

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПАССИВНЫХ СЕЙСМОГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ШЕЛЬФА АРКТИКИ

© 2021 г. А. Л. Собисевич^а, Д. А. Преснов^{б, *}, А. С. Шуруп^{а, б}

^аИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук,
ул. Большая Грузинская 10, стр. 1, Москва, 123995 Россия

^бМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет,
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: presnov@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 28.08.2020 г.

После доработки 28.08.2020 г.

Принята к публикации 08.09.2020 г.

Выполнен обзор существующих и перспективных сейсмогидроакустических технологий, аппаратных средств и новых научных подходов к проблеме изучения Северного Ледовитого океана. Особое внимание уделено состоянию научно-практического задела в части возможностей развития методов пассивного гео-гидроакустического мониторинга покрытого льдами шельфа северных морей России. Новые знания о структуре и условиях формирования и распространения волновых полей в слоистой системе “литосфера–гидросфера–ледовый покров–атмосфера”, порождаемых наведенными геодинамическими процессами, получены в ходе решения отдельного класса задач в рамках фундаментальной научной проблемы, связанной с поиском путей построения инновационных, экологически безопасных геофизических технологий оконтуривания локальных неоднородностей, в том числе – месторождений углеводородов, на покрытых льдом акваториях.

Ключевые слова: арктический шельф, ледовый покров, слоистая геофизическая среда, сейсмогидроакустика, микросейсмь, поверхностные волны, волна Шолте, пассивные сейсмо-томографические методы, геоэкология, мониторинг локальных неоднородностей

DOI: 10.31857/S0320791921010044

1. ВВЕДЕНИЕ

В декабре 2016 года Президентом Российской Федерации была утверждена Стратегия научно-технологического развития нашей страны, в которой ясно обозначены приоритеты освоения ресурсного потенциала арктических территорий и обеспечения безопасности национальных интересов в регионе. По данным Министерства природных ресурсов Российской Федерации потенциал арктического шельфа в российском секторе только по запасам условного топлива составляет более девяноста миллиардов тонн. В рамках нового технологического уклада с развитием добывающей отрасли Арктика станет самым перспективным регионом Земли, где будут развернуты работы по добыче нефти, газа и других полезных ископаемых [1–6]. В этой связи значительно возрастает роль фундаментальных и ориентированных прикладных исследований ученых Российской Академии наук, направленных на развитие физических основ инновационных технологий

разведки полезных ископаемых на шельфе северных морей [7].

Для успешного планирования и ведения народнохозяйственной деятельности в высоких широтах естественно востребованы оперативные сведения о состоянии окружающей среды, в том числе – ледового покрова, водного слоя и приземной атмосферы. В этой связи разработка новых методов и средств многодисциплинарного геофизического мониторинга становится одной из наиболее актуальных задач, неразрывно связанных с проведением комплексных фундаментальных исследований сейсмогидроакустических волновых полей в слоистой структуре “литосфера–гидросфера–ледовый покров–атмосфера” [7, 8].

Советские и российские ученые внесли существенный вклад в изучение Арктики [9–11], однако с середины девяностых годов прошлого столетия научная деятельность нашей страны в Арктической зоне стала постепенно угасать. В настоящее время руководство страны прикладывает значительные усилия для восстановления научного

присутствия в Арктике, регулярно организуются крупные научно-исследовательские экспедиции (“Северный полюс”, “Арктический плавучий университет”), в том числе и под эгидой Русского географического общества. Выполнены основополагающие исследования широкого спектра колебательных процессов в системе “лед–вода” на дрейфующих станциях с помощью сейсмометров и наклономеров [12].

Одновременно активизировались и зарубежные исследователи [13–15], осуществив многочисленные проекты по изучению геофизических, гляциологических, биохимических и других процессов в Арктике с использованием не только научно-исследовательских судов различного класса, но и подводных лодок [16, 17]. Международными научно-прикладными консорциумами развернуты автономные дрейфующие системы наблюдений, позволяющие в режиме, близком к режиму реального времени, передавать данные через каналы спутниковой связи [18–20]. Подобные системы активно используются как в центральной части Арктики, так и на ее шельфе, в первую очередь, в проливе Фрама и море Бофорта [14, 15, 21, 22]. При этом результаты наблюдений лишь отчасти публикуются в открытом доступе [23].

Реализация классических способов сейсморазведки на акваториях с использованием специализированных судов и мощных излучателей может быть существенно осложнена ледовыми условиями, что ограничивает сезон проведения полевых работ до нескольких месяцев в году. Применение активных излучателей [24], в свою очередь, неизменно сталкивается с проблемой геоэкологии в отношении “краснокнижных” морских обитателей, равно как и комплекс мероприятий по освоению шельфовых месторождений помимо непосредственной угрозы окружающей среде не исключает возможности провоцирования природно-техногенных катастроф [5, 25, 26]. Последние могут быть обусловлены различными эндогенными процессами, в том числе и связанными с естественной эволюцией скоплений газогидратов [27–31].

Более экологически-дружественным представляется метод когерентного сейсмоакустического профилирования [32, 33], основанный на использовании сравнительно маломощных когерентных акустических источников, позволяющих выполнять эффективное накопление полезных сигналов во временной и пространственной областях. При этом удается не только уменьшить пагубное воздействие мощного низкочастотного звука на морских млекопитающих, но и увеличить разрешающую способность профилирования за счет использования более широкой полосы частот. Однако, как и в традиционной сейсморазведке, требуется привлечение судов, буксирующих излучающую и принимающую системы [28].

К наиболее перспективным, экологически безопасным методам поиска полезных ископаемых на шельфе северных морей относят технологии пассивного сейсмо-гидроакустического зондирования: метод эмиссионной сейсмической томографии, метод микросейсмического зондирования, метод шумовой интерферометрии и др. В реализации этих методов активные источники не используются, а в качестве полезного сигнала рассматриваются естественные шумы. В настоящем обзоре приведены основные результаты исследований, посвященных разработке технологий круглогодичного мониторинга на шельфе и в высоких широтах Северного Ледовитого океана, которые базируются на сочетании гидроакустических возможностей обнаружения неоднородностей в водной толще и одновременном решении комплекса сейсморазведочных задач средствами единой вмораживаемой в лед распределенной системы информационно-измерительных модулей [34–36].

2. ОСНОВЫ ШУМОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Одним из активно развивающихся методов мониторинга неоднородных структур является пассивная сейсмоакустическая томография, применяемая для изучения как глубинного строения литосферы [37–39], так и гидросферы [40–42] Земли. В отличие от классических методов [43–45], в пассивной томографии в качестве источника информации о среде используется естественное шумовое поле, а не сигналы, излучаемые мощными низкочастотными излучателями, специальным образом располагаемыми в исследуемой области. Пассивная томография основывается на технике оценки времени распространения волнового возмущения между парой приемников путем анализа шумовых сигналов, в англоязычной литературе такой подход получил название шумовая интерферометрия [46, 47]. Название возникло из аналогии с классическими интерферометрами, где анализируются различия между двумя сигналами с целью получения полезной информации. С одной стороны, пассивные методы заметно удешевляют стоимость проведения сейсмогидроакустического эксперимента, но, с другой, возникает ряд нерешенных задач для практического применения этого подхода. Одним из основных ограничений является время накопления шумового сигнала, требуемое для получения достоверных оценок характеристик среды. В случае, когда это время превышает характерные временные масштабы изменения исследуемых параметров среды, применение пассивных методов теряет смысл. Наиболее широко пассивные методы применяются в задачах сейсмической томографии геологической среды [48], свойства ко-

торой практически не изменяются в ходе проведения эксперимента, и время накопления шумов может составлять месяцы и даже годы. Вместе с тем, следует отметить, что в ряде случаев принципиальную возможность оценки параметров волноводов океанического типа с использованием методов пассивной томографии можно считать теоретически и экспериментально подтвержденной [40, 49, 50].

Пассивные методы неразрушающей диагностики основываются на возможности оценки характеристик функции Грина из анализа функции взаимной корреляции шумовых полей в исследуемой области. Существует довольно большое количество научной литературы по физико-математическим аспектам обсуждаемого подхода, среди которой можно выделить [49, 51–54]. Ниже приводится наиболее простой вывод этой взаимосвязи [54, 55]. Рассмотрим замкнутую колебательную систему, которая испытывает воздействие случайных источников шума. Производную по времени флуктуаций давления можно представить в виде суммы собственных мод $u_n(\mathbf{r})$ рассматриваемой колебательной системы [54, 55]:

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

где коэффициенты мод a_n и b_n – случайные числа с нулевым средним. Причем предполагается, что источники некоррелированные $a_n b_n = 0$, здесь 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 разнесенных в пространстве точек приема \mathbf{r}_A и \mathbf{r}_B в модовом представлении записывается в виде:

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

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 усредненную по времени наблюдения функцию взаимной корреляции шумовых полей:

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

здесь T определяет временной интервал интегрирования, а τ – временная задержка функции взаимной корреляции. Подставляя в (3) модовое разложение (1), можно получить:

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

Сопоставляя выражения (2) и (4), получим взаимосвязь между функцией взаимной корреляции $K(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B, \tau)$ шумовых полей, зарегистрированных в пространственно-разнесенных 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:

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

причем D – коэффициент, зависящий от поглощающих свойств волновода [52] и характеристик источников [49].

По-видимому, впервые соотношения, аналогичные (5), были получены в квантовой теории поля [56] для связи двухточечной корреляционной функции, усредненной по основному состоянию поля (вакуумное среднее), и функции Грина этого поля. Впоследствии этот факт был “переоткрыт” в акустике [55].

Из (5) следует, что спектр корреляционной функции прямо пропорционален мнимой части комплексного спектра функции Грина, т.е. величине, не содержащей информации о фазе функции Грина. Кроме этого, во многих, характерных для натурального эксперимента случаях, детальная информация об источниках шумов отсутствует, то есть коэффициент D в (5) является неизвестным и, следовательно, соотношение (5) представляет собой лишь прямо пропорциональную зависимость. В итоге, строго математически, корреляционная функция шумов не позволяет определить ни абсолютное значение амплитуды функции Грина, ни ее фазу, и несет информацию лишь о мнимой части функции Грина с амплитудным коэффициентом, который является неизвестным во многих практических ситуациях. Несмотря на такие теоретические ограничения, соотношение (5) широко используется для решения обратных задач. Дело в том, что в большинстве работ, посвященных пассивной томографии параметров сре-

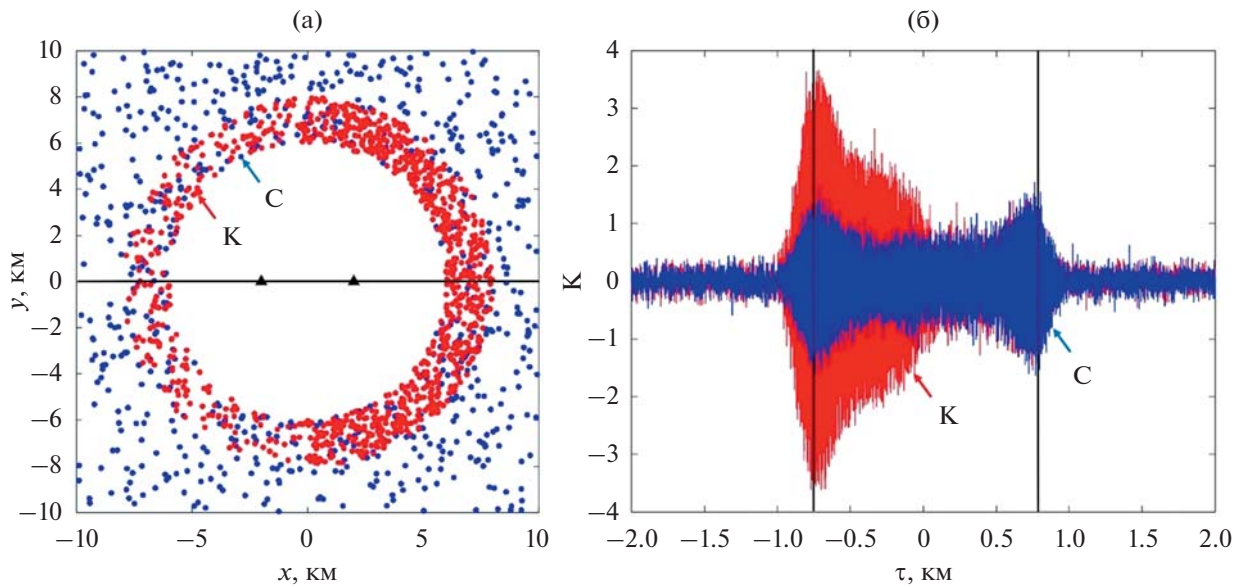


Рис. 1. Результаты численного моделирования: (а) – пространственное распределение случайных шумовых источников (изображены точками разных цветов, условно обозначенных К и С), относительно приемников (изображены в виде треугольников); (б) – взаимно-корреляционная функция двух разнесенных в пространстве приемников (цветом К изображен результат корреляционной обработки, когда шумовое поле формируется только источниками, помеченными на рис. 1а цветом К; цветом С изображена корреляционная функция, полученная при учете вклада источников, отмеченных цветом С на рис. 1а), вертикальные черные линии соответствуют истинным временам распространения сигналов между приемниками.

ды, 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 ее производной). При этом оценки абсолютных значений амплитуды или фазы функции Грина не используются.

Проиллюстрируем типичный вид взаимно-корреляционной функции на основе выполненного двумерного численного моделирования случайного шумового поля, принимаемого двумя разнесенными на плоскости приемниками. Среда распространения считалась однородной со скоростью продольных волн $c_0 = 5$ км/с. На рис. 1а представлена одна из реализаций случайного распределения 1024 источников сигнала, расстояние между приемниками составляло 4 км. Каждый источник излучал импульсный сигнал в виде модулированного гауссоидой синуса, причем каждый источник действовал в отдельные временные отрезки. Регистрируемые на двух приемниках сигналы с добавлением некоррелированной помехи использовались для расчета взаимно-корреляционной функции, которая в результате усреднялась по всем источникам (временным отрезкам). Результаты расчета представлены на рис. 1б, где видно, что взаимно-корреляционная функция имеет два максимума, симметричных относительно нулевой временной задержки. Положения

максимумов соответствуют времени распространения волнового возмущения вдоль прямой, соединяющей приемники (черная прямая на рис. 1а). Это означает, что основной вклад в формирование информативных пиков итоговой усредненной взаимно-корреляционной функции дают источники, расположенные вблизи этой прямой, поля других же источников при этом формируют помеху.

В условиях реального эксперимента источники, как правило, распределены неравномерно относительно измерительной пары приемников (см. рис. 1а, точки, отмеченные красным цветом). Таким образом, возникает анизотропия направлений распространения, что приводит к несимметричному виду корреляционной функции (рис. 1б, корреляционная функция изображена красным цветом). Один из максимумов становится более слабым и может быть неразличим на фоне помехи, что накладывает определенные ограничения на рассматриваемый подход. С практической точки зрения важным является вопрос, связанный с обоснованием необходимого времени накопления шумового сигнала, с целью получения близкого к изотропному распределения шумовых источников. Ясно, что это время зависит от конкретных условий эксперимента и определяется также типом рассматриваемых мод. Различные аспекты применения пассивных методов в гидро-

акустике и сейсмологии представлены в следующих двух разделах.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШУМОВ ОКЕАНА В АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Существующие методы мониторинга океана можно условно разделить на “контактные”, направленные на непосредственное измерение физических параметров океана с борта судна или с помощью автономных подводных аппаратов, а также “дистанционные”, к которым относятся спутниковые наблюдения и различные методы акустической томографии. Спутниковые средства дистанционного зондирования позволяют получать исчерпывающие сведения о состоянии приповерхностного слоя океана, но не дают возможности наблюдать за внутренними процессами. Поэтому для исследования глубин мирового океана широко применяются относительно дешевые, свободно дрейфующие и “ныряющие” зонды-датчики, собирающие сведения о температуре, солености, давлении, скорости звука и других параметрах водной толщи.

На текущий момент в различных уголках мирового океана функционируют примерно 4000 автономных буев. Все они были созданы и запущены в рамках международного проекта ARGO [57, 58]. Автономный буй способен погружаться на глубины до 2000–6000 м, а затем всплывать на поверхность океана (цикл погружения-всплытия составляет от 6 до 12 ч) и передавать накопленную информацию по спутниковым каналам связи с точной привязкой к географическим координатам. В связи с тем, что стоимость буев сравнительно невелика, их количество постоянно увеличивается и тем самым формируется глобальная сеть наблюдения за мировым океаном.

Отметим также контактные измерения физических параметров океана, проводимые с помощью управляемых подводных аппаратов, траектория движения которых задается заранее и, при необходимости, дистанционно корректируется. Особое значение гидроакустические методы исследования имеют в условиях ледового покрова Арктики. Здесь использование подводных аппаратов и дрейфующих (“ныряющих”) зондов осложнено, а в некоторых случаях и невозможно, в связи с трудностями контроля их положения подо льдами, а также передачи данных с них или по гидроакустическому каналу связи, или через спутник при всплытии на поверхность.

Несмотря на технические трудности, в настоящее время в Арктике планируется и непосредственно реализуется ряд крупномасштабных научных проектов и программ исследований, среди которых можно выделить проекты: MOSAIC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study

of Arctic Climate), CAATEX (Coordinated Arctic Acoustic Thermometry Experiment), CANAPE (Canada Basin Acoustic Propagation Experiment), IQOE (International Quiet Ocean Experiment), GOOS (Global Ocean Observing System), INTAROS (Integrated Arctic Observation System) и другие. Рассматриваются различные подходы к проведению исследований. Так, например, в проекте MOSAIC [59] (рис. 2) используется ледокол, вмороженный в лед и дрейфующий вместе с ним, что является развитием всемирно известной серии отечественных дрейфующих ледовых экспедиций “Северный Полюс”. Подготовка этого международного проекта велась при активной поддержке ААНИИ, технологии дрейфа ледокола вместе с ледовым покровом отрабатывались в рамках экспедиции “ТРАНСАРКТИКА” [60].

Не менее масштабный комплексный проект междисциплинарных научных исследований в Арктике планировался на 2021 год в рамках экспедиции “Северный полюс-41”. Дрейфующая научная станция на всем протяжении сопровождается ледоколом, обеспечивающим все современные потребности экспедиции, включая и вопросы безопасности сотрудников.

Альтернативный подход подразумевает создание подводной акустической системы геолокации на основе донных, заякоренных, а также вмороженных в лед и дрейфующих станций. Предполагается, что сеть подобных станций с акустическими “маяками” обеспечит подводную систему геолокации (проект INTAROS) по аналогии с известными системами глобального позиционирования. Массовое развертывание системы акустической геолокации на базе относительно дешевых дрейфующих погружаемых модулей, конструктивно аналогичных буям ARGO, способно обеспечить работу точечных океанографических измерений, пассивного акустического мониторинга и акустической термометрии (в активной или пассивной ее реализации) в высоких широтах. Основная цель таких исследований – изучение процессов, происходящих в Арктическом регионе и связанных, в первую очередь, с наблюдаемыми изменениями климатических условий. Полученные данные критически важны для успешного экономического освоения этого богатого природными ресурсами региона. При этом определяющая роль в изучении Арктики и мониторинге происходящих там изменений отводится сейсмоакустическим методам, включая и томографические.

Исторически методы акустической томографии океана восходят к работам У. Манка (W. Munk) и К. Вунша (C. Wunsch) 1979 года [62], впервые предложившим и экспериментально апробировавшим лучевую томографическую схему; в дальнейшем были развиты и другие варианты томографии океана [43]. Важную роль в фор-

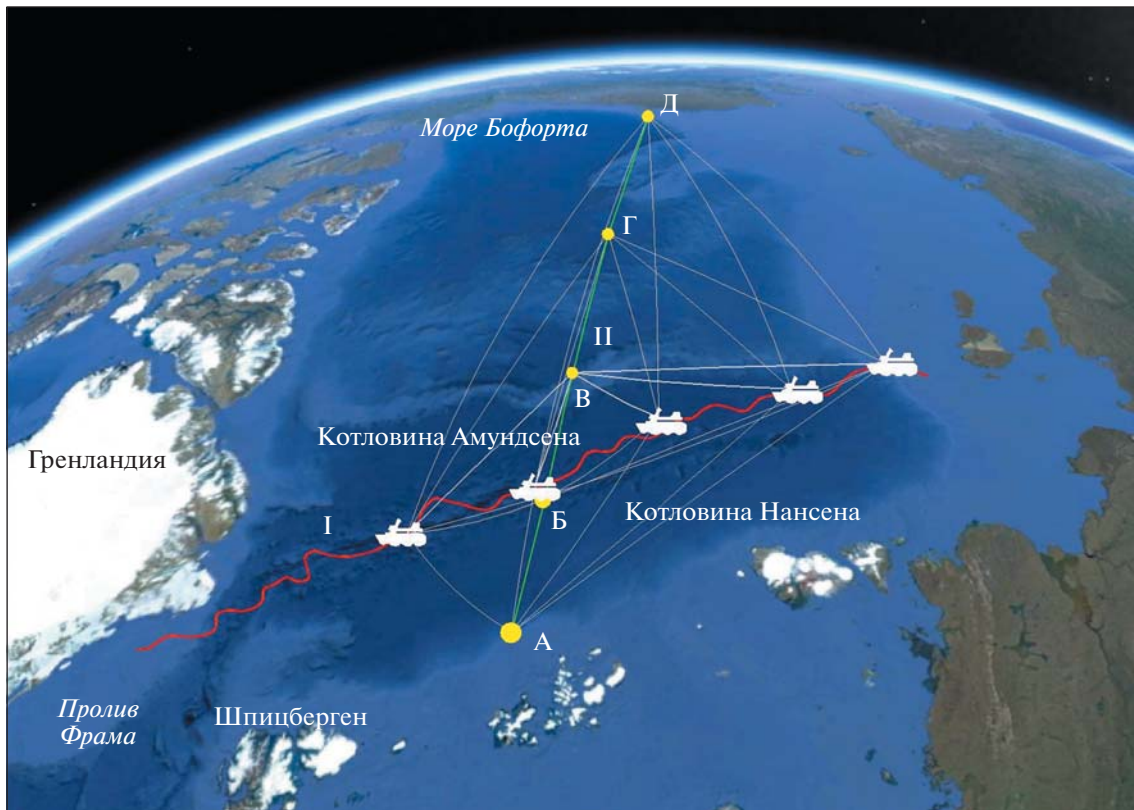


Рис. 2. Одна из концепций проекта СААТЕХ [61]. Линией I изображена условная траектория дрейфа ледокола в рамках проекта MOSAIC, который обеспечивает излучение низкочастотного сигнала. Точки А, Б, ... Г характеризуют положения приемных систем. Линия II, соединяющая указанные точки, соответствует трансарктическому акустическому распространению (эксперимент ТАР) [10, 11].

мировании облика современной акустической томографии океана сыграли отечественные ученые [45]. Изначально методы акустической томографии были разработаны для глубокого океана, где их практическое применение было сильно ограничено высокой стоимостью эксперимента, а также техническими сложностями его реализации. В последнее время в связи с широкомасштабным освоением шельфа, в том числе и Арктического шельфа, все больше внимания уделяется вопросам акустического мониторинга мелкого моря. Задача усложняется в теоретической части описания процессов распространения акустических волн в мелком море. Необходимо учитывать влияние донных слоев, ледового покрова, особенности дисперсионных свойств волновода. Одновременно задача упрощается в плане практической реализации решения: снижение стоимости и технической сложности проведения натурного эксперимента по сравнению с глубоким океаном за счет уменьшения числа приемных элементов и возможности, в предельном случае, отказаться от развертывания приемных антенн.

Важным шагом на пути упрощения и удешевления гидроакустического эксперимента стали

пассивные методы, позволяющие отказаться от использования специального источника, как правило, дорогостоящего, громоздкого, требующего решения вопросов его энергообеспечения. Основой пассивных методов, как уже отмечалось ранее, являются идеи шумовой интерферометрии, заключающиеся в использовании естественного шума океана, а также антропогенного шума, в первую очередь – шумов удаленного судоходства – в качестве источника информации об исследуемой области [49, 53, 63–66]. Если характеристики шумового поля меняются слабо за время его накопления, то пространственная функция взаимной корреляции шумового поля позволяет получить информацию о функции Грина среды [67–70]. Несмотря на всю привлекательность пассивных методов, возможности их практического применения сильно ограничены временем накопления шумового сигнала, требуемого для достоверной оценки характеристик функции Грина. В зависимости от расстояний между точками приема шумов, пространственной анизотропии шумового поля, технических характеристик приемной системы (одиночный гидрофон или антенна, рассматриваемая полоса частот) и

других условий, время накопления может превышать несколько дней и даже недель, что делает невозможным применение пассивных методов для мониторинга быстро протекающих процессов в океане. Для оценки же параметров волновода, которые слабо изменяются за время проведения эксперимента, например, приповерхностных характеристик дна, применение шумовой интерферометрии оказывается возможным даже на фоне быстроменяющихся гидрологических условий [71].

В настоящее время возможности применения пассивных методов в задачах гидроакустического мониторинга океана успешно подтверждены в ходе экспериментов по термометрии акватории [72, 73], пассивной томографии [50, 42, 74], при измерении скоростей океанических течений [75, 76], а также при оценке приповерхностных характеристик дна [77, 81, 82]. Для решения обратной задачи используются оценки времен распространения сигналов вдоль разных лучей или дисперсионные зависимости групповых скоростей мод.

Следует отметить результаты работ [85, 86], где на основе анализа экспериментальных данных была выдвинута гипотеза о возможности оценки фазы функции Грина, что, на первый взгляд, противоречит теоретическим результатами (5). Было показано [85, 86], что фаза комплексного спектра экспериментальной функции взаимной корреляции шумов, взятой только при положительных (или отрицательных) временах задержки, имеет характерные особенности на частотах, близких к ожидаемым частотам зарождения низших номеров гидроакустических мод модельного волновода. Полученные в [85, 86] результаты свидетельствуют о том, что при определенном подходе к обработке корреляционной функции шумов возможно извлечение из нее информации о фазе функции Грина.

Важную роль при реализации пассивного мониторинга играет возможность выделения из регистрируемого шумового поля отдельных мод с последующей их корреляционной обработкой. Для выделения отдельных гидроакустических мод, распространяющихся в океаническом волноводе, как правило, используют вертикальные антенны [87, 89] и различные алгоритмы пространственной фильтрации. В случае, когда антенны не перекрывают волновод по глубине и оказываются искривлены океаническими течениями, выделение мод шумового поля может основываться на анализе собственных значений и собственных векторов матрицы шумовых корреляций полей, зарегистрированных гидрофонами двух разнесенных в пространстве антенн [49, 89]. Основное преимущество модовой корреляционной обработки по сравнению с корреляцией полных полей заключается в сокращении време-

ни накопления шумов, которое требуется для достоверной оценки дисперсионных зависимостей отдельных мод [49]. В работе [49] было получено теоретически, что функция взаимной корреляции шумового поля океана, принимаемого гидрофонами двух разнесенных в пространстве модовых антенн, позволяет оценить времена приходов мод, как если бы они излучались одной антенной и принимались другой антенной. В этом случае время накопления шумового сигнала оказывается существенно меньшим известных оценок, полученных для безграничной трехмерной среды (точечный высокочастотный прием сигнала). В дальнейшем, на основе обработки экспериментальных данных была продемонстрирована принципиальная возможность пассивного мониторинга характеристик волновода на примере приливно-отливных вариаций глубины и скорости течений при рассмотрении шумовых полей, сформированных небольшим числом мод [76]. Шумы регистрировались одиночными донными ненаправленными гидрофонами, а для перехода к маломодовому режиму рассматривались низкие частоты, где акустическое поле формировалось небольшим числом распространяющихся мод. Полученные в [49, 76, 89] результаты позволяют говорить о возможности практической реализации пассивной модовой томографии — относительно нового направления в акустической томографии океана. Также в работе [49] была высказана идея о дополнительном сокращении времени накопления шумов при использовании комбинированных приемников, позволяющих в одной точке пространства регистрировать как скалярные, так и векторные характеристики акустических полей [90]. Применение векторного приемника в ледовых условиях позволило определить направление на источник сигнала путем поляризационного анализа группы волн, возбуждаемых в ледовом покрове [91]. Одно из преимуществ использования комбинированных приемников заключается в возможности приема сигнала с заданного направления за счет формирования кардиоиды [90]. Использование двух разнесенных в пространстве комбинированных приемников позволяет “сфазировать” их друг на друга, тем самым выделить из всех шумов, приходящих с различных направлений, лишь те, которые распространяются преимущественно вдоль линии, соединяющей центры рассматриваемых приемников (рис. 1а). Именно эти шумы и дают основной вклад в информативную часть корреляционной функции шумов, позволяющей оценить характеристики функции Грина. Исключение из корреляционной обработки “паразитных” шумов позволяет улучшить отношение сигнал/помеха на выходе коррелятора, тем самым сократив требуемое время накопления шумового сигнала примерно в 4 раза по сравнению с ненаправленным приемом [49]. Сле-

дует отметить, что на точность оценки характеристик функции Грина из корреляционной функции шумов оказывает заметное влияние анизотропия шумового поля [53, 83], которая заранее, как правило, не известна. В случае использования комбинированных приемников такая сложность не возникает, т.к. пространственная анизотропия шумов может быть напрямую измерена и учтена при последующей корреляционной обработке. Преимущества использования векторных приемников в задачах томографии океана с контролируемым источником рассматривались в [92], где в ходе проведения эксперимента была показана возможность использования вариаций углов приходов сигналов в качестве дополнительных данных при мониторинге изменений параметров волновода. В свою очередь, экспериментальное исследование возможностей и ограничений использования векторно-фазовых методов в задачах пассивной томографии на примере формирования с помощью кардиоиды “направленных” корреляций шумовых полей проводилось в [93]. Показано [93], что использование кардиоиды при корреляционной обработке шумов позволяет выделить информативные пики корреляционной функции на фоне интенсивной анизотропной помехи, что указывает на перспективность дальнейшего развития данного направления.

Дальнейшее снижение технических требований на условия проведения эксперимента возможно при отказе от использования вертикальных антенн при выделении отдельных мод и переходе к приему сигналов одиночными приемниками. В этом случае разделение модовых сигналов происходит за счет дисперсионных свойств волновода. В активном режиме возможность разделения мод при одностороннем приеме была продемонстрирована на экспериментальных данных [84], где для учета дисперсии реального волновода использовалась дисперсия модельного волновода Пекериса с жестким дном. В пассивном режиме выделение сигналов отдельных гидроакустических мод из функции взаимной корреляции экспериментально зарегистрированных шумов при использовании одиночных придонных ненаправленных гидрофонов рассматривалось в [40, 71, 82].

Если гидрофоны расположены на расстояниях, при которых дисперсионные свойства волновода уже проявляются в значительной степени, то в спектрограмме функции взаимной корреляции шумов наблюдаются продолжительные полосы, соответствующие дисперсионным зависимостям групповых скоростей отдельных мод (см. рис. 3). В этом случае разделение мод осуществляется за счет применения так называемого “скручивающего” оператора к функции взаимной корреляции шумов [40, 94, 95]. Основной целью подобной обработки является “выпрямление” дисперсионных кривых, соответствующих отдельным

модам. Дело в том, что отфильтровать отдельные моды из спектрограммы (см. рис. 3) затруднительно, так как на каждой частоте присутствует вклад от нескольких мод одновременно. Применение “скручивающего” оператора позволяет преобразовать исходный сигнал таким образом, чтобы его спектрограмма содержала дисперсионные зависимости не в виде искривленных линий, а в виде параллельных прямых, что позволяет достаточно просто осуществить фильтрацию отдельных мод. Применение преобразования, обратного к “скручивающему”, к отфильтрованным таким образом модам позволит получить поля отдельных мод (см. рис. 3). Следует отметить, что построение “скручивающего” преобразования в [40, 94, 95] основывается на рассмотрении модельного волновода Пекериса с жестким дном, т.е. процедуры выделения мод в работах [84] и [40, 94, 95] основаны на одних и тех же физических принципах.

Извлекаемая из шумовых корреляций информация в виде дисперсионных зависимостей групповых скоростей мод разных номеров может использоваться в качестве исходных данных для восстановления параметров волновода методами модовой томографии [43, 45]. Для случая, когда удастся выделить моды разных номеров в достаточно широкой полосе частот, была предложена пассивная томографическая схема совместного восстановления гидрологии, профиля течений и приповерхностных характеристик дна [96–99]. Возможность подобного совместного восстановления различных характеристик волновода в единой томографической схеме определяется тем, что дисперсионные зависимости мод различных номеров по-разному искажаются при возмущениях рассматриваемых параметров волновода. При этом для инверсии исходных данных используется линейное приближение, а уточнение получаемых оценок волновода происходит итерационно.

Следует отметить, что используемые на практике алгоритмы решения задач акустической томографии в подавляющем большинстве являются приближенными: чаще всего, рассматривается линейное приближение, а уточнение оценок параметров среды осуществляется итерационно. Это в общем случае накладывает ограничения на возможности успешной реализации мониторинга состояния океана, например, при наличии взаимодействия между гидроакустическими модами. Внутренние волны, влияние рельефа дна и ледового покрова на распространение звука в условиях Арктического шельфа, наличие контрастных неоднородностей в Северном Ледовитом океане (возникающих, например, при перемешивании теплых течений Атлантики и холодных водных масс Арктики) делают учет неадиабатического характера распространения модовых сигналов во

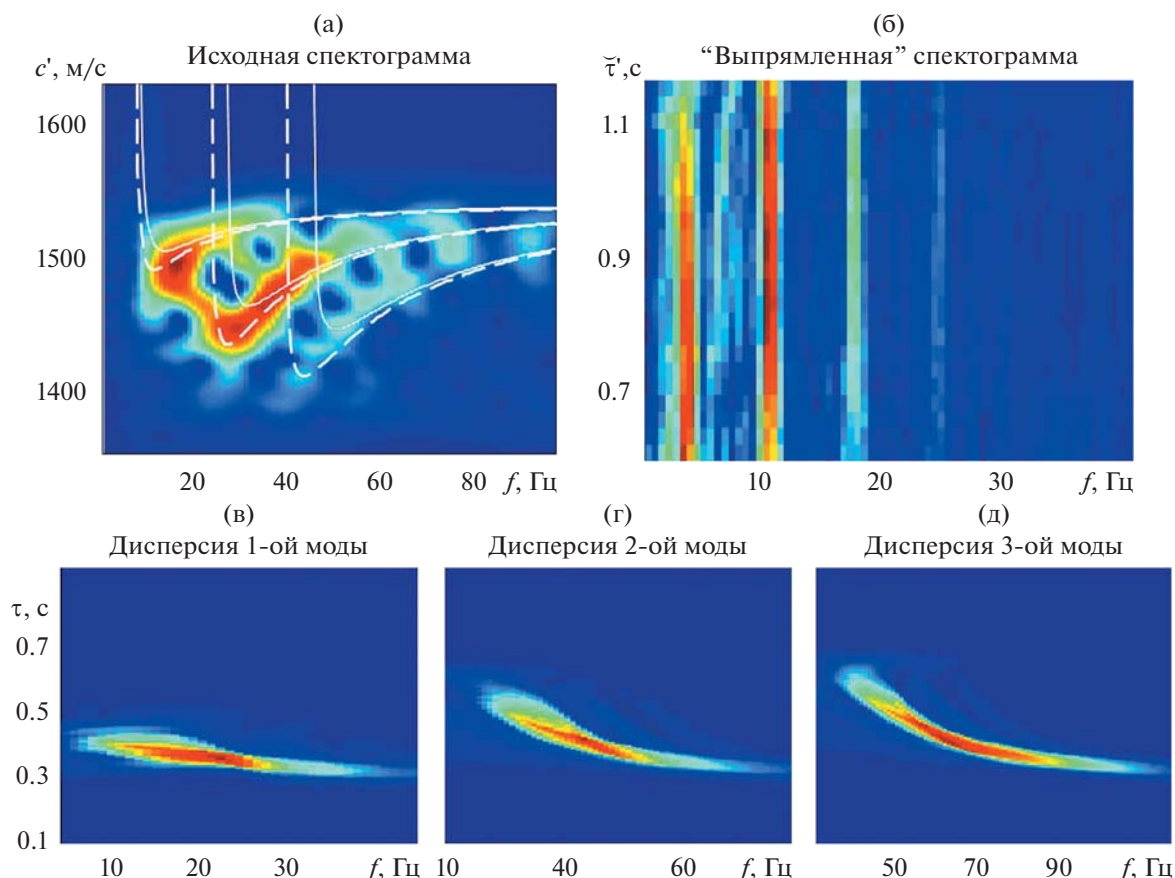


Рис. 3. Выделение мод из корреляций шумов, зарегистрированных одиночными ненаправленными гидрофонами с помощью “скручивающего” оператора [40]: (а) – модуль нормированной спектрограммы корреляционной функции шумов (сплошными и пунктирными линиями обозначены дисперсионные зависимости модельного волновода с различными параметрами, близкими к условиям проведения эксперимента); (б) – результат применения к спектрограмме “скручивающего” оператора позволяет отфильтровать отдельные моды; (в–д) после применения преобразования, обратного к “скручивающему”, удается оценить дисперсии отдельных мод.

многих практических случаях обязательным при решении обратных задач. Среди немногих результатов, полученных в этой области, следует отметить работы [100, 101], где был предложен и численно исследован метод оценки характеристик внутренних волн на основе частотных смещений максимумов интерференционной картины звукового поля источника. В настоящее время развитие методов неадиабатической томографии неоднородного движущегося океана является актуальным направлением современной гидроакустики, находящимся на начальном этапе своего развития.

С математической точки зрения, задачи акустической томографии являются некорректными и нелинейными. Поиск методов их решения при различных постановках (широкополосное облучение исследуемой области и прием сигналов, полный или частичный объем данных рассеяния и т.д.) весьма сложен и требует привлечения самых современных методов и подходов математи-

ческой физики. В настоящее время в математической теории обратных задач рассеяния разработаны так называемые функциональные алгоритмы, справедливые для неоднородностей с большими и даже с произвольно большими размерами и контрастами (алгоритмы Фаддеева–Ньютона, Новикова–Гриневича–Манакова, Нахмана и т.д.). Изначально эти методы разрабатывались для квантомеханических целей. Достаточно подробный исторический обзор дан, например, в [102–104]. Поскольку в изоэнергетическом (мономатическом) случае уравнение Шредингера с точностью до обозначений совпадает с уравнением Гельмгольца, то функционально-аналитические методы перспективны и для решения задач акустической томографии. Основное достоинство функционального метода – это строгость решения, а также сравнительная простота и эффективность машинной реализации. Впервые возможность применения функционально-аналитических методов в акустических задачах была проанализи-

рована в [105]. В дальнейшем был предложен функционально-аналитический алгоритм Новикова—Сантацесариа [106], позволяющий учесть неадиабатический характер распространения модовых сигналов, что требуется во многих практических случаях. Первые шаги в области построения схемы неадиабатической модовой томографии океана, основанной на алгоритме Новикова—Сантацесариа, были сделаны в [107]. Полученные предварительные результаты свидетельствуют, что функциональный алгоритм Новикова—Сантацесариа обеспечивает высокое качество решения обратной задачи и сравнительно высокую помехоустойчивость. Вычислительные операции данного алгоритма хорошо распараллеливаются и, тем самым, допускают принципиальное ускорение процесса обработки, которое позволяет получать изображение внутренней структуры исследуемого региона в режиме, близком к режиму реального времени. Именно этот алгоритм, а также его возможное развитие на основе итерационных методов, представляются наиболее перспективными для разработки и реализации новых подходов, позволяющих получить достаточно строгое решение задач акустической томографии с учетом неадиабатического характера распространения модовых сигналов.

Если в гидроакустике пассивные методы все еще далеки от реализации своего потенциала, то в геофизических приложениях пассивные методы, основанные на шумовой интерферометрии, уже привели к революционным результатам в сейсмоакустических исследованиях Земли [108]. Как уже отмечалось ранее, основное преимущество использования шумовой интерферометрии в геофизике по сравнению океанологией заключается в том, что геофизическая среда существенно более стабильная по сравнению с океаном. Кроме этого, работа с сейсмоприемниками, установленными на дне или на поверхности льда, представляется более простой в техническом плане задачей, нежели с вертикальными антеннами в океане, требующими постоянного контроля кривизны их профиля. Физическая основа у пассивных гидроакустических 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), в сейсмоакустических приложениях — характеристики поверхностных волн рэлеевского типа (низкие и сверхнизкие частоты). На суше методы пассивной сейсмоакустической томографии себя уже зарекомендовали [109], но применение их для глубинного зондирования дна океана является достаточно новой, еще до конца не изученной задачей. Практический интерес подобного рода исследований связан с поиском полезных ископаемых на шельфе в рам-

ках единой схемы сейсмогидроакустического мониторинга акваторий. Возможности и ограничения пассивной (не требующей источника) сейсмоакустической томографии глубинных структур дна, использующей одиночные донные станции, в настоящее время мало изучены. Обзор современных методов пассивной сейсмологии приведен в следующем разделе.

4. ПАССИВНЫЕ МЕТОДЫ СЕЙСМОЛОГИИ

Несмотря на постоянное совершенствование методов морской сейсморазведки, большинство применяемых технологий по-прежнему базируются на использовании источников взрывного типа с последующей регистрацией отраженных от разноглубинных геологических слоев сигналов посредством буксируемых сейсмических кос, что представляется чрезвычайно сложной в реализации и, следовательно, дорогостоящей процедурой в условиях Арктического шельфа при наличии ледового покрова. Кроме того, применение мощных импульсных излучателей создает угрозу для естественной среды обитания морских животных и представляет собой существенную геоэкологическую проблему освоения минерально-сырьевых ресурсов Северного Ледовитого океана.

Отдельный класс задач связан с необходимостью оперативной оценки основных параметров ледового покрова, что особенно актуально в свете критических изменений состояния льда, наблюдаемых в Арктике. С одной стороны, мониторинг состояния ледового покрова важен для планирования работ по сейсмопрофилированию. С другой стороны, свойства ледового покрова непосредственно влияют на характер распространения сейсмо-гидроакустических волн в океаническом волноводе, что диктует необходимость их учета при выполнении сейсморазведки и организации систем мониторинга на северных акваториях. В этой связи особую актуальность приобретают вопросы, связанные с разработкой нового поколения методов и средств, обеспечивающих более точный и при этом более долгосрочный прогноз изменений основных параметров ледового покрова, а также, в общем случае, и атмосферы с учетом наблюдающихся климатических изменений в арктическом регионе.

Представляется, что новые подходы к проблеме сейсмоакустического изучения арктических акваторий могут быть основаны на совместном анализе волновых процессов в системе “литосфера—гидросфера—ледовый покров—атмосфера”. При этом создаваемые на основе таких подходов инновационные технологии геологоразведки и мониторинга слоистой геофизической среды должны учитывать возможности пассивных наблюдений, использующих в качестве источника информации о среде естественные низкочастот-

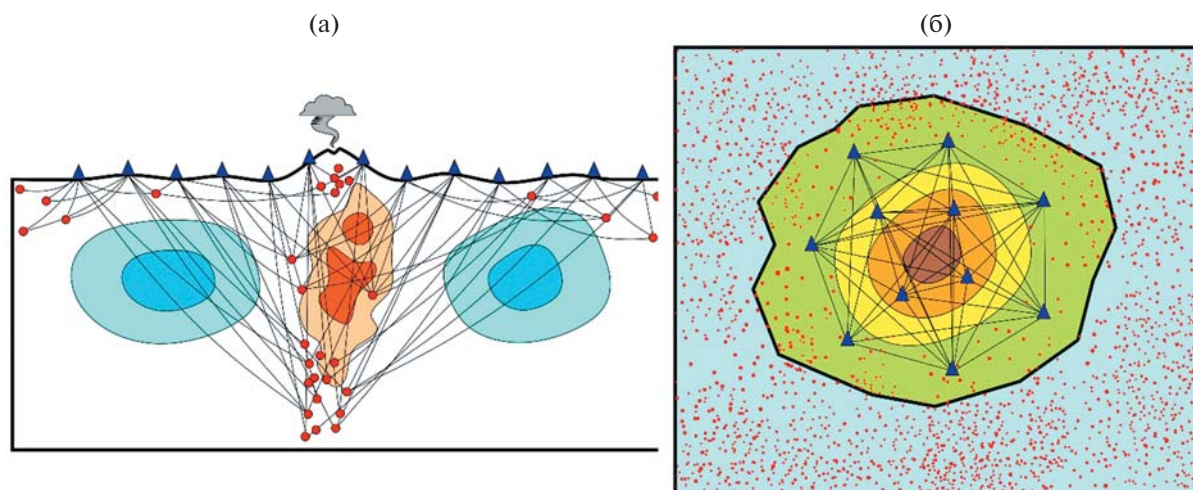


Рис. 4. Примеры различных подходов, применяемых в сейсмической томографии для изучения глубинного строения магматической питающей системы вулкана: (а) – на основе анализа времен пробега волн от местных землетрясений (вертикальный геофизический разрез); (б) – на основе анализа фонового сейсмического шума [111].

ные шумы. Геоакустические и гидроакустические волновые поля, порождаемые наведенными геодинамическими процессами в системе взаимодействующих геосфер, содержат полезную информацию, которая позволяет развивать новые технологии пассивного мониторинга заглубленных неоднородностей и запасов углеводородов, как на шельфе, так и в других, покрытых сплошным ледовым покровом районах Северного Ледовитого океана [110]. Следует отметить фундаментальные результаты успешного применения пассивных сейсмотомографических методов в деле изучения глубинного строения опасных геологических объектов на суше [111].

Пассивные сейсмоакустические методы, развиваемые в настоящее время для решения задач на суше, можно разделить на две группы (рис. 4), основанные:

- 1) на измерении сигналов от локализованных источников,
- 2) на измерении случайного шумового фона.

К первым относятся локальная томография по временам прихода продольных и поперечных волн [112] и эмиссионная томография, базирующаяся на присутствии доминантных частот [113]. В качестве “просвечивающих” среду сигналов используются местные землетрясения или сейсмическая эмиссия. К недостаткам такого подхода можно отнести необходимость значительного количества источников сейсмических сигналов, расположенных непосредственно под исследуемым объектом, что требует, как правило, продолжительного накопления первичных данных. Если же отношение сигнал/помеха в регистрируемых на дневной поверхности данных невелико и выделение времен прихода сейсмических волн за-

труднительно, то применяют методы эмиссионной сейсмотомографии, позволяющие оценивать характеристики источников сейсмического шума, а также упругие параметры геофизической среды. Отметим, что использование в качестве исходных данных лишь времен прихода сейсмических волн и исключение из анализа информации о полной волновой форме сигнала представляется недостаточно рациональным.

Одной из проблем сейсмотомографии с локализованными источниками является неравномерное покрытие исследуемого региона сейсмическими лучами, что приводит к ухудшению обусловленности решаемой обратной задачи и требует привлечения дополнительной априорной информации для повышения устойчивости получаемых оценок, а также применения специальных методов для улучшения разрешающей способности. В работе [115] предложена оригинальная идея адаптивной параметризации среды с использованием вейвлет-функций, позволяющая повысить детальность восстановления параметров.

Альтернативой являются методы второй группы, базирующиеся на том, что естественный микросейсмический шум сформирован в основном поверхностной волной рэлеевского типа. При этом для зондирования среды используется зависимость глубины проникновения волны от ее длины. Таким образом, максимально возможная глубина исследования определяется не мощностью источника, а частотным составом регистрируемых микросейсм. Отдельно следует выделить метод низкочастотного микросейсмического зондирования [109] (рис. 5, 6), смысл которого заключается в определении пространственных вариаций амплитудного спектра естественных шумов. Данный ме-

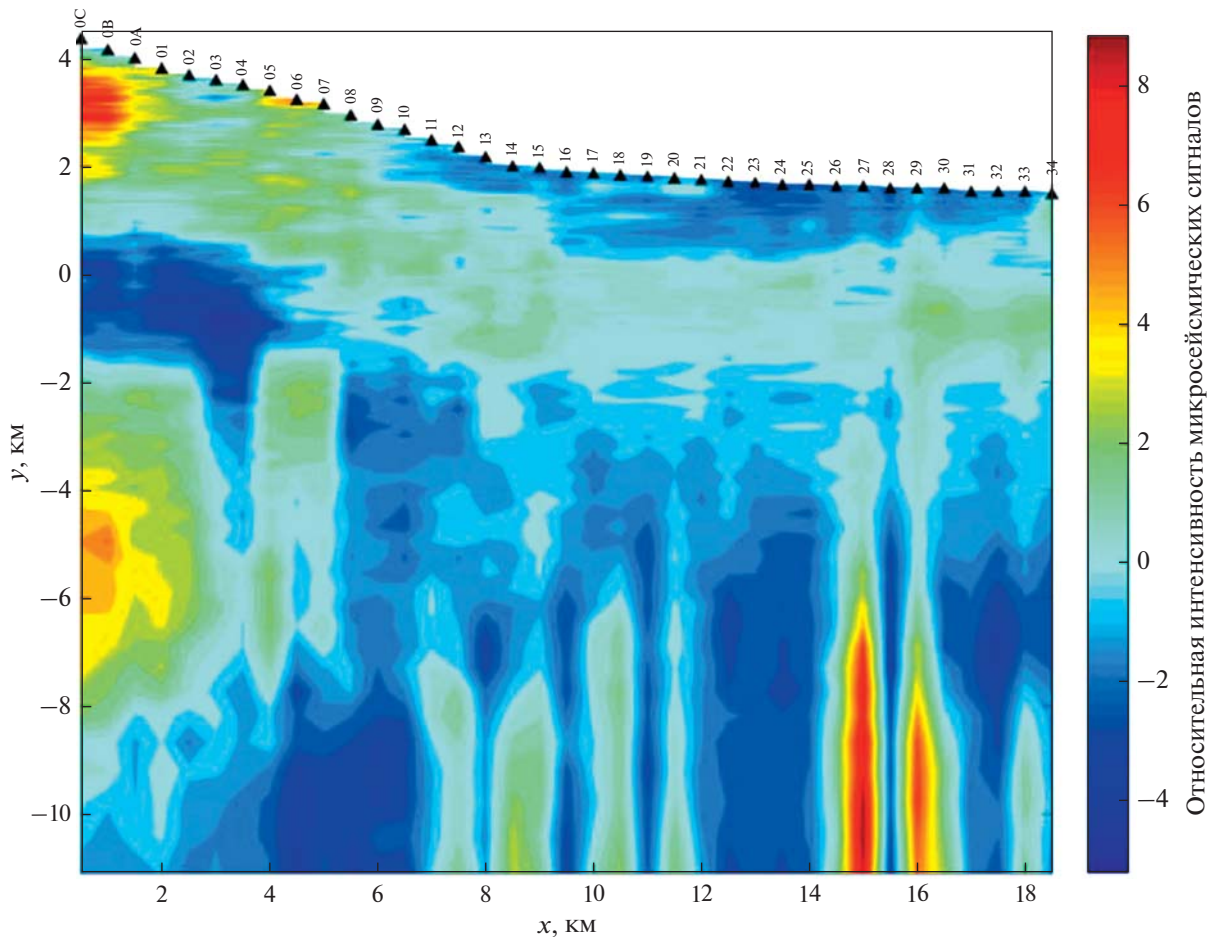


Рис. 5. Вертикальный геофизический разрез вулканической постройки Эльбруса по результатам обработки фоновых шумов в соответствии с методом низкочастотного микросейсмического зондирования. Области повышенной интенсивности микросейсмических сигналов оконтуривают периферические элементы глубинной флюидно-магматической системы [116].

тод достаточно прост в реализации и успешно применяется для изучения субвертикальных геологических неоднородностей в верхней и средней коре. К недостаткам относится слабая чувствительность в отношении горизонтальных границ.

Методы томографии и анализа микросейсмического шума объединяются в так называемом методе пассивной поверхностно-волновой томографии (Ambient Noise Tomography) [109], суть которого заключается в анализе частотной зависимости скоростей, то есть дисперсионных кривых поверхностных волн в различных пространственных областях. Данный метод представляется наиболее обоснованным с математической точки зрения и в настоящее время становится все более популярным при изучении глубинного строения коры и верхней мантии нашей планеты.

Важным преимуществом пассивной поверхностно-волновой томографии является упрощение решения обратной задачи, так как при использовании поверхностных волн, распростра-

няющихся вдоль плоской границы, трехмерная обратная задача разбивается на набор двумерных [118]. На первом шаге решается томографическая задача восстановления пространственного распределения скоростей поверхностных волн в горизонтальной плоскости для различных частотных диапазонов (восстановление дисперсии поверхностных волн), далее для каждой точки в горизонтальной плоскости осуществляется обращение дисперсионных кривых для определения слоистой модели по глубине. Физической основой пассивных технологий мониторинга подобного рода является возможность оценки характеристик функции Грина двух разнесенных в пространстве точек приема на основе функции взаимной корреляции естественных шумов, записанных в этих точках.

Таким образом, традиционные способы сейсморазведки, подразумевающие излучение мощных зондирующих сигналов, представляется возможным дополнить, а в ряде случаев и заменить

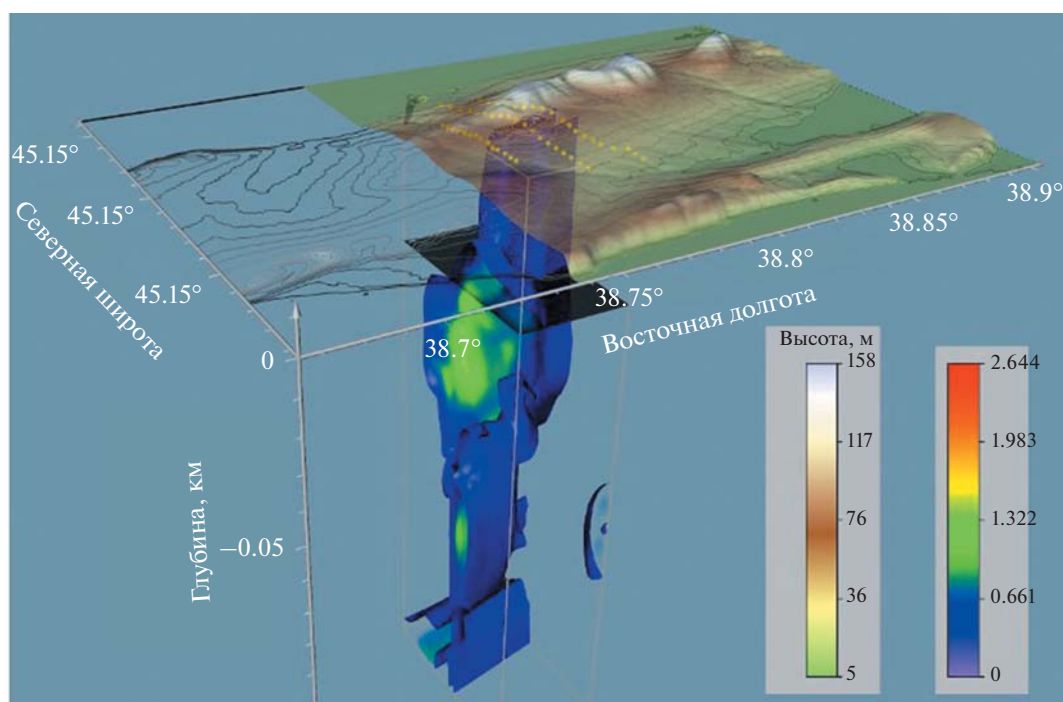


Рис. 6. Пример обработки серии геофизических профилей с применением пассивных сейсмотомографических методов для изучения глубинного строения вулканов [116].

пассивными методами зондирования, основанными на накоплении и последующей пространственно-временной корреляционной обработке естественного шумового поля в геофизической среде.

Общепринятым в поверхностно-волновой томографии алгоритмом построения модели среды по данным о скоростях поверхностных волн является метод, описанный в [119]. Важным вопросом при построении модели в областях с неизвестным скоростным строением является выбор способа параметризации среды. Можно выделить два общих типа базисных функций, используемых для параметризации скоростей в томографии поверхностных волн: 1) усеченный базис (например, полиномиальные, вейвлет-функции или спектральные базисные функции), 2) блоки или узлы. В каждом из этих случаев сейсмотомографическая модель может быть представлена конечным числом неизвестных. Блоки и узлы являются “локальными”, тогда как вейвлеты и полиномы являются “глобальными” базисными функциями. Блоки представляют собой двумерные объекты произвольной формы с постоянными значениями скоростей, которые обычно плотно перекрывают исследуемую область и имеют правильную форму. Узлы — это дискретные точки, в которых задаются параметры среды. Таким образом, узловая модель определяется в конечном числе дискретных точек, а значения в промежуточных областях определяются при помощи интерполяции, причем уз-

лы не обязательно располагаются регулярно. Возможность адаптировать характеристики базисных функций к распределению данных и другой априорной информации является необходимым свойством любой параметризации и обычно реализуется проще с локальными базисными функциями. В известном алгоритме [119] используются локальные базисные функции из-за простоты введения локальных же поправок на затухание, возможности оценивать области произвольной формы и размера; легкости, с которой можно смешивать области с различным шагом сетки. Так, по шумовым данным стационарных европейских сейсмологических станций, накопленным за 12 мес., были определены скорости низкочастотных поверхностных волн Рэля с периодами 10–50 с и построены карты групповых скоростей для всей Европы с разрешением около 100 км [120].

Следующий этап развития методов поверхностно-волновой томографии связан с созданием в США уникальной сети USArray, состоящей из 400 широкополосных сейсмических станций, расположенных регулярно на исследуемой территории с шагом ~70 км и функционирующих непрерывно в течение 18–24 мес. В работе [121] представлена томографическая схема, в которой, в отличие от [119], учитываются искривления лучей в рамках уравнений геометрической акустики, названная эйконал-томографией. При этом в [121] скорости распространения поверхностных

волн вычислялись уже на основе анализа фонового сейсмического шума. Таким образом, каждая станция рассматривалась как эффективный источник, а время пробега фазы между этим источником и всеми другими станциями использовалось для отслеживания фазового фронта и построения поверхности постоянной фазы. Это позволило авторам, используя различные местоположения эффективных источников, оценить как изотропные, так и азимутально-анизотропные фазовые скорости.

Результаты многолетних теоретических и экспериментальных исследований метода шумовой сейсмической интерферометрии нашли отражение в основополагающей работе [122], содержащей описание основных этапов обработки экспериментальных данных при построении и анализе взаимно-корреляционной функции сейсмического шума. Были предложены существенные для качества результатов процедуры обработки экспериментальных записей — амплитудная нормализация и обеление спектра, позволяющие повысить соотношение сигнал/помеха при оценке характеристик функции Грина. Показано, что приемлемое соотношение сигнал/шум достигается при времени накопления шумового сигнала не менее 20 нед. для поверхностных волн на частотах, не превышающих 0.02 Гц. С увеличением частоты от 0.02 до 0.1 Гц требуемое время накопления можно снизить до 5 нед., однако эта зависимость не является линейной в ряде случаев. Таким образом, достигается некий компромисс между необходимой глубиной зондирования и временем накопления шумовых данных. К практически важным результатам необходимо также отнести определение наиболее эффективного периода накопления шума для вычисления взаимно-корреляционной функции, равного одним суткам. В работе [122] также отмечается, что для адекватного разрешения пиков взаимно-корреляционной функции, соответствующих положительным и отрицательным временным задержкам, необходимо использовать станции, расположенные на расстоянии не менее трех длин волны для данной частоты.

Помимо восстановления скоростей продольных волн, томографические методы используются и для оценок пространственного распределения скоростей поперечных волн, что дает более контрастные результаты при наличии в исследуемой области “жидких” или “газообразных” включений (расплавы, нефтегазоносные горизонты). Пример восстановления трехмерного распределения скоростей поперечных волн в результате применения методов шумовой сейсмической томографии приведен в работе [38], где использовались данные с постоянно действующих и временных сейсмических станций на Авачинско-Корякской группе вулканов. Отметим, что в исследовании удалось восстановить достаточно

сильный контраст скоростных аномалий, составляющий порядка 30%.

Таким образом, на сегодняшний день пассивная сейсмическая томография, основанная на методе шумовой интерферометрии, является хорошо зарекомендовавшим себя инструментом в практике сейсмологических исследований для изучения земной коры и верхней мантии [37, 123].

Следует отметить, что отмеченные пассивные методы разработаны для использования на суше и при применении на морском шельфе могут столкнуться с определенными трудностями, особенно это относится к методам второй группы, так как шумовое поле на дне значительно отличается от поля на суше и включает в себя дополнительные помехи. Одним из примеров успешного применения шумовой поверхностно-волновой томографии на шельфе можно считать работу [124], где была предпринята попытка восстановления структуры литосферы в зоне перехода континент—океан в районе Южной Калифорнии. Использовались специализированные донные сейсмические станции, расположенные как на шельфе, так и в глубоководной части Тихого океана. В результате работы 17 подводных и 65 наземных сейсмических станций путем анализа годичной записи низкочастотного сейсмического шума, была представлена модель пространственного распределения скоростей поперечных волн с разрешением порядка 50 км. Отдельного упоминания заслуживает работа [39], в которой, по всей видимости, впервые использовался частотный диапазон поверхностных волн на порядок выше, чем в предыдущих исследованиях. Были проанализированы экспериментальные данные, полученные на нефтяном месторождении в Северном море с использованием более чем 2000 сейсмических датчиков, расположенных на шельфе с межстанционным расстоянием 10 м. Столь плотная сеть потребовала использования частотного диапазона 0.5–5 Гц, в котором вдоль границы твердого тела и водного слоя распространяется волна Шолте. Примечательно, что при вычислении взаимно-корреляционной функции использовалось всего 6.5 ч шумовых данных. В результате была создана трехмерная скоростная модель *S*-волн для первых 600 м геологической среды месторождения с высоким разрешением и уточнено распределение неоднородных структур по глубине.

Возможность применения пассивной сейсмоакустической томографии на основе данных донных сейсмостанций для реконструкции характеристик дна океанического шельфа с высокой точностью за разумные времена накопления шума показана в работах [39, 124]. Таким образом, в совокупности с новейшими результатами по исследованию упругих волн в ледяных пластинах [125–127] открывается перспектива для изучения системы

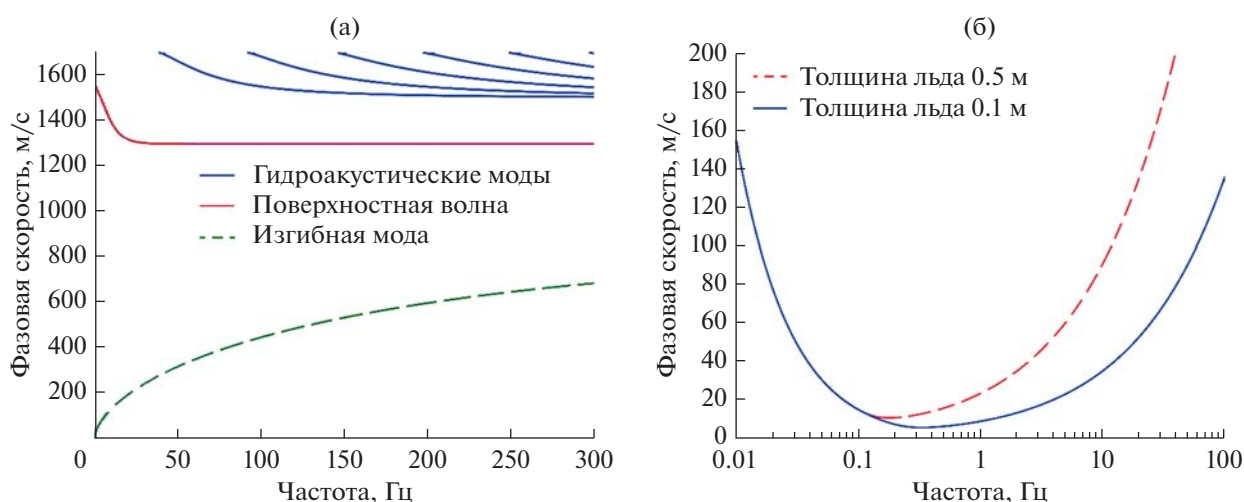


Рис. 7. (а) — Дисперсионные зависимости основных мод сейсмогидроакустического поля при глубине водоема 30 м и толщине льда 1 м; (б) — дисперсионные кривые изгибно-гравитационных волн для различных значений толщины льда [117].

“литосфера—гидросфера—ледовый покров—атмосфера” в рамках единого пассивного сейсмогидроакустического подхода, на основе анализа волновых структур, распространяющихся в слоистой геофизической среде.

Важной представляется попытка оценить параметры фундаментальной моды поверхностной волны по измерениям, проводимым на льду или подо льдом в непосредственной близости от него. Несмотря на высокий уровень шумов, всегда присутствующий при измерениях на льду, существует возможность выбора частотного диапазона для получения желаемого результата. Первые экспериментальные результаты были получены в [7, 110] при проведении экспериментов в ледовых условиях Ладожского озера. Было установлено, что спектральные характеристики микросейсмического шума, регистрируемого на поверхности льда, повторяют таковые для донных микросейсм.

Следующим этапом исследования возможностей и ограничений применения методов сейсмогидроакустического мониторинга волновых процессов в волноводах Арктического типа является их теоретическое обоснование, а в тех случаях, когда строгого аналитического решения получить не удастся, — проведение прямого численного моделирования [128].

5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОЛНОВОДАХ АРКТИЧЕСКОГО ТИПА

Теоретические основы описания волновых процессов в рассматриваемой среде “литосфера—гидросфера—ледовый покров—атмосфера” изложены в монографиях [129–131] и основываются на общей теории распространения акустических

волн в слоистых средах [132] в условиях мелкого моря [133]. Проанализированы особенности возбуждения и распространения различных типов волн в волноводе, моделирующем условия покрытого льдом водоема и представляющем собой вертикально слоистую среду, включающую изотропное твердое полупространство, слой однородной сжимаемой жидкости и изотропный упругий слой льда. В такой постановке удается получить аналитическое выражение для дисперсионного уравнения, описывающего распространение различных модовых составляющих полного сейсмо-гидроакустического поля [134]. Далее из компонент полного волнового поля представляется возможным выделить наиболее информативные с точки зрения восстановления параметров модельной среды (рис. 7а):

- изгибная волна ледового покрова, существующая на всех частотах и распространяющаяся при практически любом соотношении фазовых скоростей продольных и поперечных волн в среде. Фазовая скорость этой волны критична к выбору толщины ледового слоя и, следовательно, может использоваться в качестве информативного параметра мониторинга состояния ледового покрова;

- волна рэлеевского типа, распространяющаяся вдоль границы упругого слоистого полупространства и также существующая на всех частотах (“фундаментальная” мода). Именно она рассматривается в качестве основного источника геоакустической информации о глубинном строении океанического дна. В случае отсутствия ледового покрова фундаментальной моде соответствует так называемая волна Шолте (иногда также называемая волной Стоунли) — донная поверхностная волна, не имеющая критической частоты и рас-

пространяющаяся вдоль границы “жидкий слой—упругое полупространство”;

— сейсмогидроакустические моды, характеристики которых определяются параметрами всех сред. Эти волновые возмущения преобладают в данных, регистрируемых в придонных слоях, и используются традиционно для мониторинга состояния водного слоя, включая профиль скорости звука, температуру и соленость, для оценки упругих параметров приповерхностного слоя осадков, а также для обнаружения неоднородностей в водной толще.

Основным источником информации о донных структурах шельфа в рассматриваемой постановке является дисперсия скорости фундаментальной моды поверхностной волны, распространяющейся вдоль границы упругого полупространства со скоростью 1.5–4 км/с, определяемой физическими свойствами горных пород морского дна. Поскольку глубина проникновения зондирующей волны в донные слои составляет около половины ее длины, в решении прикладных задач поиска полезных ископаемых наиболее привлекательным является частотный диапазон 0.1–1.7 Гц.

На арктическом шельфе помимо шумов океана необходимо учитывать так же и наведенные волновые процессы в слое льда. Существенный вклад в волновое поле, регистрируемое вмороженным сейсмоприемником, вносят изгибно-гравитационные волны, скорость которых определяется решением дисперсионного уравнения [125]

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

где ω — частота; v — фазовая скорость; c_0 — скорость звука в воде; h — толщина ледового покрова; ρ , ρ_0 — плотности льда и воды соответственно; $D = E/[12(1 - \nu^2)]$; E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона ледяного покрова; g — ускорение свободного падения. На рис. 76 приведен пример численного решения этого уравнения при характерных для арктического региона параметрах сред. Как видно, скорость изгибно-гравитационной волны на частотах выше 0.1 Гц определяется толщиной ледового покрова, что позволяет создавать технологии восстановления параметров льда. Отметим важное обстоятельство, непосредственно следующее из рис. 76, а именно: скорость изгибно-гравитационной волны на порядок ниже скорости фундаментальной моды поверхностной волны в диапазоне частот, представляющем интерес для глубинного зондирования дна.

В низкочастотной области разделение вклада изгибной моды и фундаментальной донной поверхностной волны может быть основано на про-

странственно-временном анализе принимаемых полных полей при соответствующем выборе частотного диапазона. Раздельное рассмотрение изгибной и фундаментальной мод позволило предложить возможные пути оценки параметров льда и жидкого слоя, а также скорости поперечных волн в дне на основе сопоставления экспериментальных дисперсионных кривых и теоретических зависимостей, полученных для модельной слоистой структуры [34].

Естественным развитием наших работ стали натурные эксперименты на льду Ладожского озера [110, 134], результаты которых подтвердили возможность томографической реконструкции параметров слоистой геофизической среды “упругое полупространство—водный слой—ледовый покров” по данным о модовой структуре регистрируемого сейсмогидроакустического поля. Таким образом, сформированный научный задел [7, 35, 110, 134–136] может быть рассмотрен в качестве основы развития инновационных подходов при совершенствовании технологий разведки месторождений углеводородного сырья на основе данных, получаемых аппаратурными комплексами, осуществляющими мониторинг на шумах неоднородностей морского дна. При этом важнейшим этапом создания экологически-безопасных пассивных технологий сейсмогидроакустического мониторинга Арктического шельфа представляется решение вопросов аппаратурного обеспечения регистрации всех возможных типов волновых возмущений (сейсмических, гидроакустических, изгибных). Далее рассмотрим наиболее значимые для арктических условий инженерно-технические решения и результаты их применения в ряде экспериментов.

6. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЙ В АРКТИКЕ

Проведение научно-технических работ в сложных ледовых условиях Арктики накладывает повышенные требования как на технические средства непосредственного обеспечения геофизических наблюдений (донные и дрейфующие измерительные комплексы), так и на вспомогательные системы (связь, управление, навигация). Судя по материалам из открытых источников [137], в настоящее время в Арктике в автономном режиме работают сотни подобного рода устройств, в том числе отечественной разработки [138]. Примечательно, что многие компоненты этой распределенной системы могут быть информационно объединены для оперативного анализа и прогнозирования меняющейся обстановки во всем Северном Ледовитом океане. Наиболее известные следующие системы измерения, накопления и первичной обработки данных, активно используемые в полярных регионах:

1. Буй для измерения параметров ледового покрова (Ice Mass Balance Buoy, (IMB), рис. 8) – разработан специально для наблюдения за динамикой изменения ледового покрова в Арктике [139, 140]. Компоненты буя содержат, как правило, два акустических источника, расположенных над и под поверхностью льда (для оценки толщины льда и снежного покрова), и линейки термисторов для измерения температуры над льдом, в самом льду и подо льдом. Градиент температуры позволяет судить о том, будет ли нарастать ледовая масса или, наоборот, ожидается таяние льда. Буи IMB также содержат приборы для измерения температуры воздуха, давления и GPS датчики для определения координат. По-видимому, это самый дешевый и самый распространенный вид буев. Получаемая информация может быть использована для различных целей, например, для прогноза динамики ледовой массы в областях расположения буев.

2. Вмораживаемый в лед профилограф (Ice-Tethered Profiler (ITP), рис. 9) – предназначен для измерения гидрофизических характеристик водного слоя от приповерхностного слоя и до глубин ~1 км [141, 142]. Система разворачивается на многолетних льдах полярных морей и состоит из трех основных элементов: поверхностная часть, которая находится на поверхности льдины; утяжеленный трос, прикрепленный к поверхностной части; подводная измерительная часть, которая перемещается вверх и вниз вдоль кабеля и проводит измерения, или содержит набор стационарных датчиков, например, гидроакустических приемопередающих устройств. В целом измерительная часть может содержать самое разнообразное оборудование в зависимости от конфигурации профилографа. Как правило, в ходе измерений получают данные о сезонных вариациях профиля скорости звука, о величине и направлении течений, о масштабах турбулентности среды, характеристиках внутренних волн, что позволяет детально описать существенные особенности распространения гидроакустических волн в той части Арктического региона, где установлены системы наблюдения данного класса. Эта информация позволяет, например, применять алгоритмы статистической обработки гидроакустических сигналов, согласованных со средой их распространения, улучшающие такие параметры гидролокационного оборудования, как дальность обнаружения подводных объектов, точность и достоверность получаемых оценок параметров.

3. Автономный буй-профилограф (Polar Profiling Floats) – ныряющий буй для работы в высоких широтах. Разработка основана на результатах программы глобальных наблюдений ARGO [57, 58], для которой район Арктики оставался недоступным, т.к. наличие ледового покрова делало невозможным передачу данных через каналы

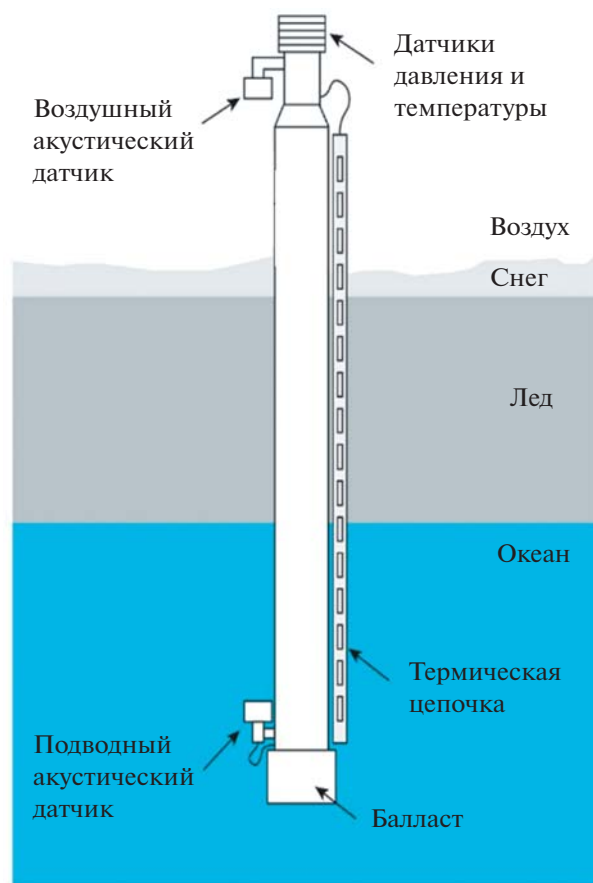


Рис. 8. Схема буя для мониторинга параметров ледового покрова [8].

спутниковой радиосвязи. Буй ARGO в “северном исполнении” должен был решить эту задачу. Основные отличия от базовой модели заключаются в усиленной “головной” части для безопасных контактов с ледовой поверхностью и дополнительном наборе устройств связи с ледовыми или донными маяками. Последние используются для позиционирования дрейфующего буя, а также для обмена полезными данными. Разработчики также заявляют о возможности самостоятельного обнаружения буем участков, свободных от ледового покрова. В случае отсутствия сплошного ледового покрова буй для полярного профилирования пытается самостоятельно установить связь со спутником при всплытии. Существующий опыт использования этих буев в Арктике говорит о возможности работы устройства в течение 3–4 лет.

4. Глайдеры (Gliders) – автономные подводные системы для непрерывных и долговременных наблюдений, способные перемещаться за счет небольших изменений плавучести и рулевых крыльев, обеспечивающих поступательное движение вперед. Оснащаются датчиками различного типа. При всплытии принимают команды и пе-

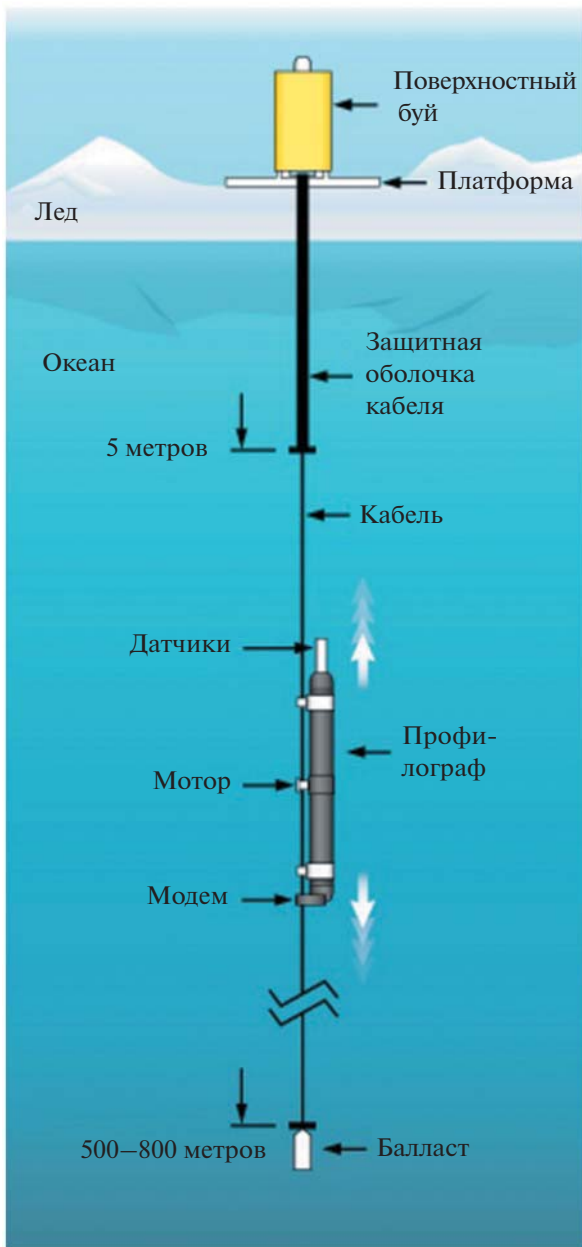


Рис. 9. Конструкция вмораживаемого профилографа [18, 143].

редают измеренную информацию через каналы спутниковой связи.

5. Автономные подводные аппараты (Automatic Underwater Vehicle, (AUV)) – более массивные и мощные по сравнению с глайдерами, способные нести расширенный комплект измерительных систем и средств, оснащены винтовой тягой для перемещения по заданной траектории. Автономные подводные аппараты являются в настоящее время наиболее перспективным с точки зрения технических возможностей инструментом для непрерывных и долгосрочных подводных исследова-

ований, в том числе и в сложных условиях Арктики. Активные работы по разработке автономных подводных аппаратов ведутся как у нас в стране, так и за рубежом. Современные аппараты AUV могут функционировать без непосредственного участия оператора, а после завершения программы исследований возвращаться в заданное место для передачи полученной информации. Аппараты AUV могут оснащаться практически любым океанографическим оборудованием, могут использоваться и гидролокаторы бокового обзора, а также иное специализированное оборудование. Продолжительное время использование AUV в Арктике было ограничено в связи с тем, что наличие ледового покрова не позволяло использовать спутниковые методы позиционирования и приема-передачи данных. В настоящее время эта проблема во многом преодолена. Для позиционирования подо льдом разработаны и широко применяются акустические системы связи, что открывает самые широкие возможности для использования подводных систем AUV в Арктическом регионе. По сравнению с 90-ыми годами, когда эра автономных подводных аппаратов только начиналась, к настоящему времени произошел серьезный прорыв в технологических возможностях этих аппаратов. Снижение стоимости и повышение качества многофункциональных датчиков для гидрофизических измерений, расширение функциональных возможностей навигационных систем, появление сравнительно дешевой и при этом энергоэффективной электроники, а также открытых инструментов архитектуры промежуточного программного оборудования позволяют, как никогда ранее, получать все более усовершенствованные и при этом гибкие системы, которые могут выполнять самые разнообразные задачи.

Среди других, часто используемых в Арктических условиях средств измерений, можно выделить следующие:

6. Дрейфующие датчики для измерения характеристик приповерхностного слоя океана (Surface Wave Instrument Float with Tracking (SWIFT buoy)). Как правило, эти датчики используют на открытой воде для контроля параметров волнения, скорости ветра, турбулентности и приповерхностного шума. Однако в последнее время они активно используются и в ледовой обстановке. Время непрерывного использования буя в режиме измерений может достигать 3000 ч.

7. Датчик волнения и скорости течений (Acoustic Wave and Current (AWAC) meters) – предназначен для измерения профиля скорости течений жидкости (величины и направления на разных глубинах), а также для измерения высоты волн на свободной поверхности и направления их движения. Также прибор способен проводить из-

мерения толщины ледового покрова, разработан специально для использования в системах мониторинга шельфовых зон, обладает небольшим размером, устойчив к внешним физическим воздействиям, приспособлен к многолетним работам в суровых условиях Арктики.

8. Измерители теплового потока (Autonomous Ocean Flux Buoy (AOFB)) – ледовые системы наблюдений для измерения характеристик вертикальных тепловых потоков в приповерхностном слое океана. Данные этих систем требуются для построения глобальных прогностических моделей состояния Арктики, основанных на взаимосвязанности и взаимовлиянии процессов, происходящих в океане, ледовом покрове и в атмосфере.

9. Автономные метеорологические станции (Automated Weather Station (AWS)) – используются на практике чаще всего в задачах глобального позиционирования и измерения параметров приповерхностного слоя атмосферы. Получаемая информация используется в первую очередь для формирования и уточнения прогноза погоды в местах расположения станций.

10. Беспилотные летательные аппараты (Unmanned Aero Vehicle (UAV) или БПЛА) – фактически традиционный метод наблюдений за Арктическим регионом в дополнение к спутниковым системам. Несмотря на то, что информация, по-

лучаемая в ходе таких наблюдений, не позволяет в полной мере говорить о процессах, происходящих по всей глубине водного слоя, получаемые данные являются важными для мониторинга состояния ледового покрова и процессов, происходящих на его поверхности. Использование беспилотных летательных аппаратов позволяет осуществлять оперативный контроль сравнительно небольших регионов.

Информация, поступающая со спутников и БПЛА, совместно с результатами контактных измерений, полученных с буев различного типа и подводных аппаратов, представляет собой данные, которые требуются для построения и верификации глобальных моделей Арктики, что может использоваться для мониторинга текущего состояния этого региона, а также для прогнозирования его состояния в будущем.

Среди отечественных разработок можно выделить ледовый измерительный комплекс [36], разрабатываемый ИФЗ РАН совместно с МФТИ и АО “Концерн “МПО–Гидроприбор”, в состав которого входят: широкополосные сейсмометры нового поколения, гидрофон, акселерометр, цифровой регистратор и системы беспроводной передачи данных (рис. 10). Первичные преобразователи сейсмоприемника, созданные на элементной базе молекулярной электроники, отве-



Рис. 10. (а) – Макет вмораживаемого геоакустического информационно-измерительного буя: 1 – воспринимающие сенсоры; 2 – элементы питания; 3 – цифровой регистратор и блок электроники; (б) – рабочий макет вмораживаемого буя на льду озера Байкал.

чают всем требованиям современных сейсмологических измерений и защищены от влияния низких температур [36]. Использование широкополосных воспринимающих элементов в составе автономных дрейфующих ледовых измерительных буев, предназначенных для круглогодичного использования, позволит в перспективе преодолеть ограничения существующих экспериментальных методов, в том числе: а) невозможность протяжки донного кабеля, б) невозможность передачи информации через слой льда. Все это позволит реализовать применение пассивных сейсмогидроакустических технологий наблюдения непосредственно с ледового покрова, что существенно проще буксировки сейсмических крос или же размещения сейсмоприемников на морском дне [135].

Среди проектов, реализуемых в Арктике на регулярной основе, следует отметить научно-исследовательские работы, проводимые с борта подводных лодок [144–146]. Эффективность такого сотрудничества научно-исследовательских центров и военно-морских сил оказалась весьма высокой: получены новые научные данные по геологии, физике, химии и биологии Арктического региона, динамике ледового покрова, циркуляции вод и батиметрическим характеристикам океана. В ходе выполнения программы “Научные ледовые экспедиции” (Scientific Ice Expeditions, SCICEX) [144] были обследованы хребет Ломоносова со стороны котловины Макарова, хребт Менделеева, котловины Амундсена и Макарова. Продолжением исследований по программе SCICEX стали учения ICEX (ледовые учения или Ice Exercise) [145, 146]. Научные исследования в ходе этих учений осуществляются как на борту подводных лодок, так и с временных ледовых полигонов, оборудованных обитаемым лагерем. Учения ICEX проводятся раз в два года, последнее состоялось в 2020 году.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в сфере разработки геоакустических технологий для фундаментальных и прикладных исследований в Арктике основное внимание уделяется вопросам развития автономных систем наблюдений (в том числе — роботизированных), способных решать задачи долговременного мониторинга заданных районов. Полученные таким образом данные могут быть использованы при построении прогностических моделей, например, для наложения априорных ограничений на результаты численных экспериментов. Отдельные элементы развиваемой глобальной системы наблюдений в Северном Ледовитом океане уже развернуты и используются в климатологии. При этом наиболее перспективными из существующих методов и средств мо-

нитинга природной среды в Арктике представляются системы, основанные на совместном применении автономных подводных аппаратов и вмораживаемых в лед дрейфующих антенных систем с возможностью привлечения данных дистанционного зондирования.

Отметим тенденцию расширения применения автономных измерительных систем. Традиционно для полярных исследований применялись лебедки с последующими работами с поверхности льда в условиях обитаемого базового лагеря, что, естественно, ограничивало время проведения экспериментов. Использование автоматизированных и автономных систем геофизических инструментальных наблюдений позволяет проводить значительно более продолжительные эксперименты в труднодоступных районах, а системы телеметрии и дистанционного доступа к данным выводят на качественно новый уровень вопросы технологического обеспечения научно-исследовательских работ. Основой повышения эффективности дальнейших исследований призваны стать современные научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки в области теоретического и экспериментального изучения всей совокупности сейсмогидроакустических волновых процессов в условиях Арктики.

Разработка новых методов сейсмогидроакустического мониторинга арктических акваторий закономерно основывается на новейших результатах фундаментальных научных исследований взаимосвязанных волновых процессов в системе “литосфера—гидросфера—ледовый покров—атмосфера”. Геоакустические и гидроакустические поля, порождаемые наведенными геодинамическими процессами в сложно построенной геофизической среде, несут полезную информацию, позволяющую развивать новые технологии пассивного мониторинга локальных неоднородностей и запасов углеводородов, как на шельфе, так и в других, покрытых сплошным ледовым покровом районах Северного Ледовитого океана. В качестве инструментальной базы для новых технологий круглогодичного мониторинга арктического шельфа перспективным является использование распределенных антенных систем ледового класса, обеспечивающих широкополосный прием векторно-фазовой структуры волнового поля.

Представленный обзор результатов многолетних исследований отечественных и зарубежных научных коллективов свидетельствует в пользу возможности создания принципиально новой технологии мониторинга Северного Ледовитого океана, включающей разведку и доразведку месторождений полезных ископаемых на Арктическом шельфе. На сегодняшний день теоретически и экспериментально обоснована возможность изучения глубинного строения геофизической среды в пас-

сивном режиме, основанная на новых принципах — не взрывать и принимать, а “слушать” и накапливать. При этом вопросы практической реализации развиваемой технологии неразрывно связаны с процессом разработки инструментальной базы, в том числе и отдельного класса сейсмогидроакустической аппаратуры, созданной на основе новых физических принципов молекулярной электроники.

Перспективы развития системы мониторинга северных акваторий связаны, по всей видимости, с созданием единой комплексной системы наблюдений, основными элементами которой станут вмораживаемые дрейфующие антенны ледового класса и автономные подводные аппараты, объединенные акустическими и иными каналами связи в единое информационное пространство. Представляется, что ключевыми элементами системы станут: сеть автономных измерительных устройств для круглогодичных наблюдений; центры сбора и обработки больших данных для формирования единой модели арктического региона, описывающей основные гео-гидрофизические параметры в режиме, близком к реальному времени; регулярные натурные эксперименты, направленные на совершенствование и верификацию разрабатываемых моделей в интересах практического применения научно-технических результатов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-15-50114.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дынкин А.А. Международное сотрудничество в Арктике: риски и возможности // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 5–6. С. 404–412.
2. Преодолевая холод. Интересы и политика стран Азиатско-Тихоокеанского региона в Арктике: вызовы и возможности для России / Под ред. Ларина В.Л. и Песцова С.К. Владивосток: ИИАЭ ДВО РАН, 2017. 400 с.
3. Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Соколов С.Д., Шипилов Э.В. Геодинамическая модель развития Арктического бассейна и примыкающих территорий для мезозоя и кайнозоя и внешняя граница континентального шельфа России // Геотектоника. 2013. № 1. С. 3–35.
4. Артюшков Е.В., Чехович П.А. Хребет Ломоносова и Восточно-Арктический шельф — части единой литосферной плиты. Опыт сравнительного анализа строения сдвиговых зон // Докл. Акад. наук. 2017. Т. 474. № 2. С. 196–200.
5. Лаверов 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. Т. 22. № 2. С. 4–13.
6. Ампилов Ю.П., Владов М.Л., Токарев М.Ю. Технологии морской сейсморазведки в широком частотном диапазоне: проблемы и возможности // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54. № 4. С. 42–65.
7. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С. О локализации геологических отдельных арктического шельфа на основе анализа модовой структуры сейсмоакустических полей // Докл. Акад. наук. 2018. Т. 479. № 1. С. 80–83.
8. Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С. Новые методы сейсмоакустического мониторинга в условиях Арктического шельфа // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2017. № 1. С. 108–113.
9. Фортвов В.Е. Научно-технические проблемы освоения Арктики // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 5–6. С. 397–400.
10. Mikhalevsky P.N., Gavrilov A.N., Baggeroer A.B. The transarctic acoustic propagation experiment and climate monitoring in the Arctic // IEEE J. Ocean. Eng. 1999. V. 24. № 2. P. 183–201.
11. Чепурин Ю.А. Эксперименты по подводной акустической томографии // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 3. С. 451–476.
12. Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Ньюбом А.А. Автоколебания в дрейфующем ледяном покрове Северного Ледовитого океана // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 3. С. 122–138.
13. Vihma T., Uotila P., Sandven S. et al. Towards an advanced observation system for the marine Arctic in the framework of the Pan-Eurasian Experiment (PEEX) // Atmospheric Chemistry and Physics. 2019. V. 19. P. 1941–1970.
14. Mikhalevsky P.N., Sagen H., Worcester P.F. et al. Multipurpose acoustic networks in the integrated Arctic Ocean observing system // Arctic. 2015. P. 11–27.
15. Howe B.M., Miksis-Olds J., Rehm E., Sagen H., Worcester P.F., Haralabus G. Observing the oceans acoustically // Frontiers in Marine Science. 2019. V. 6. P. 426.
16. Joseph J.E., Reeder D.B., Olson D.R. Characteristics of the Arctic environment in the southern Beaufort Sea from Ice Exercise data // J. Acoust. Soc. Am. 2018. V. 144. № 3. P. 1695–1695.
17. Chen R., Schmidt H. Characterization of arctic ambient noise environment // J. Acoust. Soc. Am. 2017. V. 141. № 5. P. 3532–3532.
18. Писарев С.В. Опыт применения автоматических дрейфующих устройств для исследования водной толщи и ледового покрова Арктики в начале XXI в. // Арктика: экология и экономика. 2012. Т. 4(8). С. 66–75.
19. Rigor I.G. Research, Coordination, Data Management and Enhancement of the International Arctic Buoy Programme (IABP). US Interagency Arctic Buoy Programme (USIABP). Contribution to the IABP. University of Washington Applied Physics Laboratory. Seattle United States, 2019.
20. Lee C., Melling H., Eicken H. et al. Autonomous platforms in the arctic observing network // Proceedings of Ocean Obs09: Sustained Ocean Observations and Information for Society. 2010. V. 2. ESA Publication WPP-306.

21. *Dushaw B.D., Sagen H.* A comparative study of moored/point and acoustic tomography/integral observations of sound speed in Fram Strait using objective mapping techniques // *J. Atm. Ocean. Tech.* 2016. V. 33. № 10. P. 2079–2093.
22. *Geyer F., Sagen H., Cornuelle B., Mazloff M.R., Vazquez H.J.* Using a regional ocean model to understand the structure and variability of acoustic arrivals in Fram Strait // *J. Acoust. Soc. Am.* 2020. V. 147. № 2. P. 1042–1053.
23. <http://iabp.apl.washington.edu>, <https://iqoe.org>, <http://psc.apl.uw.edu>
24. Морская сейсморазведка / Под ред. Телегина А.Н. М.: ООО “Геоинформмарк”, 2004. 237 с.
25. *Рогожин Е.А., Антоновская Г.Н., Капустян Н.К.* Современное состояние и перспективы развития системы сейсмического мониторинга Арктики // *Вопросы инженерной сейсмологии.* 2015. Т. 42. № 1. С. 58–69.
26. *Маловичко А.А., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А.* Развитие систем геофизического мониторинга в Арктике // *Арктика: экология и экономика.* 2014. № 2. С. 16–23.
27. *Черных Д.В., Юсупов В.И., Саломатин А.С., Космач Д.А., Константинов А.В., Силионов В.И., Мазуров А.К., Салюк А.Н., Шахова Н.Е., Густафсон О., Колубакин А.А., Гершелис Е.В., Лобковский Л.И., Семилетов И.П.* Новый акустический метод количественной оценки пузырькового потока метана в системе донные отложения – водная толща и его реализация на примере Моря Лаптевых, Северный Ледовитый океан // *Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* 2018. Т. 329. № 11. С. 153–167.
28. *Литвак А.Г.* Акустика глубоководной части Северного Ледовитого океана и Арктического шельфа России // *Вестник РАН.* 2015. Т. 85. № 5–6. С. 449–463.
29. *Wadhams P.* Arctic ice cover, ice thickness and tipping points // *AMBIO.* 2012. V. 41. № 1. P. 23–33.
30. *Мохов И.И.* Современные изменения климата Арктики // *Вестник РАН.* 2015. Т. 85. № 5–6. С. 478–485.
31. *Конторович А.Э.* Пути освоения ресурсов нефти и газа российского сектора Арктики // *Вестник РАН.* 2015. Т. 85. № 5–6. С. 420–431.
32. *Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Стромков А.А., Таланов В.И., Хилько А.И.* Экспериментальное исследование возможностей сейсмоакустического зондирования морского дна когерентными импульсными сигналами // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 2. С. 227–236.
33. *Калинина В.И., Смирнов И.П., Хилько А.И., Курин В.В., Хилько А.А.* Восстановление параметров морского дна при когерентном сейсмоакустическом зондировании. III. Накопление сигналов и подавление шумов // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 1. С. 10–21.
34. *Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С.* Исследование геоакустических полей – физическая основа мониторинга локальных неоднородностей и запасов углеводородов в Арктике // *Известия РАН. Серия физическая.* 2018. Т. 82. № 5. С. 565–571.
35. *Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Груздев П.Д., Игнатьев В.И., Коньков А.И., Мореев А.Ю., Тарасов А.В., Шувалов А.А., Шуруп А.С.* Томографическая оценка параметров водоема при наличии ледового покрова с использованием сейсмоакустических излучателей // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 5. С. 688–698.
36. *Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Агафонов В.М., Собисевич Л.Е.* Вмораживаемый автономный геоакустический буй нового поколения // *Наука и технологические разработки.* 2018. Т. 97. № 1. С. 25–34.
37. *Яновская Т.Б., Лыскова Е.Л., Королева Т.Ю.* Радиальная анизотропия верхней мантии Европы по данным поверхностных волн // *Физика Земли.* 2019. № 2. С. 3–14.
38. *Koulakov I., Jaxybulatov K., Shapiro N.M., Abkadyrov I., Deev E., Jakovlev A., Kuznetsov P., Gordeev E., Chebrov V.* Asymmetric caldera-related structures in the area of the Avacha group of volcanoes in Kamchatka as revealed by ambient noise tomography and deep seismic sounding // *J. Volcanology and Geothermal Res.* 2014. V. 285 P. 36–46.
39. *Mordret A., Landès M., Shapiro N.M., Singh S.C., Roux P.* Ambient noise surface wave tomography to determine the shallow shear velocity structure at Valhall: depth inversion with a Neighbourhood Algorithm // *Geophys. J. Int.* 2014. V. 198. № 3. P. 1514–1525.
40. *Сергеев С.Н., Шуруп А.С., Годин О.А., Веденев А.И., Гончаров В.В., Муханов П.Ю., Заботин Н.А.* Выделение акустических мод во Флоридском проливе методом шумовой интерферометрии // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 1. С. 73–83.
41. *Yarina M., Katsnelson B., Qin J., Godin O.A., Tan T.W.* Geoaoustic inversion using cross correlation function of low-frequency ambient noise in the Shallow Water 2006 Experiment // *J. Acoust. Soc. Am.* 2018. V. 144. № 3. P. 1973–1973.
42. *Li F., Yang X., Zhang Y., Luo W., Gan W.* Passive ocean acoustic tomography in shallow water // *J. Acoust. Soc. Am.* 2019. V. 145. № 5. P. 2823–2830.
43. *Munk W., Worcester P., Wunsch C.* Ocean Acoustic Tomography. Cambridge University Press, 1995. 433 p.
44. *Nolet G.* A Breviary of seismic tomography. Cambridge Univ. Press, 2008. 344 p.
45. *Гончаров В.В., Зайцев В.Ю., Куртенов В.М., Нечаев А.Г., Хилько А.И.* Акустическая томография океана. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997. 255 с.
46. *Curtis A., Gerstoft P., Sato H., Snieder R., Wapenaar K.* Seismic interferometry – Turning noise into signal // *The Leading Edge.* 2006. V. 25. № 9. P. 1082–1092.
47. *Godin O.A.* Acoustic noise interferometry in a time-dependent coastal ocean // *J. Acoust. Soc. Am.* 2018. V. 143. № 2. P. 595–604.
48. *Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H.* High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise // *Science.* 2005. 307(5715). P. 1615–1618.

49. Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Использование в пассивной томографии океана низкочастотных шумов // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 1. С. 51–61.
50. Гончаров В.В., Шуруп А.С., Годин О.А., Заботин Н.А., Веденев А.И., Сергеев С.Н., Brown M.G., Шатравин А.В. Томографическая инверсия измеренных функций взаимной корреляции шумов океана в мелкой воде с использованием лучевой теории // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 4. С. 431–441.
51. Королева Т.Ю., Яновская Т.Б., Патрушева С.С. Использование сейсмического шума для определения структуры верхней толщи Земли // Физика Земли. 2009. № 5. С. 3–14.
52. Roux P., Sabra K.G., Kuperman W.A. Ambient noise cross correlation in free space: Theoretical approach // J. Acoust. Soc. Am. 2005. V. 117. № 1. P. 79–84.
53. Godin O.A. Recovering the acoustic Green's function from ambient noise cross correlation in an inhomogeneous moving medium // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. № 5. P. 054301.
54. Snieder R., Wapenaar K. Imaging with ambient noise // Physics Today. 2010. V. 63. № 9. P. 44–49.
55. Weaver R.L., Lobkis O.I. Ultrasonics without a source: Thermal fluctuation correlations at MHz frequencies // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. № 13. P. 134301.
56. Пескин М., Шредер Д. Введение в квантовую теорию поля. Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. 784 с.
57. Claustre H., Johnson K.S., Takeshita Y. Observing the global ocean with biogeochemical-Argo // Annual Review of Marine Science. 2020. V. 12. P. 23–48.
58. Zilberman N.V., Roemmich D.H., Gilson J. Deep-Ocean Circulation in the Southwest Pacific Ocean Interior: Estimates of the Mean Flow and Variability Using Deep Argo Data // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47. № 13. e2020GL088342.
59. www.mosaic-expedition.org
60. http://www.aari.ru/transarctica2019/ta_prog.html
61. Sagen H., Sandven S., Dzieciuch M. Evolution of Multipurpose Acoustic Observatories in the Arctic // Conference: Arctic Observing Summit. November, 2018.
62. Munk W.P., Wunsch C. Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale Monitoring // Deep-Sea Res. 1979. V. 26. P. 123–161.
63. Roux P., Kuperman W.A., NPAL Group. Extracting coherent wave fronts from acoustic ambient noise in the ocean // J. Acoust. Soc. Am. 2004. V. 116. P. 1995–2003.
64. Sabra K.G., Roux P., Thode A.M., D'Spain G.L., Hodgkiss W.S., Kuperman W.A. Using ocean ambient noise for array self-localization and self-synchronization // IEEE J. Oceanic. Eng. 2005. V. 30. P. 338–347.
65. Brown M.G., Godin O.A., Williams N.J., Zabolina L., Banker G.J. Acoustic Green's function extraction from ambient noise in a coastal ocean environment // Geophys. Res. Lett. V. 41. № 15. P. 5555–5562.
66. Evers L.G., Wapenaar K., Heaney K.D., Snellen M. Deep ocean sound speed characteristics passively derived from the ambient acoustic noise field // Geophys. J. Int. 2017. V. 210. P. 27–33.
67. Lobkis O.I., Weaver R.L. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field // J. Acoust. Soc. Am. 2001. V. 110. P. 3011–3017.
68. Weaver R.L., Lobkis O.I. Elastic wave thermal fluctuations, ultrasonic waveforms by correlation of thermal phonons // J. Acoust. Soc. Am. 2003. V. 113. P. 2611–2621.
69. Snieder R. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase // Phys. Rev. E. 2004. V. 69. P. 046610.
70. Sabra K.G., Roux P., Kuperman W.A. Emergence rate of the time-domain Green's function from the ambient noise cross-correlation function // J. Acoust. Soc. Am. 2005. V. 118. P. 3524–3531.
71. Tan T.W., Godin O.A., Katsnelson B.G., Yarina M. Passive geoacoustic inversion in the Mid-Atlantic Bight in the presence of strong water column variability // J. Acoust. Soc. Am. 2020. V. 147. № 6. EL453–EL459.
72. Woolfe K.F., Lani S., Sabra K.G., Kuperman W.A. Monitoring deep-ocean temperatures using acoustic ambient noise // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 2878–2884.
73. Woolfe K.F., Sabra K.G. Variability of the coherent arrivals extracted from low-frequency deep-ocean ambient noise correlations // J. Acoust. Soc. Am. 2015. V. 138. P. 521–532.
74. Godin O.A., Zabolina N.A., Goncharov V.V. Ocean tomography with acoustic daylight // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. № 13. L13605.
75. Godin O.A., Brown M.G., Zabolina N.A., Zabolina L., Williams N.J. Passive acoustic measurement of flow velocity in the Straits of Florida // Geosci. Lett. 2014. V. 1. P. 16.
76. Буров В.А., Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Муханов П.Ю., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Выделение мод из шумового поля мелкого моря одиночными донными гидрофонами для целей пассивной томографии // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 6. С. 611–622.
77. Harrison C.H., Siderius M. Bottom profiling by correlating beam-steered noise sequences // J. Acoust. Soc. Am. 2008. V. 123. № 3. P. 1282–1296.
78. Harrison C.H., Siderius M. Adaptive passive fathometer processing // J. Acoust. Soc. Am. V. 127. № 4. P. 2193–2200.
79. Zang X., Brown M.G., Godin O.A. Waveform modeling and inversion of ambient noise cross-correlation functions in a coastal ocean environment // J. Acoust. Soc. Am. 2015. 138. № 3. P. 1325–1333.
80. Годин О.А., Кацнельсон Б.Г., Qin Jixing, Brown M.G., Заботин Н.А., Zang Xiaojin Использование обращения волнового фронта для пассивного акустического зондирования океана // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 3. С. 283–295.
81. Ball J.S., Godin O.A., Evers L.G., Lv C. Long-range correlations of microseism-band pressure fluctuations in the ocean // Geophys. J. Int. 2016. V. 206. № 2. P. 825–834.
82. Tan T.W., Godin O.A., Brown M.G., Zabolina N.A. Characterizing the seabed in the Straits of Florida by us-

- ing acoustic noise interferometry and time warping // *J. Acoust. Soc. Am.* 2019. V. 146. № 4. P. 2321–2334.
83. *Годин О.А.* О возможном использовании акустической реверберации для дистанционного зондирования динамики океана // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 1. С. 145–155.
 84. *Зверев В.А., Салин Б.М., Стромков А.А.* Определение модового состава акустического поля в мелком море при одноточечном приеме сигнала // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. № 2. С. 221–227.
 85. *Сабиров И.Р., Шуруп А.С.* Исследование фазы функции взаимной корреляции шумового поля океанического волновода // *Известия РАН. Серия физическая.* 2020. Т. 84. № 1. С. 106–109.
 86. *Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Муханов П.Ю., Сабиров И.Р., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* Исследование особенностей спектрально-корреляционных характеристик низкочастотных шумов мелкого моря для целей пассивной томографии // *Ученые записки физического факультета Московского Университета.* 2017. № 5. С. 1750113–1–1750113–4.
 87. *Воронович А.Г., Гончаров В.В., Никольцев А.Ю., Чепурин Ю.А.* Сравнительный анализ методов разложения акустического поля по нормальным волнам в волноводе: численное моделирование и натурный эксперимент // *Акуст. журн.* 1992. Т. 38. № 4. С. 661–670.
 88. *Зверев В.А., Стромков А.А., Хилько А.И.* Выделение мод сигнала в мелком море с помощью вертикальной антенной решетки // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52. № 6. С. 784–790.
 89. *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* Использование коротких искривленных вертикальных антенн в акустической томографии океана // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 2. С. 232–246.
 90. *Гордиенко В.А., Ильичев В.И., Захаров Л.Н.* Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Наука, 1989. 223 с.
 91. *Dosso S., Vinnins M., Heard G.* Source bearing estimation using ice-mounted geophones // *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. V. 113. № 4. P. 2213–2213.
 92. *Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Стробыкин Д.С.* Экспериментальные исследования особенностей применения векторных приемников в задачах томографии океана // *Акуст. журн.* 2007. Т. 53. № 6. С. 786–790.
 93. *Медведева Е.В., Гончаренко Б.И., Шуруп А.С.* Использование разнесенных в пространстве комбинированных приемных модулей для исследования скалярно-векторных характеристик акустического поля // *Известия РАН. Серия физическая.* 2020. Т. 84. № 2. С. 278–283.
 94. *Shurup A.S., Sergeev S.N., Goncharov V.V., Vedenev A.I., Godin O.A., Zobotin N.A., Brown M.G.* Retrieval of deterministic normal modes from cross-correlations of acoustic noise in shallow water // *Proc. of Meetings on Acoustics.* 2015. V. 24. № 1. P. 070007.
 95. *Brown M.G., Godin O.A., Zang X., Ball J.S., Zobotin N.A., Zobotina L.Y., Williams N.J.* Ocean acoustic remote sensing using ambient noise: Results from the Florida Straits // *Geophys. J. Int.* 2016. V. 206. P. 574–589.
 96. *Веденев А.И., Гончаров В.В., Муханов П.Ю., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* Совместное восстановление параметров водного слоя и дна мелкого моря методами модовой томографии // *Ученые записки физического факультета Московского университета.* 2017. № 5. С. 1750107–1–1750107–4.
 97. *Буров В.А., Демин И.Ю., Сергеев С.Н., Шуруп А.С., Щербина А.В.* Совместное восстановление совокупности характеристик океанического волновода методами акустической томографии // *Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.* 2013. № 5(1). С. 66–73.
 98. *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С., Щербина А.В.* Возможность восстановления параметров мелкого моря методами пассивной томографии по данным с донных гидрофонов // *Известия РАН. Серия физическая.* 2015. Т. 79. № 12. С. 1682–1686.
 99. *Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S., Scherbina A.V.* Acoustic tomography of shallow water with unknown relief of hard bottom // *Physics of wave phenomena.* 2013. V. 21. № 2. P. 152–157.
 100. *Кузькин В.М., Луньков А.А., Переселков С.А.* Частотные смещения максимумов звукового поля, вызванные интенсивными внутренними волнами // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 3. С. 342–349.
 101. *Кузькин В.М., Переселков С.А.* Восстановление внутренних волн в океанических волноводах // *Акуст. журн.* 2009. Т. 53. № 5. С. 395–400.
 102. *Novikov R.G.* Rapidly converging approximation in inverse quantum scattering in dimension 2 // *Physics Letters A.* 1998. V. 238. № 2–3. P. 73–78.
 103. *Буров В.А., Шуруп А.С., Зотов Д.И., Румянцева О.Д.* Моделирование функционального решения задачи акустической томографии по данным от квазиточечных преобразователей // *Акуст. журн.* 2013. Т. 59. № 3. С. 391–407.
 104. *Шуруп А.С., Румянцева О.Д.* Совместное восстановление скорости звука, поглощения и течений функциональным алгоритмом Новикова-Агальцова // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 6. С. 700–718.
 105. *Буров В.А., Румянцева О.Д.* Решение двумерной обратной задачи акустического рассеяния на основе функционально-аналитических методов // *Акуст. журн.* 1992. Т. 38. № 3. С. 413–20.
 106. *Novikov R.G., Santacesaria M.* Monochromatic reconstruction algorithms for two-dimensional multi-channel inverse problems // *International Mathematics Research Notices.* 2013. V. 2013. № 6. P. 1205–1229. <https://doi.org/10.1093/imrn/rns025>
 107. *Красулин О.С., Шуруп А.С.* Численное решение трехмерной задачи адиабатической модовой томографии океана на основе функционально-аналитического алгоритма // *Известия РАН. Серия физическая.* 2020. Т. 84. № 2. С. 289–294.
 108. *Wapenaar K., Draganov D., Robertsson J.O.A.* Seismic Interferometry: History and Present Status. *Geophysics Reprint Series No. 26.* Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysics, 2008.
 109. *Яновская Т.Б.* Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. СПб.: Наука, 2015. 166 с.

110. *Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С.* Исследование возможностей пассивной томографической реконструкции параметров мелкого моря по данным натуральных измерений на поверхности льда // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 6. С. 815–818.
111. *Koulakov I., Shapiro N.* Seismic tomography of volcanoes // Encyclopedia of Earthquake Engineering. 2015. P. 3117–3134.
112. *Кулаков И.Ю.* Взгляд на процессы под вулканами через призму сейсмической томографии // Вестник РАН. 2013. Т. 83. № 8. С. 698–698.
113. *Чеботарева И.Я.* Методы пассивного исследования геологической среды с использованием сейсмического шума // Акуст. журн. 2011. 57. С. 844–853.
114. *Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Шур Д.Ю.* Активная лучевая сейсмическая томография с использованием адаптивной параметризации системой вэйвлет-функций // Физика Земли. 2011. № 4. С. 67–86.
115. *Цуканов А.А., Горбатиков А.В.* Исследование влияния вклада объемных волн на результат применения метода микросейсмического зондирования // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 2. С. 198–205.
116. *Лиходеев Д.В., Дударов З.И., Жостков Р.А., Преснов Д.А., Долов С.М., Данилов К.Б.* Исследование глубинного строения вулкана Эльбрус методом микросейсмического зондирования // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 28–32.
117. *Овсюченко А.Н., Собисевич А.Л., Сысолин А.И.* О взаимосвязи современных тектонических процессов и грязевого вулканизма на примере горы Карабетова (Таманский п-ов) // Физика земли. 2017. № 4. С. 118–129.
118. *Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S.* Model of the geoaoustic tomography based on surface-type waves // Physics of Wave Phenomena. 2016. V. 24. № 3. P. 249–254.
119. *Barmin M., Ritzwoller M., Levshin A.L.* A fast and reliable method for surface wave tomography // Pure and Applied Geophysics. 2001. V. 158. № 8. P. 1351–1375.
120. *Yang Y., Ritzwoller M.H., Levshin A.L., Shapiro N.M.* Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe // Geophys. J. Int. 2007. V. 168. № 1. P. 259–274.
121. *Lin F.C., Ritzwoller M.H., Snieder R.* Eikonal tomography: surface wave tomography by phase front tracking across a regional broad-band seismic array // Geophys. J. Int. 2009. V. 177(3). P. 1091–1110.
122. *Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., Levshin A.L., Lin F., Moschetti M.P., Shapiro N.M., Yang Y.* Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements // Geophys. J. Int. 2007. V. 169. № 3. P. 1239–1260.
123. *Дрознина С.Я., Шапиро Н.М., Дроздин Д.В., Сенюков С.Л., Чебров В.Н., Гордеев Е.И.* Скоростные модели поперечных волн для отдельных районов п-ва Камчатка по кросс-корреляциям сейсмического шума // Физика земли. 2017. № 3. С. 23–32.
124. *Bowden D.C., Kohler M.D., Tsai V.C., Weeraratne D.S.* Offshore Southern California lithospheric velocity structure from noise cross-correlation functions // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2016. V. 121. № 5. P. 3415–3427.
125. *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. V. 131. № 1. P. 80–91.
126. *Marsan D., Weiss J., Moreau L., Gimbert F., Doble M., Larose E., Grangeon J.* Characterizing horizontally-polarized shear and infragravity vibrational modes in the Arctic sea ice cover using correlation methods // J. Acoust. Soc. Am. 2019. V. 145. № 3. P. 1600–1608.
127. *Moreau L., Boué P., Serripieri A., Weiss J., Hollis D., Pondaven I. et al.* Sea ice thickness and elastic properties from the analysis of multimodal guided wave propagation measured with a passive seismic array // J. Geophys. Res.: Oceans. 2020. V. 125. № 4. P. e2019-JC015709.
128. *Заславский Ю.М., Заславский В.Ю.* Численное моделирование гидро- и сейсмоакустических волн на шельфе // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 4. С. 499–507.
129. *Собисевич А.Л., Разин А.В.* Геоакустика слоистых сред. ИФЗ РАН, 2012. 210 с.
130. *Собисевич А.Л.* Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Т. 1. М.: ИФЗ РАН, 2012. 511 с.
131. *Петухов Ю.В., Разин А.В., Собисевич А.Л., Куликов В.И.* Сейсмоакустические и акустико-гравитационные волны в слоистых средах. ИФЗ РАН, 2013. 280 с.
132. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 226 с.
133. *Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г.* Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 191 с.
134. *Преснов Д.А., Жостков Р.А., Гусев В.А., Шуруп А.С.* Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 4. С. 426–436.
135. *Дмитриченко В.П., Преснов Д.А., Руденко О.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Сухонаров П.Д., Тихоцкий С.А., Шуруп А.С.* Патент №2646528. Способ поиска полезных ископаемых на шельфе морей, покрытых льдом. Патентообладатель: ИФЗ РАН. Опубликовано: 05.03.2018. Бюл. № 7.
136. *Груздев П.Д., Дмитриченко В.П., Жостков Р.А., Кочедыков В.Н., Руденко О.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Сухонаров П.Д.* Патент № 2517780. Способ поиска углеводородов на шельфе северных морей. Патентообладатель: Российская Федерация в лице Министерства промышленности и торговли Российской Федерации (RU). Опубликовано: 27.05.2014.
137. <https://nsf.gov>, <https://apl.washington.edu>, <https://arcticobserving.org>, <https://nsidc.org>, <https://arctic.gov>
138. *Мотыжев С.В., Лунев Е.Г., Толстошеев А.П.* Опыт применения автономных дрейфтеров в системе наблюдений ледовых полей и верхнего слоя океана в Арктике // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 2. С. 54–68.
139. *Richter-Menge J.A., Perovich D.K., Elder B.C., Claffey K., Rigor I., Ortmeier M.* Ice mass-balance buoys: a tool for measuring and attributing changes in the thickness

- of the Arctic sea-ice cover // *Annals of Glaciology*. 2006. V. 44. P. 205–210
140. *Planck C.J., Whitlock J., Polashenski C., Perovich D.* The evolution of the seasonal ice mass balance buoy // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. V. 165. P. 102792.
141. *Timmermans M.-L., Toole J., Proshutinsky A., Krishfield R., Plueddemann A.* Eddies in the Canada Basin, Arctic Ocean, observed from ice-tethered profilers // *J. Physical Oceanography*. 2008. V. 38. № 1. P. 133–145.
142. *Toole J., Krishfield R., Timmermans M-L., Proshutinsky A.* The ice-tethered profiler: Argo of the Arctic // *Oceanography*. 2011. V. 24. № 3. P. 126–135.
143. <http://www.whoi.edu>
144. *Smith J.N., Ellis K.M., Boyd T.* Circulation features in the central Arctic Ocean revealed by nuclear fuel re-processing tracers from Scientific Ice Expeditions 1995 and 1996 // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 1999. V. 104. № 12. P. 29663–29677.
145. *Poulsen A.J., Schmidt H.* Acoustic noise properties in the rapidly changing Arctic Ocean // *Proc. Meetings on Acoustics*. Acoust. Soc. Am. 2016. V. 28. P. 070005.
146. *Mahoney A.R., Richter-Menge J., Basu S., Bhatt U.S., Bretschneider B., Eicken H., Motz E., Shapiro L.H., Tavernia J., Walsh J.E.* Sea ice science decision support during ICEX 2018 // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2018*. PA23G–1061.