

Исследование акустических свойств морского льда, покрытого снегом© 2018 г. Р.А. Балакин^{1*}, Г.И. Вилков²¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия;²Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Санкт-Петербург, Россия

*rigms@aari.ru

Investigation of acoustic properties of snow-covered sea iceR.A. Balakin^{1*}, G.I. Vilkov²¹Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia;²Research and Production Enterprise «Radar mms», St. Petersburg, Russia

*rigms@aari.ru

Received November 1, 2017

Accepted March 21, 2018

Keywords: *coefficients of sound reflectivity and absorption, doppler broadening of frequency spectrum, ice hydro acoustic observations, sea ice.***Summary**

The paper presents results of field observations of hydroacoustic characteristics of snow-covered ice cover in shallow seas of the Arctic shelf. The purpose of the research was to determine the quantitative characteristics of the reflection and absorption coefficients of sound from the bottom of the drifting ice cover, as well as the Doppler broadening of the frequency spectrum of acoustic signals depending on the thickness of the ice, the structure of the reflecting surface, the thickness of the snow cover, and the ice drift speed. The objective of the research was to obtain the data necessary for choosing optimal parameters of specialized hydroacoustic equipment designed to monitor ice conditions in the areas of operation of offshore oil and gas platforms. Researches were conducted in areas of active construction of engineering marine constructions and carrying out the transport operations. The research methodology was based on the use of an autonomous measuring complex, which for a long period was installed on the bottom of the sea at depths of 50 to 130 m. The recording system consisted of the following components: upward looking pulse sonar of the IPS-5 type produced by the Canadian company ASL; the Doppler meter of the ice drift speed ADCP (the RDI firm); and a RSM-7 electromechanical current meter. All devices operated in continuous mode with a measurement cycle of 1s, the results were recorded in memory and processed after lifting the devices to the surface. The time delays of signals reflected from the ice cover, as well as the amplitudes and variations of the sound attenuation depending on the reflectance and absorption coefficients were recorded in the memory of the up-looking sonar. Variations of time delays were used to calculate a settlement of ice formations and to determine the shape of the reflective surface, including the angles of inclination of ice keels. Doppler shift of frequency of reflected acoustic signals and broadening of the frequency spectrum were calculated using values of the ice drift speed and changes of immersion depths of hummocks. Acoustic characteristics were measured repeatedly during several seasons of each year from 2010 to 2017. This investigation made possible to obtain statistical estimates of the distributions of the reflection coefficient of the sound and the quantitative values of broadening of the frequency spectrum of acoustic signals depending on the angle of incidence of the acoustic rays, the nature of the irregularities and the structure of the reflective surfaces of ice and snow cover thickness and the drift speed. The results obtained by this research allowed reasonable choosing and calculating the basic characteristics of the hydroacoustic equipment intended for runtime diagnostics of ice cover in zones of marine engineering structures.

Citation: Balakin R.A., Vilkov G.I. Investigation of acoustic properties of snow-covered sea ice. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018. 58 (3): 387–395. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-387-395.

Поступила 1 ноября 2017 г.

Принята к печати 21 марта 2018 г.

Ключевые слова: *доплеровское расширение частотного спектра, коэффициенты отражения и поглощения звука, ледовые гидроакустические наблюдения, морской лёд.*

Исследованы гидроакустические характеристики заснеженного ледяного покрова в мелководных морях арктического шельфа. Определены коэффициенты отражения и количественные значения расширения частотного спектра акустических сигналов в зависимости от характеристик морского льда со снежным покровом. Сделаны статистические оценки акустических характеристик ледяного покрова и получены значения коэффициентов отражения звука в зависимости от возрастных градиентов морского льда и толщины снежного покрова.

Введение

Влияние ледяного покрова на распространение, отражение и рассеяние акустических сигналов пока изучено недостаточно с точки зрения количественных оценок, необходимых для расчёта параметров аппаратуры для подводной телекоммуникации и дальней гидроакустической локализации айсбергов и опасных торосистых образований [1]. В справочной литературе нет достаточных сведений о коэффициенте отражения и поглощения звука от солёного морского льда, а также о количественных значениях расширения частотного спектра при отражении сигнала от дрейфующего льда. Причины недостаточной изученности акустических характеристик льда в натурных условиях обусловлены не только сложностью проведения таких экспериментов, если их вести традиционными методами с использованием научно-исследовательских судов или путём экспедиционных исследований с поверхности дрейфующего льда, но и значительной стоимостью этих работ.

Среди современных технологий морских исследований с применением автономных измерительных средств отметим вверх смотрящие акустические гидролокаторы Ice Profiling Sonar (IPS)[™] [2] канадской фирмы ASL Environmental Sciences, установленные на дне моря, и доплеровские измерители скорости дрейфа льда ADCP Workhorse Sentinel [3] (производство Teledyne RD Instruments, США). Они открывают новые возможности для исследований широкого набора ледовых характеристик, включая акустические, в течение длительного времени — до одного года и более. При проведении настоящего исследования использовались экспериментальные данные, полученные с помощью именно таких технологий.

Акустические характеристики морского льда со снежным покровом

Для данного исследования важен тот факт, что звук в мелководных морях с глубинами до 200 м всегда распространяется путём многоскачкового переизлучения сигнала с многократными переотражениями от дна и поверхности моря [4–6].

Первая важная характеристика морского льда — *поглощение и переотражение звука, вызывающее многоскачковое распространение гидро-*

акустического сигнала, обусловленное рефракцией акустических лучей. Акустические лучи в море не распространяются горизонтально, а отклоняются достаточно круто вверх или вниз в зависимости от знака и величины градиента вертикального распределения скорости звука. При каждом переотражении от границ раздела происходит частичная потеря энергии сигнала в зависимости от коэффициента отражения поверхностей. Ледяной покров резко увеличивает затухание отражённых сигналов по сравнению с отражениями от свободной водной поверхности, поскольку коэффициент зеркального отражения от чистой поверхности воды близок к 1, а коэффициент отражения от солёного морского льда может изменяться от 0,05 до 0,3 [7, 8]. Пресный лёд имеет значительно больший коэффициент отражения — порядка 0,5, а солёный морской лёд снижает коэффициент отражения из-за рыхлости и пористости его структуры, а также наличия неровностей нижней поверхности, соизмеримых по размерам с длиной волны акустического сигнала.

Ещё одна характеристика отражающих свойств льда, важная для обеспечения эффективного приёма сигналов, — *доплеровское расширение частотного спектра сигнала при отражении от дрейфующего льда.* Расширение спектра сигнала обусловлено вертикальной составляющей скорости дрейфа льда, которая вызвана изменениями глубины осадки крупных ледовых образований типа торосов при их горизонтальном перемещении в пятне акустического облучения или вертикальными волновыми колебаниями ледяного покрова при взаимодействии с ветровым волнением на чистой воде [9–11].

Доплеровское расширение частотного спектра проявляется негативно, так как при гидроакустическом зондировании, как правило, используются многочастотные сигналы с близким расположением несущих частот информационных каналов [12]. Для устойчивого и надёжного их приёма необходимо, чтобы доплеровское расширение спектра не превышало половины разделительного интервала между частотами отдельных каналов. Данное условие ограничивает допустимое количество несущих частот в отведённой ширине полосы наблюдательной системы и однозначно определяет возможную информативность гидроакустической аппаратуры в зависимости от величины доплеровского расширения

спектра, обусловленного дрейфом льда и характером рельефа его нижней поверхности. Ветровое волнение в разводах между ледяными полями вызывает аналогичное расширение доплеровского частотного спектра акустических сигналов.

Физические аспекты отражения звука от ледяного покрова

Для адекватной интерпретации результатов эксперимента необходимо различать физические причины, которыми обусловлены параметры гидроакустического отражённого, рассеянного и поглощённого сигналов. При анализе следует руководствоваться известными закономерностями отражения звука от поверхности твёрдого тела. Согласно теории распространения звука в многослойной среде [13], при анализе отражательных свойств ледяного покрова лёд рассматривается как трехслойная среда с различными значениями волнового сопротивления $w = \rho c$ для каждого слоя, где ρ и c — соответственно плотность и скорость распространения звука в слое льда. *Нижний слой солёного морского льда* имеет, как правило, рыхлую ажурную структуру с волновым сопротивлением, близким к сопротивлению морской воды, и скоростью распространения звука порядка 1600 м/с, незначительно превышающей скорость распространения звука в воде. *Средний слой* представляет собой твёрдый консолидированный лёд со скоростью распространения звука в диапазоне 2800–3000 м/с, и он имеет удвоенное по отношению к воде волновое сопротивление. *Верхний заснеженный слой* льда имеет несколько меньшее волновое сопротивление из-за низкой плотности снега, но значительно большее затухание звука, обусловленное внутренним трением в снежном покрове.

Коэффициент отражения акустического сигнала при нормальном угле падения акустических лучей на ровную поверхность льда R_0 выражается формулой

$$R_0 = (\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1) / (\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1), \quad (1)$$

где $\rho_1 c_1$ и $\rho_2 c_2$ — соответственно волновое сопротивление воды и льда.

Согласно формуле (1), часть энергии луча отражается в обратном направлении, а оставшаяся часть проходит через границу раздела внутрь льда

и им поглощается. Отражение звука от верхней границы заснеженного льда, как правило, весьма незначительно из-за несогласованности волновых сопротивлений льда и снега. Если волновое сопротивление нижнего слоя льда w_3 имеет промежуточное значение между величинами сопротивления воды и консолидированной части льда и удовлетворяет равенству $w_3 = (\rho_2 c_2 \cdot \rho_1 c_1)^{0.5}$, то происходит согласование волновых сопротивлений воды и основной массы льда, при котором коэффициент отражения звука равняется нулю и вся энергия сигнала проходит через границу раздела без отражения. Этот эффект согласования сопротивлений двух сред аналогичен известному «просветляющему» слою в оптике и имеет большое практическое значение. Наличие рыхлого ажурного слоя морского льда на нижней границе ледяного покрова приводит к быстрому затуханию акустического сигнала при многоскачковом распространении и резко снижает информативность наблюдательной системы.

В случае наклонного падения акустических лучей на границу раздела сред возникает как отражённая, так и преломлённая волна, которая распространяется внутри льда. При этом углы падения, преломления и отражения подчиняются известному закону Снеллиса:

$$\frac{c_1}{\sin \alpha_1} = \frac{c_2}{\sin \alpha_2} = \frac{c_3}{\sin \alpha_3}, \quad (2)$$

где c_1, c_2, c_3 — соответственно скорость распространения звука в воде и в двух примыкающих слоях льда; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — соответственно углы падения, отражения и преломления.

Из соотношения (2) вытекает первое важное следствие, согласно которому существует явление *полного внутреннего отражения*, если луч падает на границу раздела под некоторым углом α_2 , при котором выполняется следующее условие: если $\sin \alpha_2 = 1$, то $\alpha_2 = 90^\circ$. Преломлённый луч в этом случае внутрь льда не распространяется и не отражается, а скользит по границе раздела.

Существует второй значимый эффект отражения акустического сигнала от поверхности льда, который необходимо учитывать при оценке коэффициента отражения. Он заключается в том, что при наклонном падении луча *в твёрдом теле образуются продольная и поперечная звуковые волны*, скорости распространения которых определяются модулем продольной упругости

Юнга и модулем сдвига Пуассона, отличающихся друг от друга примерно в два раза. Поперечная волна вызывает на поверхности льда поверхностную волну Рэлея, которая полностью переходит в воду и обуславливает существование второго критического угла падения с нулевым значением коэффициента отражения. Величина этого угла определяется выражением

$$\theta = \arcsin \sqrt{\rho_2 c_2 - \rho_1^2 c_1^2 / c_2^2 (\rho_2^2 - \rho_1^2)},$$

где θ — критический угол поперечной волны; ρ_1 , ρ_2 — соответственно плотность воды и льда; c_1 , c_2 — соответственно скорость распространения звука в воде и скорость поперечной волны.

При критическом угле падения θ коэффициент отражения обращается в нуль, а вся падающая энергия луча переходит в лёд. Дополнительные ограничения коэффициента отражения звука вызывают неровности отражающей поверхности льда в форме выступающих вниз клиновидных образований. Если высота этих образований соизмерима с длиной падающей волны, то происходит поглощение звука подобно клиновидной поглощающей поверхности в заглушённых акустических бассейнах. Остаточная часть сигнала, не полностью поглощённая неровностями, испытывает рассеяние во всех направлениях, что нарушает когерентность отражённой части сигнала. Зависимость коэффициента отражения от угла рассеяния на неоднородностях отражающей поверхности в отличие от когерентного зеркального отражения описывается законом Ламберта в пределах угла падения около 60° . Нарушение когерентности ограничивает возможность фазовой модуляции сигнала в канале связи, что дополнительно снижает информационную способность системы.

Третья значимая часть искажений отражённого сигнала характеризуется *доплеровским расширением частотного спектра*. Доплеровское смещение частоты и фазы отражённого сигнала обусловлено только вертикальной составляющей скорости отражающей поверхности. Горизонтальная скорость дрейфа ровных ледяных полей не вызывает доплеровского сдвига частоты, так как отражённый от ровного льда звуковой луч не меняет свою траекторию и поэтому сохраняет неизменными фазу и частоту акустического сигнала.

Вертикальные колебания отражающей поверхности льда, вызывающие знакоперемен-

ные доплеровские сдвиги частоты, обусловлены двумя причинами: волновым движением ледяного покрова, аналогично ветровым волнам на воде, и изменениями осадки льда в ходе дрейфа, связанными с крупногабаритными ледовыми образованиями типа торосов. Величина расширения частотного спектра рассчитывается по высоте килей крупных ледовых образований, достигающей десятков метров, и по скорости дрейфа льда, в среднем составляющей от 20 до 50 см/с. Таким образом, на параметры отражённого сигнала негативно влияют следующие акустические характеристики ледяного покрова: а) наличие двух критических углов падения с нулевым коэффициентом отражения; б) присутствие ажурного рыхлого слоя солёного льда с неблагоприятным значением волнового сопротивления; в) поглощение звука клиновидными неровностями нижней поверхности льда; г) доплеровское расширение частотного спектра от волновых вертикальных колебаний льда; д) толщина снежного покрова на льду.

Негативное влияние перечисленных факторов особенно сильно проявляется в мелководных морях арктического шельфа с многоскачковым распространением звука и однозначно определяет информационную несущую способность наблюдательной системы. Поэтому экспериментальное определение акустических характеристик ледяного покрова — необходимое условие для выполнения корректных расчётов параметров аппаратуры гидроакустической наблюдательной системы.

Методика исследований

Измерения коэффициента отражения акустических сигналов от дрейфующего ледяного покрова, а также оценка доплеровского расширения частотного спектра проводились с помощью автономного измерительного и регистрирующего комплекса, состоящего из вверх смотрящего акустического гидролокатора IPS-5 [2] и доплеровского измерителя скорости дрейфа льда ADCP [3]. Приборы устанавливались на дно моря в специальной раме в непосредственной близости один от другого на глубине около 50 м. Схема установки показана на рис. 1.

Вверх смотрящий гидролокатор работал в непрерывном режиме, отправляя короткие акусти-

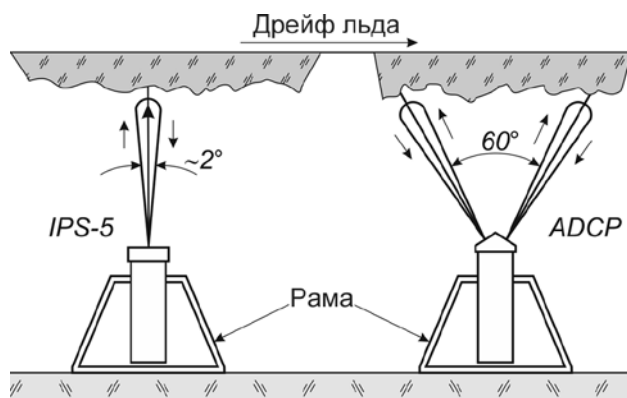


Рис. 1. Схема установки приборов
Fig. 1. Instrument installation diagram

ческие посылки вертикально вверх и записывая в память сигналы, отражённые от поверхности моря. Посылки излучались в типовом режиме работы с периодичностью 1 с на несущей частоте 420 кГц с длительностью импульсов 68 мкс. Объём флеш-памяти прибора для записи данных составлял в базовом варианте 2 GB с возможностью расширения до 16 GB. Сигналы зондирования льда излучались вверх узким лучом шириной 2°, что при дальности зондирования 50 м создавало на поверхности моря пятно облучения диаметром 1,6 м. В памяти прибора регистрировались временные задержки и амплитуды отражённых сигналов, по которым рассчитывались глубина осадки льда и коэффициенты отражения звука по отношению к отражениям от поверхности чистой воды. Коэффициент отражения звука от воды принимался равным 1, что соответствует зеркальному типу отражения без потерь энергии. Разрешающая способность локатора по дальности составляла 5 см. Глубина осадки льда оценивалась по отношению к уровню свободной поверхности воды в разводах между ледяными полями. При отсутствии разводий уровень воды измерялся датчиком гидростатического давления. Срок автономной работы прибора, ограниченный ёмкостью батареи электропитания, составлял 1 год.

Периодичность следования зондирующих импульсов в 1 с позволяла отслеживать непрерывный профиль дрейфующего льда при скорости дрейфа до 1 м/с, так как при такой скорости достигалось перекрытие смежных пятен облучения поверхности. Непрерывность профиля подвижного льда позволяла измерять углы наклона отражающей поверхности, образованные высокими киями ледовых образований с точностью, необходи-

мой для оценки отражающих свойств наклонной поверхности. Амплитуда отражённых зондирующих сигналов измерялась с высоким разрешением 16-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), регистрируя значения от 1 до 65 000 отн. ед. звукового давления. Уровень шумов моря и акустических помех по той же шкале отсчётов не превышал 128 отн. ед. Высокое разрешение амплитуды отражённых сигналов позволяло идентифицировать типы отражающей поверхности и возрастные градации льда, отличающиеся структурой и толщиной ажурного слоя на границе раздела.

При падении зондирующего луча на наклонные поверхности подводных килей уровень отражённого сигнала снижался не в строгом соответствии с ожидаемым расчётным значением. Степень отклонения амплитуды отражённого сигнала от расчётного составляла от 5 до 30%, что позволило оценить уровень диффузности отражения и потери когерентности сигнала. Для определения доплеровского расширения частотного спектра акустических сигналов при отражении от дрейфующего льда рассчитывалась вертикальная составляющая скорости изменения осадки льда, которая изменялась в диапазоне от 0 до 80 см/с.

Скорость и направление дрейфа льда измерялись и регистрировались отдельно с помощью доплеровского измерителя типа ADCP [3]. Результаты измерений обрабатывались с помощью штатного программного обеспечения, прилагаемого к приборам.

Результаты исследований

Натурные исследования акустических характеристик ледяного покрова составляли только часть исследований, посвящённых изучению закономерностей и статистики формирования и таяния льда, пространственного распределения полей, толщины и сплочённости ледяного покрова в районах строительства морских сооружений и активного судоходства. В течение более 10 лет проводились многочисленные постановки на дно моря автономных измерительных комплексов акустического зондирования льда, состоящих из верх смотрящих гидролокаторов IPS-5 [2] и доплеровских измерителей скорости дрейфа ADCP [3]. Частная задача исследования акустических характеристик льда по оценке статисти-

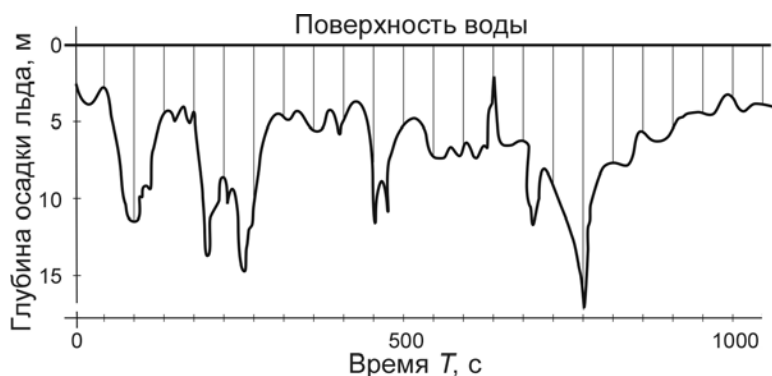


Рис. 2. Картина подводных килей ледовых торосов

Fig. 2. Patterns of underwater keels of ice ridges

ки коэффициента отражения звука и расширения частотного спектра решалась на фрагментах записей, наиболее представительных для данного вида анализов. Результаты акустических исследований льда оценивались с позиций их значимости для решения поставленных прикладных задач.

Дополнительные экспедиционные исследования в 2017 г. проведены в Карском море, море Лаптевых, а также в акватории Обской губы в районе Салмановского (Утреннего) месторождения. Данные, полученные в ходе исследований, будут использованы для проектирования, строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры круглогодичной отгрузки и транспортировки сжиженного природного газа специальным танкерным флотом. Характеристики ледяного покрова, полученные в этих экспедициях, в том числе с помощью гидроакустических методов, планируется использовать при организации так называемого ледового менеджмента (управления ледовой обстановкой) в зоне эксплуатации стационарных морских платформ. Ледовый менеджмент предусматривает анализ ледовой обстановки и методы активного физического воздействия на опасные дрейфующие ледяные поля (айсберги) с помощью их буксировки, а также разрушения и изменения траектории движения с использованием дежурных ледоколов [14].

В ходе экспериментов измерялся коэффициент отражения звука от нижней поверхности дрейфующего ледяного покрова при нормальном падении зондирующих лучей и при наклонном падении на поверхность килей торосов. Основным интерес вызывал сезонный ход коэффициента отражения звука от начала образования гладкого льда и последующего нарастания толщины и неровностей льда в течение года. Исследовались также отражающие свойства многолетнего дрейфующего льда со снежным покровом и с вклю-

чениями крупных ледовых образований типа торосов, которые характеризуются выступающими вниз подводными киями на глубину до 30 м и более. Типичная картина показана на рис. 2.

Наибольшие коэффициенты отражения звука наблюдались при отражениях от молодого тонкого льда с гладкой нижней поверхностью и толщиной от 10 до 30 см. Величина коэффициента отражения в этих экспериментах изменялась от 0,3 до 0,6 по отношению к отражениям от чистой воды. Меньшим коэффициентам отражения соответствовал заснеженный лёд с толщиной снежного покрова больше 10 см. Толщина снежного покрова оценивалась эпизодически в периоды нахождения судна-поставщика приборов в районе работ. Первая причина *весьма значительного влияния снежного покрова на коэффициент отражения предположительно заключается в рассогласовании волновых сопротивлений сред на верхней границе льда*. Этой же причиной, по-видимому, объясняется понижение коэффициента отражения звука по мере нарастания толщины льда до 1 м и более, при этом проявляется более значительный вклад от поглощения звука толщей льда. Значения коэффициентов отражения в зависимости от влияющих факторов приведены в табл. 1.

Вторая причина *ослабления коэффициента отражения звука заключалась в образовании и постепенном росте на нижней границе льда рыхлого ажурного слоя, в котором поглощалась часть звуковой энергии*. Наличие такого слоя обнаруживалось по размытости границы отражающей поверхности, которая при высокой разрешающей способности лоатора чётко проявлялась на изображении профиля осадки льда. Ещё больше снижался коэффициент отражения звука от тающего многолетнего льда до значений 0,02–0,05 в связи с образованием на его поверхности клиновидной звукопоглощающей структуры. Гистограмма распределения коэффициента отра-

Таблица 1. Коэффициенты отражения и рассеяния звука в зависимости от характеристик льда

Коэффициенты	Характеристика льда			
	молодой лёд, толщина 10–30 см без снежного покрова	молодой лёд, толщина 10–30 см, снежный покров до 40 см	однолетний лёд, толщина 30–70 см, снежный покров до 50 см	многолетний лёд, толщина 180–220 см
Отражения:				
диапазон	0,5–0,6	0,3–0,5	0,15–0,25	0,02–0,05
погрешность, %	± 10	± 15	± 20	± 50
Диффузного рассеяния звука:				
диапазон	0	0,05–0,1	0,1–0,3	0,3–0,6
погрешность, %	0	± 15	± 20	± 50

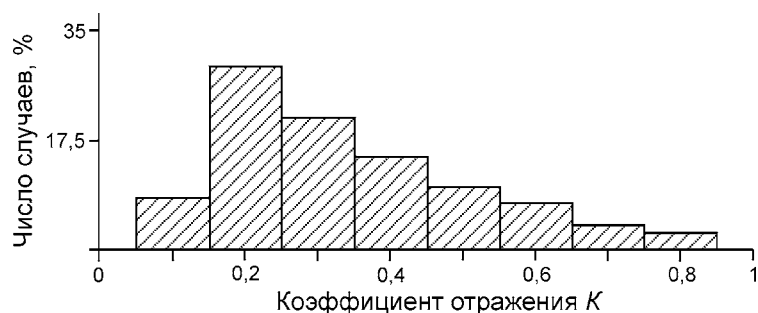


Рис. 3. Гистограмма распределения коэффициента отражения звука при нормальных углах падения лучей на поверхность льда

Fig. 3. Distribution histogram for acoustic reflectivity under normal reference angles on ice surface

жения звука при нормальных углах падения лучей на поверхность льда приведена на рис. 3.

Изучались также закономерности отражения звука при падении на наклонную поверхность подводных килей. Согласно расчётным формулам закона Снеллиса (2), следовало ожидать, что коэффициент отражения должен значительно снижаться, а при критических значениях углов — падать до нуля. В реальности коэффициенты отражения отличались от расчётных в большую сторону на 20–50% и до нуля не снижались, что объясняется диффузным характером отражения звука от рыхлой поверхности по закону Ламберта. Отмечено, что степень диффузности отражения и соответствующая потеря когерентности акустического сигнала неодинаковы для разных стадий таяния льда. Чем теплее окружающая вода, тем выше степень диффузности отражения. Диффузный характер отражения сигналов очень негативно сказывался на дальности их распространения, так как рассеянный во всех направлениях сигнал быстро затухал, не достигая второго скачка переотражения.

Доплеровское расширение спектра акустического сигнала при отражении от дрейфующего ледяного покрова оценивалось косвенным методом, поскольку измерительным комплексом этот параметр напрямую не измерялся. Допле-

ровский сдвиг частоты, обусловленный вертикальной составляющей скорости ледяного покрова, рассчитывался по перепаду высот осадки льда и измеренного значения горизонтальной скорости дрейфа с помощью доплеровского измерителя ADCP. Ровный лёд независимо от скорости и направления дрейфа не вызывал доплеровского сдвига частоты, поэтому такие данные не обрабатывались, хотя вертикальные колебания льда за счёт ветрового волнения и возможны. Подобные явления в ледяном покрове наблюдались сравнительно редко и учитывались при обработке данных как ветровое волнение воды. Расширение частотного спектра в зависимости от толщины льда и скорости дрейфа представлено в табл. 2.

Наибольший вклад в доплеровское расширение частотного спектра акустических сигналов вносил многолетний дрейфующий лёд с большими перепадами высот подводной части торосистых образований. Для типичной скорости дрейфа сплошного ледяного покрова около 25 см/с и скорости перепада высот отражающей поверхности льда 5 м/с зарегистрированы относительные величины доплеровского сдвига частоты порядка $2 \cdot 10^{-3}$. Полученная средняя оценка частотного сдвига однозначно определяет допустимый минимальный шаг между информационны-

Таблица 2. Расширение частотного спектра в зависимости от толщины льда и скорости дрейфа

Расширение спектра при скорости дрейфа	Характеристика льда			
	молодой лёд, толщина 10–30 см	однолетний лёд, толщина 30–70 см	двухлетний лёд, толщина 100–150 см	многолетний лёд, толщина 180–220 см
20 см/с: отн. ед. погрешность, %	0*	$1 \cdot 10^{-5}$ ± 20	$1 \cdot 10^{-4}$ ± 20	$(0,1-0,3)10^{-3}$ ± 20
30–50 см/с: отн. ед. погрешность, %	0*	$1 \cdot 10^{-4}$ ± 10	$(3-5)10^{-4}$ ± 10	$(0,5-1)10^{-3}$ ± 20

*Для молодого льда с толщиной до 30 см расширение частотного спектра не наблюдалось.

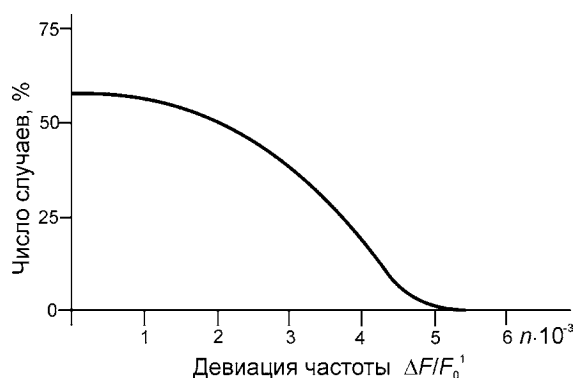


Рис. 4. Результаты единичных измерений относительного доплеровского сдвига частоты

Fig. 4. Single measurement result data referenced to Doppler frequency shift

ми каналами наблюдательной гидроакустической системы и тем самым ограничивает возможное количество частот в пределах выделенной полосы. Вариации доплеровского сдвига частоты, обусловленные характером неровностей отражающей поверхности, имеют быстропеременный характер, поэтому не поддаются прогнозированию в целях адаптации к изменчивости ледовой обстановки. Результаты единичных измерений относительного доплеровского сдвига частоты в Карском море за 2010 г. представлены на рис. 4.

Заключение

Получены вероятностные оценки акустических характеристик заснеженного ледяного покрова и количественные значения коэффициентов отражения и расширения частотного спектра акустических сигналов в зависимости от скорости дрейфа льда, характера неровностей и структуры отражаю-

щей поверхности льда, а также от высоты снежного покрова в условиях мелководных арктических морей. Показано, что при отражении звука от многолетних дрейфующих льдов с рыхлым и ажурным нижним слоем наблюдается диффузное рассеяние звука по закону Ламберта с потерей когерентности сигнала и резким сокращением информативности гидроакустической наблюдательной системы.

Доплеровское расширение частотного спектра отражённых сигналов, обусловленное резкими перепадами глубины осадки ледяного покрова и скоростью дрейфа льда, снижает информативность гидроакустической наблюдательной системы и эффективность её использования. Результаты исследований позволили обоснованно выбрать и рассчитать базовые характеристики гидроакустической аппаратуры, предназначенной для применения в составе технологической системы наблюдений за ледовой обстановкой в зоне морских технически сложных объектов.

Благодарность. Исследования, представленные в настоящей работе, проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках прикладных научных исследований по федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». Соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0009 от 05.06.2014 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0009).

Acknowledgment. The research carried out in the present work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of applied

scientific research on the federal special program «Research and Development in Priority Areas for the Development of the Scientific and Technological

Complex of Russia for 2014–2020». Agreement on Grant № 14.607.21.0009 dated 05/06/2014 (unique identifier of the project RFMEFI60714X0009).

Литература

References

1. Александров И.А. Отражение звука от гладких льдов: методика и результаты расчетов // Акустический журнал. 1994. Т. 40. № 4. С. 673–676.
2. Электронный ресурс: Ice Profiling Sonar (IPS)TM <https://www.aslenv.com/brochures/IPS-Brochure.pdf>
3. Электронный ресурс: Workhorse Monitor ADCP <http://www.teledynemarine.com/workhorse-monitor-adcp?ProductLineID=12>
4. Смирнов С.А. Интерпретация картин ледовой обстановки на индикаторе гидролокатора бокового обзора // Тр. XII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 2014. С. 54–56.
5. Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Пискунова О.И. Экспериментальное исследование вертикальной структуры низкочастотных полей сигналов и помех в мелком море // Тр. XII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 2014. С. 578–580.
6. Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Махнев Ю.В., Пискунова О.И., Трофимов А.Т. Экспериментальная оценка затухания звука на низких частотах в различных районах Баренцева моря // Тр. XII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 2014. С. 583–585.
7. Large W.G., Yager S.G. Diurnal to Decadal Global Forcing for Ocean and Sea Ice Models: The Data Sets and Flux Climatologies. Climate and Global Dynamics Division. National Center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado. 2004. 113 p.
8. Электронный ресурс: Sea ice index. The National Snow and Ice Data Center. University of Colorado Boulder, http://nsidc.org/data/seaice_index/archives/
9. Malekhanov A.I., Smirnov A.V. Signal coherence and coherence-induced effects on array output in multi-mode transmission channels // Proc. IX Intern. Conf. on Antenna Theory and Techniques, 2013. P. 98–102.
10. Hackman R.H., Sammelmann G.S. Multiple-scattering analysis for a target in an oceanic waveguide // JACA. 1988. V. 84. № 5. P. 1813–1825.
11. Ellis D.D. Modeling and Analysis of Target Echo and Clutter in Range-Dependent Bistatic Environments: FY13 Annual Report for ONR // Defence Research Reports, Canada, 2014. Doc. DRDC Atlantic ECR. 2013. 154 p.
12. Janssen P. The interaction of ocean waves and wind // Cambridge University Press. 2004. P. 43–47.
13. Теория отражения звука: Физическая энциклопедия. Т. 3. М.: БРЭ, 1992. 504 с.
14. Данилов А.И. Российские арктические морские и прибрежные научные экспедиционные исследования в 2017 году // Российские полярные исследования. 2017. № 4 (30). С. 9–20.
1. Alexandrov I.A. Reflection of sound from smooth ice: methodology and results of calculations. *Akusticheskiy zhurnal*. Acoustical Physics. 1994, 40 (4): 673–676. [In Russian].
2. Ice Profiling Sonar (IPS)TM. From their Web site at: <https://www.aslenv.com/brochures/IPS-Brochure.pdf>
3. Workhorse Monitor ADCP. From their Web site at: <http://www.teledynemarine.com/workhorse-monitor-adcp?ProductLineID=12>
4. Smirnov S.A. Interpretation of ice situation pictures on the side-scan sonar indicator. *Trudy XII Vserossyskoy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki»*. Proc. of the XII All-Russian Conf. «Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics». 2014: 54–56. [In Russian].
5. Grinyuk A.V., Kravchenko V.N., Piskunova O.I. Experimental study of the vertical structure of low-frequency fields of signals and interference in the shallow sea. *Trudy XII Vserossyskoy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki»*. Proc. of the XII All-Russian Conf. «Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics». 2014: 578–580. [In Russian].
6. Grinyuk A.V., Kravchenko V.N., Makhnev Yu.V., Piskunova O.I., Trofimov A.T. Experimental evaluation of sound attenuation at low frequencies in various regions of the Barents Sea. *Trudy XII Vserossyskoy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki»*. Proc. of the XII All-Russian Conf. «Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics». 2014: 583–585. [In Russian].
7. Large W.G., Yager S.G. Diurnal to Decadal Global Forcing for Ocean and Sea Ice Models: The Data Sets and Flux Climatologies. Climate and Global Dynamics Division. National Center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado. 2004: 113 p.
8. Sea ice index. The National Snow and Ice Data Center. University of Colorado Boulder, From their Web site at: http://nsidc.org/data/seaice_index/archives/
9. Malekhanov A.I., Smirnov A.V. Signal coherence and coherence-induced effects on array output in multi-mode transmission channels. Proc. IX Intern. Conf. on Antenna Theory and Techniques, 2013: 98–102.
10. Hackman R.H., Sammelmann G.S. Multiple-scattering analysis for a target in an oceanic waveguide. *JACA*. 1988, 84 (5): 1813–1825.
11. Ellis D.D. Modeling and Analysis of Target Echo and Clutter in Range-Dependent Bistatic Environments: FY13 Annual Report for ONR. Defence Research Reports, Canada, 2014. Doc. DRDC Atlantic ECR. 2013: 154 p.
12. Janssen P. The interaction of ocean waves and wind. Cambridge University Press, 2004: 43–47.
13. *Teoriya otrazheniya zvuka. Fizicheskaya entsiklopediya*. Theory of the reflection of sound. Physical encyclopedia. Moscow: Bolshaya Rossiyskaya Entsiklopediya, 1992, 3: 504 p. [In Russian].
14. Danilov A.I. Russian Arctic marine and coastal scientific expeditionary research in 2017. *Rossiyskie polyarnye issledovaniya*. Russian Polar Studies. 2017, 4 (30): 9–20. [In Russian].