

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-295-309>

УДК 532.591; 551.326.1



**Апробация сейсмоакустического метода
мониторинга параметров ледяного покрова
на архипелаге Земля Франца-Иосифа**

Д.А. Преснов¹✉, А.Б. Тимофеева²

¹ ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук,
Москва, Россия

² ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

✉presnov@physics.msu.ru

ДАП, 0000-0002-1856-7131; АБТ, 0000-0002-0566-6149

Аннотация. В работе проанализированы данные натурного сейсмоакустического эксперимента с много-канальной группой геофонов, размещенных на припайном льду острова Александры архипелага Земля Франца-Иосифа, в рамках комплексной экспедиции Русского географического общества. Продемонстрирована принципиальная возможность использования изгибно-гравитационных волн, распространяющихся в плавучем ледяном покрове, для оценки его характеристик, как в активном режиме, так и путем анализа естественных шумов. Результаты восстановления параметров льда, полученные неразрушающим образом с использованием сейсмоакустических волн и усредненные вдоль протяженных профилей, сопоставлены с данными прямых контактных измерений.

Ключевые слова: изгибно-гравитационные волны, Земля Франца-Иосифа, сейсмоакустика, толщина морского льда, фоновый шум

Для цитирования: Преснов Д.А., Тимофеева А.Б. Апробация сейсмоакустического метода мониторинга параметров ледяного покрова на архипелаге Земля Франца-Иосифа. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(3):295–309. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-295-309>

Поступила 16.04.2024

После переработки 28.06.2024

Принята 01.07.2024

**Field trial of a seismoacoustic method
for ice cover parameters monitoring
on the Franz Josef Land archipelago**

Dmitriy A. Presnov¹✉, Anna B. Timofeeva²

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia

✉presnov@physics.msu.ru

ДАП, 0000-0002-1856-7131; АБТ, 0000-0002-0566-6149

Abstract. Among the physical parameters of the freezing sea ice cover, ice thickness is of key importance, and its measurement is one of the most important tasks. The increased interest in the state of the sea ice cover as an indicator of global climatic changes, as well as the growth of comprehensive development of the Arctic shelf has caused intensive development of technical and methodological bases for ice observations. Despite the great variety of approaches to ice thickness estimation, all of them are not without weaknesses. Thus, most contact methods imply direct human presence, which significantly complicates the procedure, taking into account, among other factors, the rough weather conditions of the Arctic. Remote methods depend on weather conditions and cannot always provide high spatial resolution. In this connection, it is promising to use satellite observations coupled with the results of autonomous “ground” measurements, which can be seismoacoustic data containing information on the characteristics of elastic waves propagating in the ice-covered sea, is promising. The purpose of this work is to experimentally test a new passive method for monitoring ice cover parameters along long profiles based on the analysis of natural seismoacoustic fields. The article analyzes the data of a full-scale seismoacoustic experiment with a multichannel group of geophones placed on the floating ice of Alexandra Island in the Franz Josef Land archipelago within the framework of a complex expedition of the Russian Geographical Society. The demonstrates that it is in principle possible to use flexural-gravity waves propagating in the floating ice to estimate its characteristics, both in the active mode and by analyzing the ambient noise, is demonstrated. The results of ice parameter reconstruction obtained in a nondestructive manner using seismoacoustic waves and averaged over long profiles are compared with the data of direct contact measurements. This can be further used for monitoring seasonal and multiyear variability of sea ice thickness of freezing seas, including shelf zones.

Keywords: ambient noise, flexural-gravity, Franz Josef Land, sea ice thickness, seismoacoustics

For citation: Presnov D.A., Timofeeva A.B. Field trial of a seismoacoustic method for ice cover parameters monitoring on the Franz Josef Land archipelago. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(3):295–309. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-295-309>

Received 16.04.2024

Revised 28.06.2024

Accepted 01.07.2024

Введение

Среди физических параметров ледяного покрова замерзающих водоемов ключевое значение имеет толщина льда, а ее измерение является одной из наиболее важных задач. Повышенный интерес к состоянию морского ледяного покрова как индикатора глобальных климатических изменений, а также рост всестороннего освоения арктического шельфа стал причиной интенсивного развития технических и методических основ для ледовых наблюдений. В наши дни разработаны и широко используются в практике ледовых исследований несколько методов [1]: 1) бурение льда; 2) методы эхолокации с использованием сонаров на подледных буях и лодках; 3) электромагнитные методы с использованием радиолокаторов на летательных аппаратах; 4) визуальные и телевизионные наблюдения с борта судов и ледоколов, осуществляющих ледовое плавание. Несмотря на большое разнообразие подходов к оценке толщины льда, все они не лишены недостатков. Так, большинство контактных методов подразумевают непосредственное присутствие человека, что существенно усложняет процедуру, учитывая в том числе суровые погодные условия Арктики. Дистанционные методы зависят от погодных условий и не всегда могут обеспечить высокое пространственное разрешение. В связи с этим перспективным является совместное использование спутниковых наблюдений и результатов автономных «наземных» измерений, в качестве которых могут выступать сейсмоакустические данные, содержащие информацию о характеристиках упругих волн, распространяющихся в море, покрытом льдом.

Известно, что скорость сейсмоакустических волн в плавучем ледяном покрове зависит как от упругих параметров льда, так и от толщины ледяного покрова [2], что позволяет разрабатывать схемы оценки характеристик льда вдоль протяженных профилей неразрушающим методом. В частности, применяя в качестве излучателя установку сбрасываемого груза, а в качестве приемников по меньшей мере два трехкомпонентных геофона, возможно измерить скорость сейсмоакустических волн и, соответственно, оценить параметры льда вдоль трассы между датчиками [3], длина которой может превосходить сотни метров. В последние годы широкое развитие получили пассивные сейсмические и акустические технологии [4], когда в качестве источника информации о среде используются естественные шумы. Это позволяет значительно упростить техническую сторону исследований толщины льда: отказаться от мощных излучателей и вообще от присутствия человека на льду. В этом случае сейсмоакустические данные могут собираться автономными дрейфующими станциями [5, 6] и при условии оперативной обработки позволяют отслеживать изменения характеристик льда. Это в дальнейшем может быть использовано для оценки сезонной и многолетней изменчивости толщины морского льда замерзающих морей, в том числе в шельфовых зонах. Целью настоящей работы является экспериментальная проверка нового пассивного метода мониторинга параметров ледяного покрова вдоль протяженных трасс, основанного на анализе естественных сейсмоакустических полей.

Теоретические основы

Заметим, что блестящие перспективы использования упругих волн, регистрируемых сейсмометрами и наклономерами в условиях ледяного покрова, хорошо известны [7]. Это подтверждается многочисленными экспериментами в Арктике [8–10], в которых была показана возможность определения параметров волнового процесса по данным установленных на льду датчиков, однако задача определения толщины льда ранее не решалась. В отличие от известных подходов, где для локальных измерений используются резонансные свойства структур [11] или волны, проникающие в весь объем среды, в частности ультразвуковые волны [12], в настоящем исследовании рассматриваются нормальные волны — распространяющиеся вдоль границы раздела сред. В условиях покрытого льдом океана такие волны могут распространяться на десятки километров и, следовательно, формируют поле естественных шумов на льду, а значит, могут применяться для дистанционных исследований.

Для теоретического описания сейсмоакустических волн, распространяющихся в плавучем ледяном покрове, можно воспользоваться простой математической моделью в виде упругой пластины толщины h , лежащей на жидком основании, глубина которого H превосходит длину волны λ ($H/\lambda \gg 1$). В дальнейшем плотность жидкости и скорость акустических волн в ней предполагаются известными и равными $\rho_0 = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c_0 = 1500 \text{ м}/\text{с}$ соответственно. Главной особенностью модели с такой геометрией является наличие дисперсии, то есть зависимость скорости волны от частоты, которая определяется уравнением (см., например, уравнение (22.6) в [13]):

$$Dk^4 + \rho_0 g - \rho h \omega^2 - \frac{\rho_0 \omega^2}{\sqrt{k^2 - k_0^2}} = 0, \quad (1)$$

где $k = \omega/c$, $k_0 = \omega_0/c_0$ — волновое число; c — фазовая скорость; $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$ — ускорение свободного падения; $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота; ρ — плотность ледяной

пластины; $D = Eh^3/12(1 - \mu^2)$ — цилиндрическая жесткость ледяной пластины, где E , μ — модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Волны, описываемые дисперсионным уравнением (1), принято называть изгибно-гравитационными, так как их свойства определяются совместным действием силы тяжести и сил упругости со стороны плавающего ледяного покрова. Отметим, что в отечественной литературе по механике льда принято использовать другое выражение для изгибно-гравитационных волн, не учитывающее сжимаемость жидкости ($c_0 \rightarrow \infty$), которое справедливо для низких частот ($\omega \rightarrow 0$). Кроме того, в [2] получено выражение для случая мелкого моря, когда необходимо принимать во внимание параметры донных осадков. Как следует из уравнения (1), в силу упругих свойств льда волновые характеристики изгибно-гравитационных волн определяются толщиной ледяного покрова, а также коэффициентом цилиндрической жесткости. Важность таких волн обусловлена их ролью в механике льда и, особенно, способностью разрушать ледяные поля [7]. Аналитическая связь между фазовыми скоростями волн и характеристиками льда в виде дисперсионного уравнения (1) позволяет решить прямую задачу расчета модельных частотных зависимостей фазовых скоростей $c(f)$ в зависимости от параметров льда h , ρ , E и μ . Решение прямой задачи, в свою очередь, используется для восстановления характеристик льда за счет выбора тех их значений, которые обеспечивают наилучшее совпадение численно рассчитанных и экспериментально измеренных фазовых скоростей в рассматриваемом частотном диапазоне. Таким образом, встает задача экспериментального измерения дисперсии скорости изгибно-гравитационной волны, которая используется для определения параметров льда. В работе [14] было показано, что эта задача может быть решена с использованием пары отдельных широкополосных сейсмометров, установленных на льду. В этом случае упругие характеристики льда являются осредненными по длине базы, то есть по расстоянию между сейсмоприемниками. В отличие от предыдущих работ в настоящем исследовании используется многоканальная группа геофонов, расположенных на льду, что в перспективе позволит восстанавливать площадное распределение характеристик льда в месте установки.

Схема эксперимента

Материалом для данной работы послужили экспериментальные данные, полученные во время непродолжительного полевого выезда в мае 2023 г. на о. Земля Александры архипелага Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) в рамках комплексной экспедиции Русского географического общества (РГО). В экспедиции участвовали специалисты РГО, национального парка «Русская Арктика», сотрудники Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН), а также Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). Ученые военным транспортным самолетом Ан-26 были доставлены на аэродром Нагурское на о. Земля Александры и размещены на базе «Омега» национального парка «Русская Арктика». Одна из групп осуществляла изыскания на припае, в том числе этой группой были проведены измерения основных морфометрических характеристик ровного припайного льда и снежного покрова для накопления статистики по данному конкретному локальному району, а также выполнен отбор проб на исследование содержания хлорофилла «А». Вопросам климатических изменений ледовитости и других характеристик морского льда в районе ЗФИ в последние годы

уделяется повышенное внимание [15, 16]. Экспериментальное изучение упругих колебаний ледяного покрова при помощи многоканальной измерительной системы регистрации в столь высоких северных широтах было предпринято впервые.

Основу измерительной системы составляла сейсмическая станция DAQlink4, которая была настроена на функционирование в режиме непрерывного мониторинга с частотой записи 250 Гц, причем синхронизация с мировым временем обеспечивалась GPS-приемником Garmin 16x HVS. К станции был подключен сигнальный кабель, содержащий 24 приемника, расположенных на расстоянии пять метров друг от друга (рис. 1). В качестве приемников использовались вертикальные геофонны GS-ONE LF с собственной частотой 4,5 Гц, чувствительность которых составляет ~100 В/(м/с). Дополнительно для контроля окружающей обстановки применялся видеорегистратор. Приемная система была размещена на припайном льду в акватории бухты Северная о. Земля Александры на расстоянии около 500 м от берега в точке с координатами $80^{\circ}46'2''$ с. ш., $47^{\circ}39'55,2''$ в. д. Датчики устанавливались таким образом, чтобы сформировать две линейные группы, расположенные под прямым углом, причем одна из групп включала 13 геофонов, а другая 11 (рис. 1 — желтые точки). Соответственно длина каждой из линий составила 60 и 50 метров.

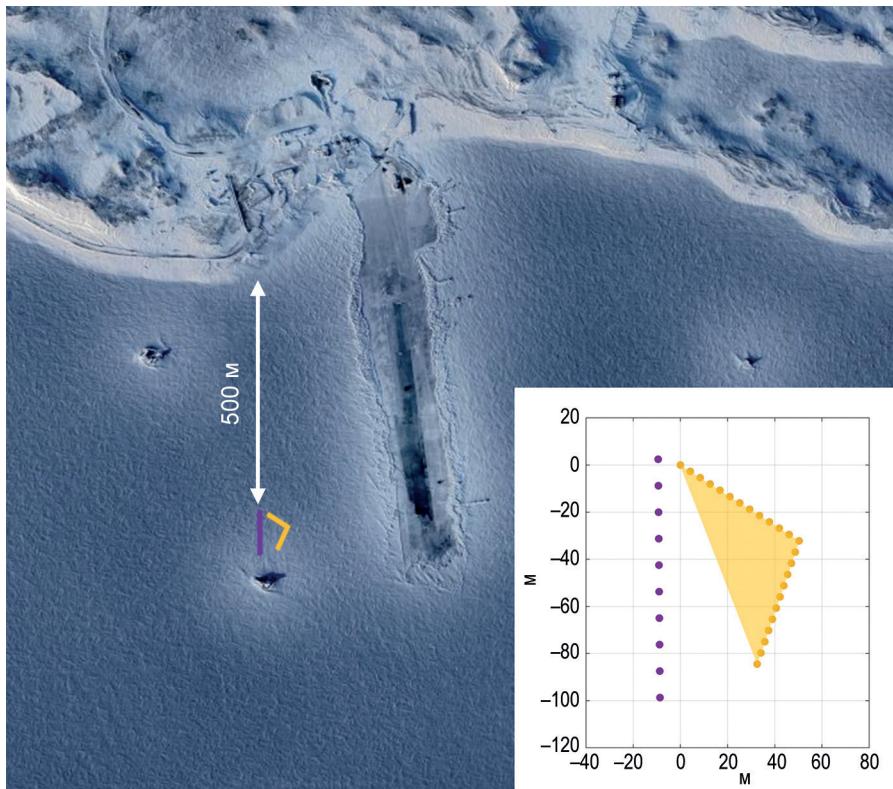


Рис. 1. Место размещения измерительной системы (обозначено желтым цветом) и ледоисследовательского профиля (обозначено фиолетовым цветом) на спутниковом снимке

Fig. 1. Location of the measurement system (yellow) and ice research profile (purple) on the satellite image

Многоканальная линейная расстановка позволяет с высокой точностью измерять фазовые скорости волн, обладающих ярко выраженной дисперсией, чего не удается достичь при использовании отдельных датчиков. Кроме того, такая схема наблюдений обеспечивает равномерное азимутальное покрытие для задачи обнаружения источника сигнала. Отметим, что по причине наличия на льду слоя снега толщиной до 20 см, а также воды на контакте льда и снега геофоны устанавливались не прямо в лед, как это было запланировано изначально, а в плотный снег максимально близко к поверхности льда, после чего присыпались снегом. В результате была получена непрерывная запись сейсмоакустических шумов различного происхождения, формирующихся в морском льду. Продолжительность измерений составила 29,5 часов с 01:40 18 мая по 07:10 19 мая местного времени.

Данные и методы

Методом контактного бурения выполнен ледомерный профиль, и осуществлен отбор ледяных кернов. Место работ выбиралось с учетом хозяйственных интересов в данном локальном районе, там, где чаще всего организуется ледовый причал для разгрузки судов, а также с учетом наилучшей пешей доступности при отсутствии возможности использовать снегоход для транспортировки людей и оборудования, приблизительно в 500 м от берега в направлении, перпендикулярном береговой линии. Длина профиля составила 100 м. Замеры морфометрических характеристик производились с шагом 10 м, всего было произведено 10 замеров (рис. 1 — фиолетовые точки). При проведении работ измерялись основные морфометрические характеристики: высота снежного покрова ($H_{\text{сн}}$), толщина льда ($H_{\text{ль}}$) и превышение поверхности льда над поверхностью воды ($\Delta H_{\text{ль}}$). Во время проведения ледомерной съемки при помощи кольцевого бура Черепанова были выпилены ледяные керны диаметром 80 мм. Длина керна, отобранныго на профиле, составила 78 см. Керн был использован для исследования физических свойств льда, а в дальнейшем для отбора проб на хлорофилл «А». Непосредственно на льду производился замер температуры льда щупом для построения вертикального профиля по горизонтам через каждые 10 см, средняя температура льда составила $\sim -2,5$ °С. Керн, распиленный на горизонты по 10 см, был расфасован в пластиковые пакеты. При помощи электронных весов измерялась масса отдельных горизонтов, а для определения объема выполнялись обмеры рулеткой. В результате была оценена зависимость плотности керна льда от глубины, средняя плотность составила $\bar{\rho} = 860 \pm 20$ кг/м³. В дальнейшем все образцы забирались со льда и растапливались в теплом помещении полностью до жидкой фазы. После того как в теплом помещении лед растаял, была замерена соленость талой воды каждого 10-сантиметрового горизонта керна для построения вертикального профиля солености, средняя соленость составила ~ 5 ‰.

В районе базы «Омега» в прибрежной части бухты Северная наблюдался достаточно ровный припайный лед, без видимых следов активных динамических процессов в виде крупных наслоений и торошений. Тем не менее под толстым слоем снега ощущалось как более ровные, так и торосистые участки, которые, очевидно, сформировались еще на ранних этапах становления припая. В местах интенсивного снегонакопления наблюдалось нарастание льда сверху за счет смачивания нижних слоев снега водой и его замерзания. В зависимости от мощности слоя снежно-водного льда происходили изменения в физических свойствах всего ледяного

покрова в данном месте. Измеренные характеристики физических свойств керна льда подтверждают высказанные выше предположения о неоднородности ледяного покрова. Распределение температуры по толщине льда примерно соответствует линейному, а распределение солености имеет особенность с нестандартным всплеском солености в верхних горизонтах. В зоне видимости находилось несколько обломков и кусков айсбергов, а у берега при выходе на припай обнаруживалась приливная трещина. Измерение превышения поверхности льда над поверхностью воды оказалось затруднительным, поскольку собственно превышение было зафиксировано всего в нескольких точках, в пределах 1–2 см. В остальных случаях наблюдался эффект, при котором из только что пробуренной лунки на поверхность льда бурно вырывалась вода, просачиваясь в окружающий снег. Схема полученных ледовых разрезов по выполненным измерениям приведена на рис. 2, где за нулевую отметку горизонта выбрана верхняя поверхность льда. В дальнейшем мы будем использовать усредненные оценки значений толщины льда $\bar{H}_\text{л} = 0,9 \pm 0,12$ м и толщины снега $\bar{H}_\text{сн} = 0,32 \pm 0,05$ м, полученные для начала суток 18 мая.

Сейсмоакустическое поле в плавучей ледяной пластине на частотах до 100 Гц формируется преимущественно тремя типами волн: продольной волной, поляризованной вдоль направления распространения (Р), поперечной волной с горизонтальной поляризацией вдоль поверхности пластины (SH) и изгибо-гравитационной волной, существующей на всех частотах. При этом продольная и поперечные волны практически не обладают дисперсией и распространяются со скоростями продольных и поперечных волн в безграничном упругом пространстве. При использовании приемника только вертикальной компоненты упругих колебаний основной вклад в измеряемое поле будет вносить изгибо-гравитационная волна. Типичный вид

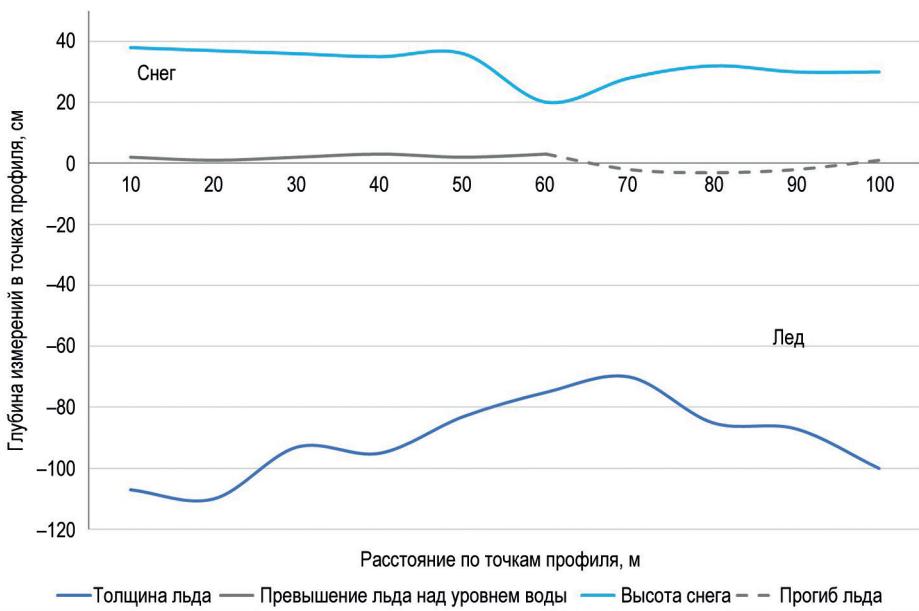


Рис. 2. Полученная прямыми измерениями схема ледоисследовательского профиля

Fig. 2. The scheme of the ice-research profile obtained by direct measurements

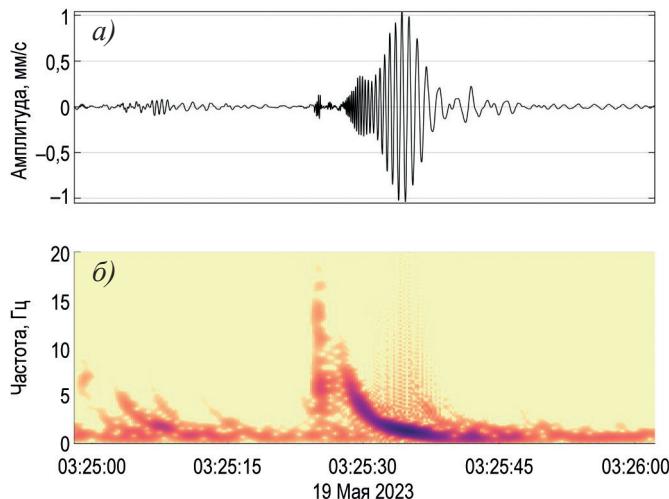


Рис. 3. Зарегистрированная вмороженным геофоном изгибно-гравитационная волна, распространяющаяся в плавучем льду (*а*) и спектрограмма этого сигнала (*б*)

Fig. 3. A flexural-gravity wave propagating in floating ice recorded by a frozen geophone (*a*) and a spectrogram of the signal (*b*)

неизвестного сигнала, зарегистрированного на припайном льду ЗФИ отдельным геофоном, длительностью одна минута представлен на рис. 3 a , где учтены передаточная характеристика и чувствительность датчика. На нижнем графике рис. 3 показана спектрограмма того же сигнала, рассчитанная при помощи оконного преобразования Фурье. Она позволяет проследить различие во времени пробега отдельных частотных составляющих волнового пакета, темные цвета соответствуют большей интенсивности сигнала. Как можно видеть, по своей форме волна на льду напоминает линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал, при этом характерной является дисперсионная зависимость скорости, соответствующая изгибно-гравитационной волне, описываемой уравнением (1). В этом случае наблюдается аномальная дисперсия — когда высокочастотные компоненты распространяются быстрее и принимаются датчиком раньше, чем низкочастотные. В отличие от нормальных волн гидроакустического волновода и волн поверхностного типа, которые имеют обратную зависимость дисперсии. По причине увеличения длительности импульса из-за дисперсии скорости в процессе распространения по спектрограмме можно грубо оценить расстояние до источника возмущения, которое в данном случае составило 517 м (что сопоставимо с расстоянием до берега).

Комплексный характер экспедиции РГО подразумевает параллельные исследования несколькими научными группами, что позволило получить данные о температуре воздуха ($-3,5^{\circ}\text{C}$) с электронного термометра, установленного внутри корпуса гео-гидроакустического буя [5], функционировавшего на берегу в нескольких километрах от ледового профиля. Отметим, что гео-гидроакустический буй изначально проектировался для применения широкополосного сейсмометра в ледовых условиях. По этой причине представляет интерес сопоставление сигналов, записанных буем и обычным геофоном. На рис. 4 представлена спектральная плотность мощности

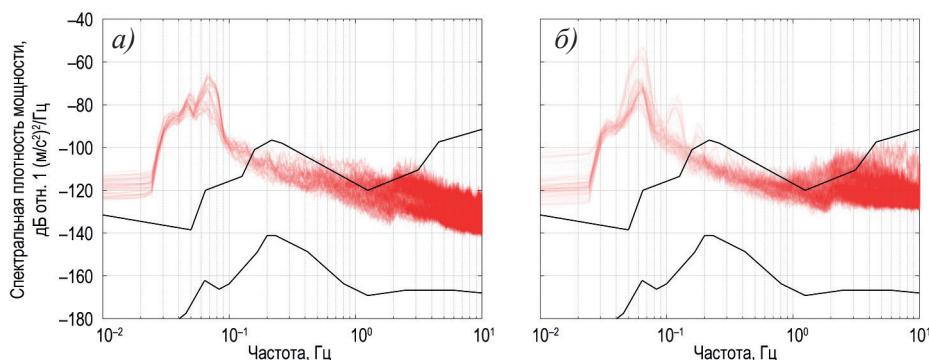


Рис. 4. Сравнение спектральных параметров сейсмоакустического шума в районе ЗФИ, регистрируемого на поверхности льда геофоном (*а*) и широкополосным сейсмометром (*б*), черным цветом показаны модели Петерсона уровней низкого (NLNM) и высокого (NHNM) сейсмического шума

Fig. 4. Comparison of the spectral parameters of seismoacoustic noise in the FJL area recorded on the ice surface by a geophone (*a*) and a broadband seismometer (*b*), the Peterson models of low (NLNM) and high (NHNM) seismic noise levels are shown in black

сейсмоакустического шума, формирующегося в ледяном покрове, который был зарегистрирован в 2023 г. при помощи вертикального геофона (рис. 4*a*) с учетом приборной характеристики и широкополосным сейсмометром (рис. 4*б*) в 2021 г. на льду в заливе Дежнёва в рамках экспедиции РГО на ЗФИ [17]. Для расчета спектральной плотности мощности использовалась вся имеющаяся запись, длительностью ~24 часа, а каждая из кривых на рис. 4 соответствует одному часу. Можно сделать вывод, что в целом спектры шумов демонстрируют сопоставимые значения и, таким образом, низкочастотный геофон не уступает сейсмометру в задаче регистрации интенсивных сейсмоакустических шумов льда. Здесь следует подчеркнуть, что применявшийся геофон обладает чувствительностью, превышающей чувствительность стандартного геофона в 5 раз, но также не требует питания. Это дополнительный фактор, который позволяет восстановить низкочастотный сигнал в области спада амплитудно-частотной характеристики прибора. При этом достаточно высокий уровень фонового шума позволяет перейти к задаче его использования в качестве полезного источника информации о строении среды.

Результаты

На первом этапе исследования рассмотрим активный режим функционирования наледной многоканальной группы. В качестве источника возмущения, генерирующего изгибно-гравитационную волну, может использоваться любое вертикальное воздействие: удар кувалдой, шаги человека и так далее. В общем случае источником такого сигнала могут служить, например, морозобойные удары естественного происхождения, связанные с возникающими в ледяном покрове напряжениями. Для определения параметров ледяной пластины сейсмоакустическим методом с использованием многоканального приема нами применялся специально сгенерированный сигнал — прыжок человека. Для оценки дисперсионной зависимости фазовой скорости использовался метод f - k анализа [4], результаты которого представлены

на рис. 5б. Можно видеть, что отношение сигнал/шум является достаточным для автоматического пикирования значений фазовой скорости. Белыми точками отмечены выбранные значения скорости $c(f)$ изгибо-гравитационной волны, которые затем будут использоваться для оценки параметров льда на основе уравнения (1). Можно сделать вывод, что ошибка полученных в активном режиме оценок фазовой скорости не превышает 3 % в среднем по рассматриваемому частотному диапазону.

Следующий этап работы — исследование применимости пассивной схемы оценки скорости изгибо-гравитационной волны с использованием многоканального приема. В этом случае в качестве полезного источника сигнала используется фоновый сейсмоакустический шум, сформированный случайными источниками естественного или антропогенного происхождения (например, как на рис. 3). Было показано [4], что взаимно-корреляционная функция сейсмоакустического шума, регистрируемого парой датчиков, при усреднении за длительный период времени может представлять функцию Грина. Тогда вклад в итоговую взаимно-корреляционную функцию будут вносить только источники, расположенные вблизи прямой, соединяющей два приемника, и она будет иметь симметричный относительно нулевого

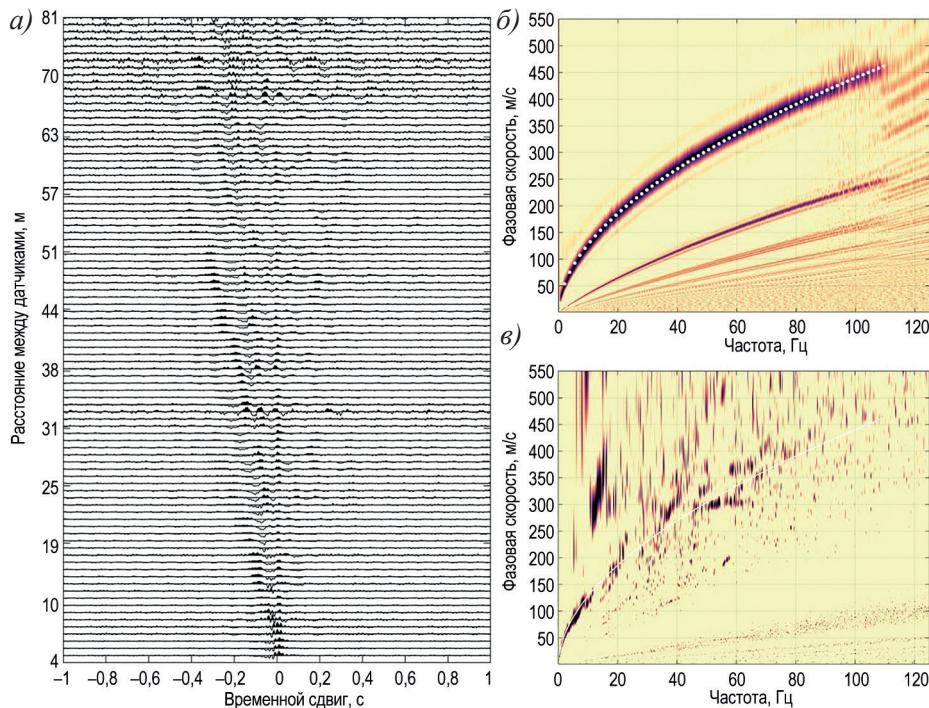


Рис. 5. Сейсмограмма многоканальной группы, полученная в пассивном режиме (а) и результат применения к этим данным f - k анализа (б), белая кривая рассчитана на основе модели льда; дисперсионное изображение, полученное в активном режиме (в), белыми точками отмечен результат пикирования изгибо-гравитационной волны

Fig. 5. Seismogram of the multichannel group obtained in the passive mode (a) and the result of applying f - k analysis to the data (б), the white curve is calculated on the basis of the ice model; dispersion image obtained in the active mode (в), the white dots indicate the result of flexural-gravity wave picking

вой временной задержки вид, что позволит в конечном счете оценить время пробега между используемой парой датчиков. Такая методика получила название сейсмической интерферометрии, а задача ее применения к данным, зарегистрированным на льду, является достаточно актуальной. При анализе многоканальных данных на предварительном этапе формируется массив всех возможных пар приемников, для которых будет рассчитываться взаимно-корреляционная функция. На основе разработанного подхода вся запись на каждом из датчиков разбивалась на интервалы длительностью 60 секунд, после чего к данным применялись специальные методы цифровой обработки сигналов — амплитудная нормализация и обеление спектра [4], привнесенные сократить влияние интенсивных локализованных источников, и уже затем вычислялись взаимно-корреляционные функции отдельных интервалов, которые на финальном этапе усреднялись за весь период накопления шумового сигнала. На рис. 5а приведен график производной функции взаимной корреляции по данным сейсмоакустического шума, зарегистрированного в течение 30 часов на припайном льду ЗФИ. Максимумы функции взаимной корреляции соответствуют временам пробега между различными парами многоканальной группы, расстояния между которыми считаются известными. Отметим, что в данном случае вид взаимно-корреляционных функций не является симметричным относительно нулевой временной задержки, как это должно быть при изотропном распределении источников шума. Для устранения этой особенности мы добавили фильтрацию отдельных взаимно-корреляционных функций до усреднения с использованием метода сингулярного разложения [18], однако существенных изменений достичь не удалось. Этот результат указывает на то, что источники ледового сейсмоакустического шума располагались в северо-западном направлении, то есть со стороны берега. По полученным данным можно оценить скорость волны, которая формирует шумовое волновое поле. На рис. 5в показано дисперсионное изображение, рассчитанное методом $f\text{-}k$ анализа по всем полученным данным и характеризующее, таким образом, некоторое усредненное по области расположения геофонов (рис. 1 — желтый треугольник) волновое поле, а следовательно, и среднее строение льда. Черным цветом на рис. 5в показана теоретическая зависимость, рассчитанная с параметрами модели, полученными в результате инверсии активных экспериментальных данных. Как можно видеть, приемлемые для определения скорости изгибо-гравитационной волны области наблюдаются лишь в частотном диапазоне до 20 Гц. Причиной такого ограничения частотного диапазона может быть как относительно слабый уровень естественного шума на высоких частотах, что не позволяет воспринимать его геофоном, так и понижение длины волны, что приводит к тому, что на ее скорость оказывают влияние локальные неоднородности, вариации которых в пределах обширной расположения (рис. 1 — желтый треугольник) многоканальной группы могут быть значительными.

Полученные в активном и пассивном режимах значения фазовой скорости $c(f)$ использовались для решения обратной задачи, в основе которой лежит минимизация функционала невязки между экспериментальной и расчетной дисперсионными кривыми скорости, который вычислялся стандартным образом как евклидова норма $\|c_{\text{эксп}}(f_i) - c(f_i; h, \rho, E, \mu)\|$, где $c_{\text{эксп}}(f_i)$ — фазовая скорость, полученная по экспериментальным данным; $c(f_i; h, \rho, E, \mu)$ — результаты численного моделирования на основе уравнения (1), которые зависят от искомых параметров льда $h, \rho, E, \mu; f_i$ — дискретизированные значения частот. В качестве метода решения обратной задачи

использовался алгоритм, разработанный нами для инверсии групповой скорости [14], получаемой в результате анализа данных отдельных пар датчиков. В случае использования фазовых скоростей, как в настоящей работе, задача несколько упрощается, так как снимается неоднозначность расчетной модельной групповой скорости из дисперсионного уравнения. При этом, так как с нельзя выразить из дисперсионного уравнения (1) аналитически, искать решение приходится в неявной форме, используя, например, стандартные итерационные методы, что требует дополнительных временных затрат. Альтернативным вариантом является аппроксимация дисперсионного уравнения (1) для изгибо-гравитационных волн простой степенной зависимостью вида $c \sim (fh)^{1/2}$, однако этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Для оценки параметров ледяного покрова применялась стохастическая инверсия и, в частности, алгоритм Метрополиса–Гастингса, который позволяет покрыть достаточно большое пространство неизвестных параметров с минимальной априорной информацией о модели. Первым этапом решения обратной задачи является параметризация модели среды — то есть выбор параметров, подлежащих оценке, и задание множества возможных значений с целью ограничения области поиска решения. На основе данных литературных источников [12, 19] были определены диапазоны изменений параметров льда h, ρ, E, μ , которые наблюдались при натурных исследованиях. Алгоритм запускался параллельно для шести различных начальных точек, выбранных случайнym образом для контроля сходимости метода решения обратной задачи. Для изучения пространства возможных моделей генерировалась выборка, содержащая 5000·6 реализаций подходящих моделей. Таким образом, был получен обширный набор параметров модели h, ρ, E, μ , удовлетворительно описывающей входные данные, в качестве которых использовались экспериментально измеренные дисперсионные кривые фазовой скорости изгибо-гравитационной волны $c(f)$ в активном и пассивном режимах. Полученная выборка значений h, ρ, E, μ позволяет оценить не только оптимальные параметры, но и ошибки их определения (см. таблицу).

Результаты оценки характеристик льда сейсмоакустическим методом показывают удовлетворительную точность восстановления для всех параметров, которая составила около 25 % в обоих режимах. Сравнение с данными ледоисследовательского профиля (рис. 3) показывает, что восстановленное сейсмоакустическим методом значение толщины льда согласуется с истинной средней толщиной. По-видимому, ледяной покров в районе проведения полевых работ являлся существенно неоднородным, в результате чего на расстоянии порядка 20 м (рис. 1) от ледоисследовательского

Таблица

**Результаты определения параметров припайного льда ЗФИ
сейсмоакустическим методом**

Table

Results of estimating FJL landfast ice parameters using the seismoacoustic method

Параметры льда	Истинные значения	Активный режим	Пассивный режим
Толщина, h , м	$0,9 \pm 0,12$	$0,76 \pm 0,2$	$0,78 \pm 0,18$
Плотность, ρ , кг/м ³	860 ± 20	893 ± 100	795 ± 106
Модуль Юнга, E , ГПа	—	$3,5 \pm 2,9$	$4,1 \pm 2,4$
Коэффициент Пуассона, μ	—	$0,34 \pm 0,02$	$0,34 \pm 0,02$

профиля со средней толщиной 0,9 м была определена средняя толщина 0,8 м. При этом необходимо учитывать, что параметры льда, определенные в активном режиме, относятся только к первой половине многоканальной группы, тогда как данные пассивного режима являются усредненными по всей области установки (рис. 1 — желтый треугольник). Отметим, что в качестве входных данных при пассивном режиме использовалась дисперсионная кривая только до частоты 20 Гц, обладающая удовлетворительным для автоматического выделения отношением сигнал/шум. Представляет интерес изучение возможности оценки площадного распределения параметров льда по данным многоканальной группы томографическим методом, когда в качестве входных данных используются времена пробега волн между отдельными парами, однако это исследование выходит за рамки настоящей работы.

Заключение

Применение многоканальной группы геофонов на льду бухты Северная острова Земля Александры архипелага Земля Франца-Иосифа в рамках комплексной экспедиции Русского географического общества позволило продемонстрировать работоспособность сейсмоакустического метода мониторинга параметров ледяного покрова в условиях Арктики, как в активном, так и в пассивном режимах. Полученные неразрушающим способом оценки толщины льда в пределах ошибок согласуются с результатами прямых контактных измерений и удовлетворяют литературным данным. Показано, что данные, полученные на льду с не требующих электропитания геофонов, в низкочастотной области не уступают широкополосным сейсмометрам. К перспективам дальнейших исследований авторы относят сокращение необходимого времени накопления шумового сигнала за счет оптимизации методов обработки и расширение анализируемого в пассивном режиме частотного диапазона за счет усиления сигнала с геофонов. Развиваемая технология мониторинга физических параметров ледяного покрова в автономном — не требующем участия человека — режиме представляется достаточно перспективной, в особенности для применения в крайне суровых условиях Арктики.

Конфликт интересов. Авторы не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Данная работа была поддержана Российским научным фондом, грант № 22-77-00067.

Благодарности. Авторы признательны участникам экспедиции Р.А. Жосткову, Р.Н. Вакарчуку, А.Н. Овсянченко и И.В. Прокоповичу за помощь в проведении работ и ценные обсуждения, а также выражают благодарность сотрудникам национального парка «Русская Арктика», департаменту экспедиционной деятельности РГО и лично Сергею Анатольевичу Чечулину за поддержку и помощь в организации полевых исследований в высоких широтах Арктики.

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. This research was funded by Russian Science Foundation, grant number 22-77-00067.

Acknowledgments. The authors are grateful to the expedition participants R. Zhostkov, R. Vakarchuk, A. Ovsyuchenko and I. Prokopovich for their assistance in conducting the fieldwork and valuable discussions, and also express their gratitude to the staff of the Russian Arctic National Park, the Department of Expeditionary Activities of the Russian Geographical Society and personally to Sergey Anatolievich Chechulin for support and assistance in organizing field research in the high latitudes of the Arctic.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Алексеева Т.А., Фролов С.В., Сероветников С.С. Обзор методов и основных результатов измерения толщины морского льда в Арктике. *Российская Арктика*. 2021;1(12):33–49. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-1-33-49>

- Alekseeva T.A., Frolov S.V., Serovetnikov S.S. Review of methods and main results of sea ice thickness measurements in the Arctic. *Russian Arctic*. 2021;1(12):33–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-1-33-49>
2. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С. О локализации геологических отдельностей арктического шельфа на основе анализа модовой структуры сейсмоакустических полей. *Доклады Академии наук*. 2018;479(1):80–83. <https://doi.org/10.7868/S0869565218070198>
 3. Sobisevich A.L., Presnov D.A., Sobisevich L.E., Shurup A.S. Localization of geological inhomogeneities on the arctic shelf by analysis of the seismoacoustic wave field mode structure. *Doklady Earth Sciences*. 2018;479:355–357. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18030108>
 4. Stein P.J., Euerle S.E., Parinella J.C. Inversion of pack ice elastic wave data to obtain ice physical properties. *J. Geophys. Res.* 1998;103(C10):21783–21793. <https://doi.org/10.1029/98JC01269>
 5. Тихоцкий С.А., Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С. Использование низкочастотных шумов в пассивной сейсмоакустической томографии дна океана. *Акустический журнал*. 2021;67(1):107–116. <https://doi.org/10.31857/S0320791921010056>
 6. Tikhotskii S.A., Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S. The use of low-frequency noise in passive seismoacoustic tomography of the ocean floor. *Acoust. Phys.* 2021;67:91–99. <https://doi.org/10.1134/S106377102101005X>
 7. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Агафонов В.М., Собисевич Л.Е. Вмораживаемый автономный геогидроакустический буй нового поколения. *Наука и технологические разработки*. 2018; 97(1):25–34. <https://static.ifz.ru/10.21455/std2018.1-3>
 8. Krylov A.A., Novikov M.A., Kovachev S.A., Roginskiy K.A., Ilinsky D.A., Ganzha O.Y., Ivanov V.N., Timashkevich G.K., Samylina O.S., Lobkovsky L.I., Semiletov I.P. Features of seismological observations in the Arctic Seas. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023; 11(12):2221. <https://doi.org/10.3390/jmse11122221>
 9. Музылев С.В. Волны в океане под ледяным покровом: основы теории и модельные задачи. В: А.В. Фролов, Ю.Д. Реснянский (ред.) *Современные проблемы динамики океана и атмосферы: Сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения проф. П.С. Линейкина*. Гидрометцентр России. М.: ТРИАДА ЛТД; 2010. С. 315–346.
 10. Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Нюбом А.А., Знаменский М.С. Механика колебаний и волн во льдах Северного Ледовитого океана при явлениях сжатия и торожения. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020;66(3):321–336. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-321-336>
 11. Smirnov V.N., Kovalev S.M., Nubom A.A., Znamenskiy M.S. Mechanics of oscillations and waves in the ice of the Arctic ocean during compression and ridging. *Arctic and Antarctic Research*. 2020;66(3):321–336. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-3-321-336>
 12. Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Шушлебин А.И., Колабутин Н.В., Знаменский М.С. Мониторинг физико-механического состояния морского льда и краткосрочное прогнозирование экстремальных ледовых явлений. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020;66(2):162–179. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-162-179>
 13. Smirnov V.N., Kovalev S.M., Shushlebin A.I., Kolabutin N.V., Znamenskiy M.S. Monitoring of the physical and mechanical state of sea ice and short-term prediction of extreme ice phenomena. *Arctic and Antarctic Research*. 2020; 66(2):162–179. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-162-179>
 14. Яковлев А.В., Ковалев С.М., Шиманчук Е.В., Шиманчук Е.В., Нюбом А.А. Сеть сейсмических станций, установленная на дрейфующих льдах: эксперимент на севере Баренцева моря. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2021;496(2):158–163. <https://doi.org/10.31857/S2686739721020213>

- Jakovlev A.V., Kovalev S.M., Shimanchuk E.V., Nubom A.A. Seismic network on drifted ice floes: a case study in north Barents Sea. *Doklady Earth Sciences*. 2021;496(2):155–159. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21020215>
11. Федин К.В., Колесников Ю.И., Нгомайезве Л. Определение толщины льда по стоячим волнам. *Процессы в геосредах*. 2019;22(4):528–533.
 12. Богородский В.В., Гаврило В.П. *Лед: Физические свойства. Современные методы гляциологии*. Л.: Гидрометеоиздат; 1980. 384 с.
 13. Хейсин Д.Е. *Динамика ледяного покрова*. Л.: Гидрометеоиздат; 1967. 216 с.
 14. Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С. Определение параметров ледового покрова с помощью сейсмоакустического шума. *Акустический журнал*. 2023;69(5):637–651. <https://doi.org/10.31857/S0320791923600385>
Presnov D.A., Sobisevich, A.L., Shurup A.S. Determination of ice cover parameters using seismoacoustic noise. *Acoust. Phys.* 2023;69:725–737. <https://doi.org/10.1134/S1063771023600341>
 15. Матишин Г.Г., Жичкин А.П. Современные тенденции изменения ледовитости в районе архипелага Земля Франца-Иосифа. *Доклады Академии наук*. 2017;472(6):708–711. <https://doi.org/10.7868/S0869565217060226>
Matishov G.G., Zhichkin A.P. Current trends of ice coverage changes in the Franz Josef Land Archipelago area. *Doklady Earth Sciences*. 2017;472(2):248–251. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17020283>.
 16. Шапкин Б.С., Рубченя А.В., Иванов Б.В., Ревина А.Д., Богрянцев М.В. Многолетние изменения ледовитости в районе архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. *Лед и снег*. 2021;61(1):128–136. <https://doi.org/10.31857/S2076673421010076>
Shapkin B.S., Rubchenia A.V., Ivanov B.V., Revina A.D., Bogryantsev M.V. Long-term changes in ice coverage in the area of the Svalbard (Spitsbergen) and Franz Josef Land archipelagos. *Ice and Snow*. 2021;61(1):128–136. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673421010076>
 17. Стартовая комплексная экспедиция РГО на архипелаг Земля Франца-Иосифа. URL: <https://ifz.ru/novosti/ruslan-zhostkov-kompleksnaya-ekspedicziya-rgo-na-arxipelag-zemlya-francza-iosifa> (accessed 21.06.2024).
 18. Moreau L., Stehly L., Boué P., Lu Y., Larose E., Campillo M. Improving ambient noise correlation functions with an SVD-based Wiener filter. *Geophysical Journal International*. 2017;211(1):418–426. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx306>
 19. Смирнов В.Н., Миронов Е.У. Исследования прочности, морфометрии и динамики льда в инженерных задачах при освоении шельфа в замерзающих морях. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2010;85(2):5–15.
Smirnov V.N., Mironov Ye.U. Investigations of strength, morphometry and dynamics of ice in engineer's tasks at development of shelf in freezing seas. *Problemy Arkтики i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2010;85(2):5–15. (In Russ.)