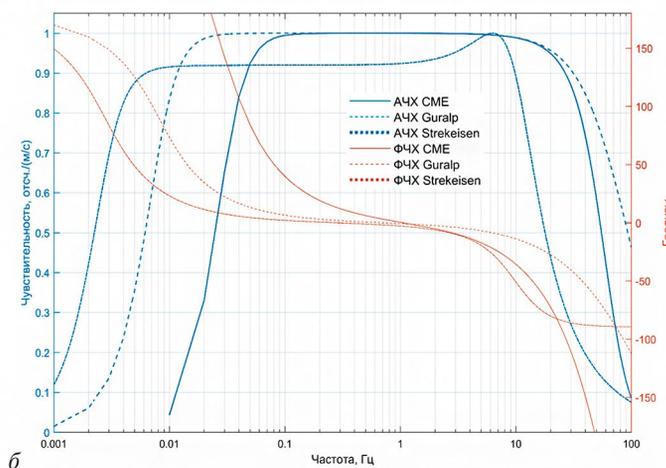
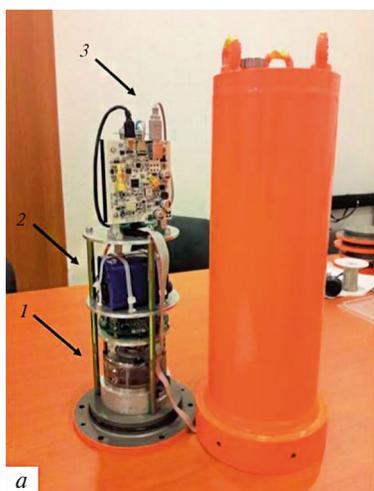


Рис. 2. Макет вмораживаемого геогидроакустического информационно-измерительного буя (а) и амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики молекулярно-электронных сейсмоприёмников (СМЕ-4211V) и эталонных маятниковых сейсмоприёмников Guralp (СМГ-3ESP) и Streckeisen (STS-1V/VBB) (б)
1 – первичный преобразователь; 2 – элементы питания; 3 – цифровой регистратор и блок электроники

что основные параметры отечественного прибора в рабочем диапазоне частот не уступают современным сейсмостанциям мирового уровня [24].

Следующий этап исследований возможностей и ограничений применения методов сейсмогидроакустического мониторинга волновых процессов в волноводах арктического типа – их теоретическое обоснование, а в тех случаях, когда строгого аналитического решения получить не удаётся, – проведение прямого численного моделирования.

Мониторинг арктического волновода в пассивном режиме. Теоретические основы описания волновых процессов в слоистой среде “литосфера – гидросфера – ледовый покров” изложены в работе [39] и базируются на общей теории распространения акустических волн в слоистых средах [44] в условиях мелкого моря [45]. Показано, что для модели покрытого льдом водоёма (изотропное твёрдое полупространство – слой однородной сжимаемой жидкости – изотропный упругий слой льда) удаётся получить аналитическое представление дисперсионного уравнения, описывающего распространение различных модовых составляющих полного сейсмогидроакустического поля [46]. Отметим наиболее информативные компоненты (полученные из уравнения определения компонент полного волнового поля) с точки зрения мониторинга среды в арктическом волноводе с помощью вмороженных в лёд сейсмоакустических приёмников (рис. 3, а):

- гидроакустические моды;
- фундаментальная мода – волна рэлеевского типа, распространяющаяся вдоль границы упругого слоистого полупространства и существующая на всех частотах; именно она рассматривается в качестве основного источника геоакустической информации о глубинном строении океанического дна (в отсутствие ледового покрова фундаментальной

моды соответствует волна Шолте, иногда называемая волной Стоунли, – донная поверхностная волна, не имеющая критической частоты и распространяющаяся вдоль границы “жидкий слой – упругое полупространство”);

- изгибная мода, фазовая скорость которой зависит от толщины льда.

Основным источником информации о донных структурах шельфа служит дисперсия скорости фундаментальной моды поверхностной волны, распространяющейся вдоль границы упругого полупространства со скоростью 1.5–4 км/с, которая определяется физическими свойствами донных слоёв. Поскольку глубина проникновения зондирующей волны в донные слои составляет около половины её длины, при решении ряда прикладных задач поиска полезных ископаемых наиболее привлекательным представляется частотный диапазон 0.1–1.7 Гц.

На арктическом шельфе помимо шумов океана необходимо учитывать и наведённые волновые процессы в слое льда. Существенный вклад в волновое поле, регистрируемое вмороженным сейсмоприёмником, вносят изгибно-гравитационные волны, скорость которых определяется решением дисперсионного уравнения [43]:

$$\left(\frac{\omega}{v}\right)^4 - \frac{\omega^2 \rho}{h^2 D} + \frac{\rho_0}{h^3 D} \left(g - \frac{i\omega v c_0}{\sqrt{v^2 - c_0^2}} \right) = 0, \quad (6)$$

где ω – частота; v – фазовая скорость; c_0 – скорость звука в воде; h – толщина ледового покрова; ρ, ρ_0 – плотность льда и воды соответственно; $D = E/[12(1-\nu^2)]$; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона ледяного покрова; g – ускорение свободного падения. На рисунке 3, б приведён пример чис-

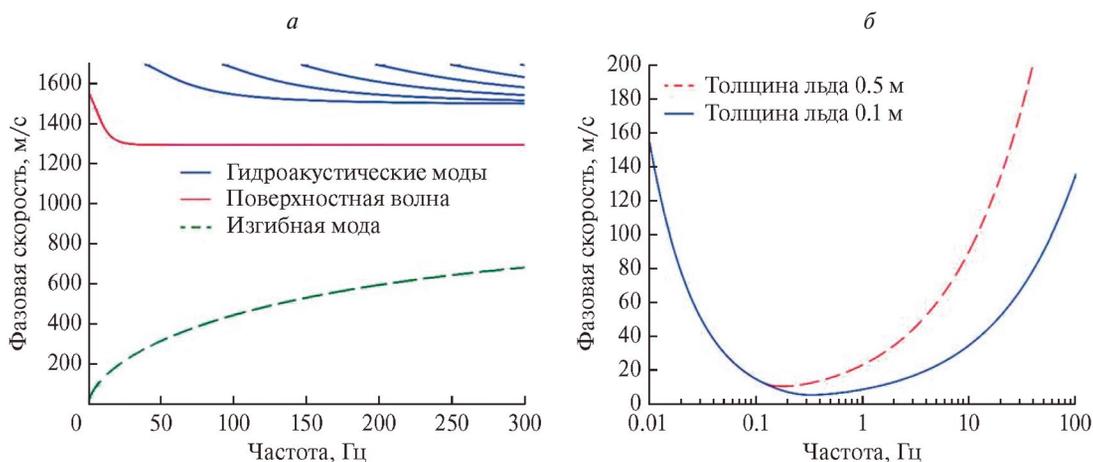


Рис. 3. Дисперсионные зависимости основных мод сейсмогидроакустического поля при глубине водоёма 30 м и толщине льда 1 м (а) и дисперсионные кривые изгибно-гравитационных волн для различных значений толщины льда (б) [18]

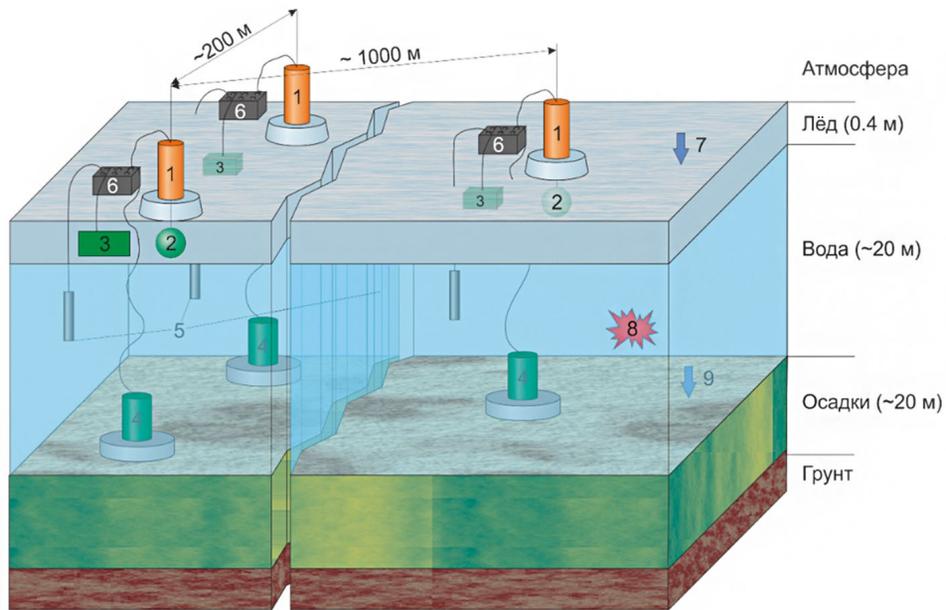


Рис. 4. Схема проведения экспериментов в ледовых условиях

1 – макет геоакустического буя; 2 – векторный пьезокерамический приёмник; 3 – маятниковый сейсмометр СМЗ-ОС; 4 – донный молекулярно-электронный сейсмоприёмник; 5 – гидрофон; 6 – цифровой регистратор; 7, 9 – импульсные воздействия на поверхности льда и на дне; 8 – импульсный источник в толще воды

ленного решения этого уравнения при характерных для арктического региона параметрах сред. Видно, что скорость изгибно-гравитационной волны на частотах выше 0.1 Гц обусловлена толщиной ледового покрова. При этом её скорость на порядок ниже скорости фундаментальной моды поверхностной волны в диапазоне частот, представляющем интерес для глубинного зондирования дна.

Спектрально-корреляционный анализ вертикальной компоненты колебательной скорости сейсмоакустического шума, регистрируемой в замороженных приёмниками в двух удалённых точках, теоретически даёт оценку дисперсии групповой скорости изгибно-гравитационной моды ледового покрова, что позволяет восстановить средние значения параметров льда (толщина h , плотность ρ ,

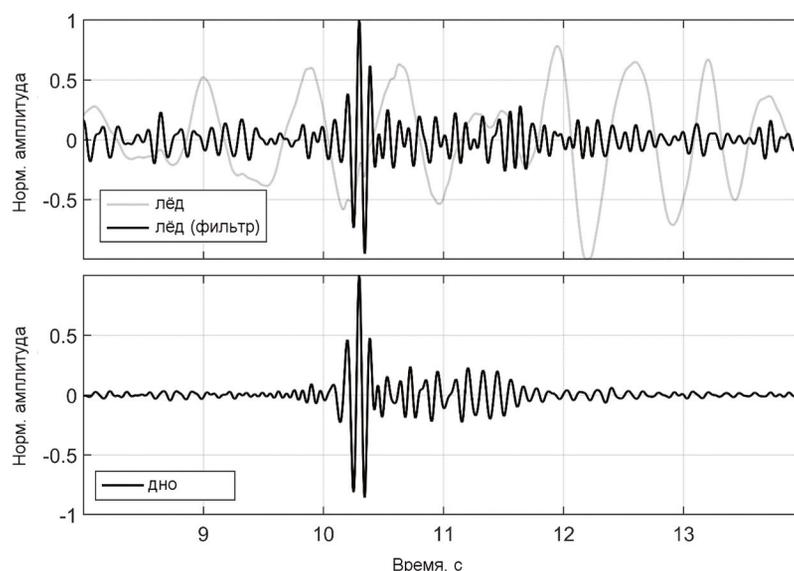


Рис. 5. Пример синхронной записи сигнала от импульсного источника сейсмометрами на дне (внизу) и на поверхности льда (вверху)

модуль Юнга E и коэффициент Пуассона μ) между точками наблюдения [21].

Естественным продолжением наших работ стали натурные эксперименты на льду Ладожского озера [21, 46], результаты которых подтвердили возможность томографической реконструкции параметров слоистой геофизической среды “упругое полупространство – водный слой – ледовый покров” по данным о модовой структуре регистрируемого сейсмогидроакустического поля. Несмотря на высокий уровень естественных шумов, в экспериментах на Ладожском озере (рис. 4) и на Байкале была продемонстрирована возможность выбора частотного диапазона для оценки параметров фундаментальной моды поверхностной волны по измерениям на льду (рис. 5). Таким образом, в условиях мелкого, покрытого льдом моря донные микросейсмические сигналы могут использоваться в качестве зондирующих сигналов для пассивного мониторинга арктического волновода [18, 23, 24]. Сформированный научный задел [38–40] может стимулировать развитие инновационных подходов при совершенствовании технологий разведки месторождений углеводородного сырья на основе данных аппаратных комплексов, осуществляющих мониторинг по шумам неоднородностей морского дна.

* * *

В настоящее время в области разработки геоакустических технологий для фундаментальных и прикладных исследований в Арктике основное внимание уделяется вопросам развития автономных систем наблюдений (в том числе роботизированных), способных осуществлять долговременный мониторинг заданных районов. Полученные данные могут использоваться при построении прогностических моделей, например, для наложения априорных ограничений на результаты численных экспериментов. Обзор достижений отечественных и зарубежных научных коллективов свидетельствует в пользу создания новой, экологически безопасной технологии мониторинга Северного Ледовитого океана. Она включает разведку и доразведку месторождений полезных ископаемых на арктическом шельфе и предполагает накопление и анализ естественных микросейсмических шумов.

Результаты фундаментальных научных исследований взаимосвязанных волновых процессов в системе “литосфера – гидросфера – ледовый покров”, а также лабораторных и натурных экспериментов, выполненных сотрудниками внештатной лаборатории концерна “МПО – Гидроприбор”, были положены в основу концепции отечественной технологии пассивной сейсморазведки на арктическом шельфе. Дальнейшая формулировка технических предложений по структуре, составу и конструктивной компоновке вмораживаемых и донных сейсмостанций позволила перейти к созданию семейства

автономных геоакустических буёв на базе модульной информационно-измерительной платформы. В ходе лабораторно-стендовых, полунатурных и натурных испытаний установлено, что технические возможности рабочих макетов по ключевым показателям не уступают зарубежным аналогам.

Перспективы развития технологий комплексного мониторинга северных акваторий, по всей видимости, связаны с созданием единой системы наблюдений, главными элементами которой станут вмораживаемые дрейфующие антенны ледового класса и автономные подводные аппараты, объединённые акустическими и иными каналами связи в общее информационное пространство [18]. Таким образом, основой повышения эффективности дальнейших исследований в рамках рассмотренного научного направления призваны стать новые научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки в области теоретического и экспериментального изучения всей совокупности сейсмогидроакустических волновых процессов в Арктике. Это обеспечит российское научное присутствие в стратегически важном регионе планеты, будет способствовать подъёму отечественного приборостроения в интересах освоения месторождений полезных ископаемых на континентальном шельфе и развития Северного морского пути.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лавёров Н.П., Рослов Ю.В., Лобковский Л.И. и др. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4 (4). С. 4–13.
Laverov N.P., Roslov Y.V., Lobkovsky et al. Prospects of Sea-Floor Seismography in the Russian Federation // The Arctic: ecology and economy. 2011, no. 4, pp. 4–13.
2. Дынкин А.А. Международное сотрудничество в Арктике: риски и возможности // Вестник РАН. 2015. № 5–6. С. 404–412.
Dynkin A.A. International Cooperation in the Arctic: Risks and Opportunities // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2015, no. 3, pp. 198–205.
3. Лавёров Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В. и др. Геодинамическая модель развития Арктического бассейна и примыкающих территорий для мезозоя и кайнозоя и внешняя граница континентального шельфа России // Геотектоника. 2013. № 1. С. 3–35.
Laverov N.P., Lobkovsky L.I., Kononov M.V. et al. A Geodynamic Model of the Evolution of the Arctic Basin and Adjacent Territories in the Mesozoic and Cenozoic and the Outer Limit of the Russian Continental Shelf // Geotectonics. 2013, no. 1, pp. 1–30.
4. Артюшков Е.В., Чехович П.А. Хребет Ломоносова и Восточно-Арктический шельф – части единой

- литосферной плиты. Опыт сравнительного анализа строения сдвиговых зон // Доклады Академии наук. 2017. № 2. С. 196–200.
- Artyushkov E.V., Chekhovich P.A.* Lomonosov ridge and the Eastern Arctic Shelf as elements of an integrated lithospheric plate: Comparative analysis of wrench faults // *Doklady Earth Sciences*. 2017, no. 1, pp. 485–489.
5. *Лавёров Н.П., Богоявленский В.И., Богоявленский И.В.* Фундаментальные аспекты рационального освоения ресурсов нефти и газа Арктики и шельфа России: стратегия, перспективы и проблемы // Арктика: экология и экономика. 2016. № 2. С. 4–13.
- Laverov N.P., Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V.* Fundamental aspects of the rational development of oil and gas resources of the Arctic and Russian shelf: strategy, prospects and challenges // *The Arctic: ecology and economy*. 2016, no. 2, pp. 4–13.
6. *Конторович А.Э.* Пути освоения ресурсов нефти и газа российского сектора Арктики // Вестник РАН. 2015. № 5–6. С. 420–431.
- Kontorovich A.E.* Ways of Developing Oil and Gas Resources in the Russian Sector of the Arctic // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2015, no. 3, pp. 213–222.
7. Морская сейсморазведка / Под ред. А.Н. Телегина. М.: Геоинформмарк, 2004.
- Marine seismic exploration / Ed. by A.N. Telegin, Moscow: Geoinformmark, 2004. (In Russ.)*
8. *Литвак А.Г.* Акустика глубоководной части Северного Ледовитого океана и Арктического шельфа России // Вестник РАН. 2015. № 5–6. С. 449–463.
- Litvak A.G.* Acoustics of the Deepwater Part of the Arctic Ocean and of Russia's Arctic Shelf // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2015, no. 3, pp. 239–250.
9. *Mordret A., Landès M., Shapiro N.M. et al.* Ambient noise surface wave tomography to determine the shallow shear velocity structure at Valhall: depth inversion with a Neighbourhood Algorithm // *Geophys. J. Int.* 2014, vol. 198, pp. 1514–1525.
10. *Яновская Т.Б., Лыскова Е.Л., Королёва Т.Ю.* Радиальная анизотропия верхней мантии Европы по данным поверхностных волн // Физика Земли. 2019. № 2. С. 3–14.
- Yanovskaya T.B., Lyskova E.L., Koroleva T.Yu.* Radial Anisotropy in the European Upper Mantle from Surface Waves // *Physics of the Earth*. 2019, no. 2, pp. 3–14.
11. *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* Использование в пассивной томографии океана низкочастотных шумов // Акустический журнал. 2008. № 1. С. 51–61.
- Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S.* The use of low-frequency noise in passive tomography of the ocean // *Acoustical Physics*. 2008, no. 1, pp. 42–51.
12. *Godin O.A., Zabotin N.A., Goncharov V.V.* Ocean tomography with acoustic daylight // *Geophys. Res. Lett.* 2010, vol. 37, L13605.
13. *Кульчин Ю.Н., Каменев О.Т., Петров Ю.С. и др.* Разработка физических основ низкочастотной акустической томографии на арктическом шельфе волоконно-оптическими сейсмоприёмниками // Известия РАН. Серия физическая. 2018. № 5. С. 556–559.
- Kulchin Y.N., Kamenev O.T., Petrov Y.S. et al.* Developing Physical Bases for Low-Frequency Acoustic Tomography in the Arctic Shelf Using Fiberoptic Geophones // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018, no. 5, pp. 487–490.
14. *Johansen T.A., Ruud B.O., Tømmerbakke R., Jensen K.* Seismic on floating ice: data acquisition versus flexural wave noise // *Geophysical Prospecting*. 2019, vol. 67, pp. 532–549.
15. *Serripietri A., Moreau L., Boue P. et al.* Recovering and monitoring the thickness, density, and elastic properties of sea ice from seismic noise recorded in Svalbard // *The Cryosphere*. 2022, vol. 16, pp. 2527–2543.
16. *Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С.* О локализации геологических особенностей арктического шельфа на основе анализа модовой структуры сейсмоакустических полей // Доклады Академии наук. 2018. № 1. С. 80–83.
- Sobisevich A.L., Presnov D.A., Sobisevich L.E., Shurup A.S.* Localization of Geological Inhomogeneities on the Arctic Shelf by Analysis of the Seismoacoustic Wave Field Mode Structure // *Doklady Earth Sciences*. 2018, vol. 479 (1), pp. 355–357.
17. *Krylov A.A., Novikov M.A., Kovachev S.A. et al.* Features of Seismological Observations in the Arctic Seas // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, vol. 11, 2221.
18. *Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Шуруп А.С.* Фундаментальные основы совершенствования пассивных сейсмогидроакустических методов исследования шельфа Арктики // Акустический журнал. 2021. № 1. С. 72–97.
- Sobisevich A.L., Presnov D.A., Shurup A.S.* Fundamentals of Passive Seismohydroacoustic Methods for Arctic Shelf Investigation // *Acoustical Physics*. 2021, no. 1, pp. 62–82.
19. *Mikhalevsky P.N., Sagen H., Worcester P.F. et al.* Multipurpose acoustic networks in the integrated Arctic Ocean observing system // *Arctic*. 2015, vol. 68, pp. 11–27.
20. *Дмитриченко В.П.* Гидроакустические антенны подводных аппаратов. СПб.: АО «Концерн “МПО – Гидроприбор”», 2024.
- Dmitrichenko V.P.* Hydroacoustic antennas of underwater vehicles. St. Petersburg: JSC «Concern “MPO – Gidropribor”», 2024. (In Russ.)
21. *Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С.* Определение параметров ледового покрова с помощью

- сейсмоакустического шума // *Акустический журнал*. 2023. № 5. С. 637–651.
- Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S.* Determination of ice cover parameters using seismoacoustic noise // *Acoustical Physics*. 2023, no. 5, pp. 752–737.
22. *Тихоцкий С.А., Преснов Д.А., Собиसेвич А.Л., Шуруп А.С.* Использование низкочастотных шумов в пассивной сейсмоакустической томографии дна океана // *Акустический журнал*. 2021. № 1. С. 107–116.
- Tikhotskii S.A., Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S.* The Use of Low-Frequency Noise in Passive Seismoacoustic Tomography of the Ocean Floor // *Acoustical Physics*. 2021, no. 1, pp. 91–99.
23. *Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Тубанов Ц.А. и др.* Байкальский сейсмоакустический эксперимент // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2021. № 1. С. 82–86.
- Sobisevich A.L., Presnov D.A., Tubanov T.A.* The Baikal Ice-Based Seismoacoustic Experiment // *Doklady Earth Sciences*. 2021, no. 1, pp. 76–79.
24. *Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Агафонов В.М., Собисевич Л.Е.* Вмораживаемый автономный геоакустический буй нового поколения // *Наука и технологические разработки*. 2018. № 1. С. 25–34.
- Sobisevich A.L., Presnov D.A., Agafonov V.M., Sobisevich L.E.* New-Generation Autonomous Geohydroacoustic Ice Buoy // *Seismic Instruments*. 2018, no. 6, pp. 677–681.
25. *Дмитриченко В.П., Преснов Д.А., Руденко О.В. и др.* Патент на изобретение № RU2646528 “Способ поиска полезных ископаемых на шельфе морей, покрытых льдом”. Дата приоритета 07.12.2016 г., опубликовано 05.03.2018 г., бюлл. № 7.
- Dmitrichenko V.P., Presnov D.A., Rudenko O.V. et al.* Patent for invention no. RU2646528 “Method for searching for minerals on the shelf of seas covered with ice”. Priority date 07.12.2016, published 05.03.2018, bul. no. 7. (In Russ.)
26. *Curtis A., Gerstoft P., Sato H. et al.* Seismic interferometry –Turning noise into signal // *The Leading Edge*. 2006, vol. 25, pp. 1082–1092.
27. *Godin O.A.* Acoustic noise interferometry in a time-dependent coastal ocean // *J. Acoust. Soc. Am.* 2018, vol. 143, pp. 595–604.
28. *Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H.* High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise // *Science*. 2005, vol. 307 (5715), pp. 1615–1618.
29. *Snieder R., Wapenaar K.* Imaging with ambient noise // *Physics Today*. 2010, vol. 63, pp. 44–49.
30. *Weaver R.L., Lobkis O.I.* Ultrasonics without a source: Thermal fluctuation correlations at MHz frequencies // *Phys. Rev. Lett.* 2001, vol. 87, 134301.
31. *Пескин М., Шредер Д.* Введение в квантовую теорию поля. Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001.
- Peskin M., Schroeder D.* Introduction to quantum field theory. Izhevsk: SIC “Regular and chaotic dynamics”, 2001. (In Russ.)
32. *Weaver R.L., Lobkis O.I.* Ultrasonics without a source: Thermal fluctuation correlations at MHz frequencies // *Phys. Rev. Lett.* 2001, vol. 87, 134301.
33. *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* Использование коротких искривлённых вертикальных антенн в акустической томографии океана // *Акустический журнал*. 2009. № 2. С. 232–246.
- Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S.* Using short curved vertical arrays in ocean acoustic tomography // *Acoustical Physics*. 2009, vol. 55, pp. 240–252.
34. *Гордиенко В.А., Ильичёв В.И., Захаров Л.Н.* Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Наука, 1989.
- Gordienko V.A., Plyichev V.I., Zakharov L.N.* Vector-phase methods in acoustics. Moscow: Nauka, 1989. (In Russ.)
35. *Сергеев С.Н., Шуруп А.С., Годин О.А. и др.* Выделение акустических мод во Флоридском проливе методом шумовой интерферометрии // *Акустический журнал*. 2017. № 1. С. 73–83.
- Sergeev S.N., Shurup A.S., Godin O.A. et al.* Separation of acoustic modes in the Florida Straits using noise interferometry // *Acoustical Physics*. 2017, no. 1, pp. 76–85.
36. *Кулаков И.Ю.* Взгляд на процессы под вулканами через призму сейсмической томографии // *Вестник РАН*. 2013. № 8. С. 698–698.
- Koulakov I.Yu.* A View on Processes beneath Volcanoes through the Prism of Seismic Tomography // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2013, no. 4, pp. 345–356.
37. *Чеботарёва И.Я.* Методы пассивного исследования геологической среды с использованием сейсмического шума // *Акустический журнал*. 2011. Т. 57. С. 844–853.
- Chebotareva I.Ya.* Methods for passive study of the geological environment using seismic noise // *Acoustical Physics*, no. 6, pp. 857–865.
38. *Горбатиков А.В.* Патент на изобретение № RU2271554 “Способ сейсморазведки”, дата приоритета 25.03.2005 г., бюлл. № 7.
- Gorbatikov A.V.* Patent for invention no. RU2271554 “Method of seismic exploration”, priority date 03.25.2005, bul. no. 7. (In Russ.)
39. *Собисевич А.Л., Разин А.В.* Геоакустика слоистых сред. М: ИФЗ РАН, 2012.
- Sobisevich A.L., Razin A.V.* Geoacoustics of layered media. Moscow: Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, 2012. (In Russ.)

40. Яновская Т.Б. Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. СПб.: Наука, 2015.
Yanovskaya T.B. Surface wave tomography in seismological studies. St. Petersburg: Nauka, 2015. (In Russ.)
41. Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S. Model of the geoacoustic tomography based on surface-type waves // *Physics of Wave Phenomena*. 2016, vol. 24, pp. 249–254.
42. Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Barmin M.P. et al. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements // *Geophys. J. Int.* 2007, vol. 169, pp. 1239–1260.
43. Marsan D., Weiss J., Larose E., Metaxian J.-P. Sea-ice thickness measurement based on the dispersion of ice swell // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011, vol. 131, pp. 80–91.
44. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
Brekhovskikh L.M. Waves in layered media. Moscow: Nauka, 1973. (In Russ.)
45. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997.
Katsnelson B.G., Petnikov V.G. Acoustics of the shallow sea. Moscow: Nauka, 1997. (In Russ.)
46. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Гусев В.А., Шуруп А.С. Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море // *Акустический журнал*. 2014. № 4. С. 426–436.
Presnov D.A., Zhostkov R.A., Gusev V.A., Shurup A.S. Dispersion dependences of elastic waves in an ice-covered shallow sea // *Acoustical Physics*. 2014, no. 4, pp. 455–465.
47. Агафонов В.М., Егоров И.В., Шабалина А.С. Принципы работы и технические характеристики малогабаритного молекулярно-электронного сейсмодатчика с отрицательной обратной связью // *Сейсмические приборы*. 2013. № 1. С. 5–18.
Agafonov V.M., Egorov I.V., Shabalina A.S. Operating principles and technical characteristics of a small-sized molecular-electronic seismic sensor with negative feedback // *Seismic Instruments*. 2014, vol. 50, pp. 1–8.

SEISMOACOUSTICS IN ARCTIC SEAS: FUNDAMENTAL PRINCIPLES FOR IMPROVING MONITORING TECHNOLOGIES

A.L. Sobisevich^{a,*}, V.P. Dmitrichenko^{b,**}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*JSC Concern “Sea Underwater Weapon Gidropribor”, St. Petersburg, Russia*

*E-mail: sobisevich@yandex.ru

**E-mail: dmitrichenko-v@yandex.ru

The results of the development of scientific foundation of technology for passive geohydroacoustic monitoring of Arctic seas are presented, including theoretical studies of the conditions for the origin and propagation of wave fields generated by induced geodynamic processes in the layered structure “lithosphere – hydrosphere – ice cover”, the solution of a separate class of problems within the framework of a fundamental scientific problem, related to the search for innovative, environmentally safe geophysical technologies to outline the local heterogeneities, as well as the creation of prototypes, laboratory and full-scale testing of prototypes of new generation ice-based geohydroacoustic buoys. The method for estimating parameters of floating ice (thickness, density, Young’s modulus, Poisson’s ratio) in passive mode was proposed and tested in a field experiment. Particular attention is paid to the state of scientific and practical groundwork regarding the possibilities of developing methods for passive geohydroacoustic monitoring of the Arctic seas.

Keywords: layered geophysical medium, Russian Arctic, Arctic shelf, geohydroacoustic wave fields, surface waves, ice cover, flexural gravity waves, seismohydroacoustic drifting ice-based antennas, passive seismic tomography, monitoring of local heterogeneities, geoecology.