

Определение характеристик пресноводного ледяного покрова по параметрам отражённого акустического сигнала, первые результаты лабораторных исследований.

Д.А. Ковалдов¹, Ю.А. Титченко¹, В.Ю. Караев¹, В.А. Лихоманов², А.В. Чернов²

¹Институт прикладной физики РАН
603950, г. Н.Новгород, ул. Ульянова, 46
E-mail: d.kovaldov@ipfran.ru

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

В работе представлены первые результаты лабораторных экспериментов по исследованию рассеяния акустического сигнала пресноводным ледяным покровом, которые проводились в малом ледовом бассейне ААНИИ. На дне бассейна был установлен ультразвуковой излучатель и приёмник с частотой излучения 200 кГц. На протяжении всего периода намораживания пресноводного ледяного покрова проводились записи отражённых ультразвуковых импульсов. Запись организована таким образом, что видны момент излучения ультразвукового импульса и момент приёма отражённого импульса. В случае с системой вода-воздух при плоской границе, отражённый импульс имеет один пик и по времени между излучением и приёмом отражённого импульса можно определить дальность до отражающей границы. В процессе формирования ледяного покрова параметры отражённого импульса начинают меняться за счёт образования трехслойной среды: вода-лёд-воздух и увеличению числа переходов (границ) - вода-лёд, лёд-воздух и лёд-вода. Было показано, что в такой системе у отражённого импульса формируется несколько локальных экстремумов за счёт отражения на границах слоистой структуры. В работе расчет расстояния до отражающей границы определялся по времени от момента излучения до начала переднего фронта импульса. По временной задержке между двумя отражающими границами (двумя максимумами), определённой для отражённого импульса, вычислялась скорость звука во льду с использованием натурных измерений толщины ледяного покрова. Полученные оценки скорости звука согласуются с расчётным для наблюдаемых условий формирования ледяного покрова значением ≈ 4000 м/с. Ключевые слова: пресноводный ледяной покров, ультразвуковой импульс, лабораторный эксперимент.

Determination of characteristics of freshwater ice cover based on parameters of reflected acoustic signal, first results of laboratory studies.

D.A. Kovaldov¹, Yu.A. Titchenko¹, V.Yu. Karaev¹, V.A. Likhomanov², A.V. Chernov²

¹Institute of Applied Physics RAS

²Arctic and Antarctic Research Institute

The paper presents the first results of laboratory experiments on the study of acoustic signal scattering by freshwater ice cover, which were carried out in a small ice basin of the AARI. An ultrasonic transmitter and a receiver with a radiation frequency of 200 kHz were installed at the bottom of the basin. Throughout the entire period of freezing of the freshwater ice cover, recordings of reflected ultrasonic pulses were made. The recordings are organised in such a way that the moment of emission of the ultrasonic pulse and the moment of reception of the reflected pulse are visible. In the case of the water-air system with a flat boundary, the reflected pulse has a single peak and the time between the emission and reception of the reflected pulse can be used to determine the range to the reflecting boundary. In the process of ice cover formation, the parameters of the reflected pulse begin to change due to the formation of a three-layer medium: water-ice-air and an increase in the number of

transitions (boundaries) - water-ice, ice-air and ice-water. It was shown that in such a system the reflected pulse forms several local extrema due to reflection at the boundaries of the layered structure. In this work, the calculation of the distance to the reflecting boundary was determined by the time from the moment of emission to the beginning of the leading edge of the pulse. From the time delay between two reflecting boundaries (two maxima) determined for the reflected pulse, the sound speed in ice was calculated using in-situ measurements of ice cover thickness. The obtained estimates of the sound velocity agree with the calculated value of ≈ 4000 m/s for the observed conditions of ice cover formation.

Keywords: freshwater ice cover, ultrasonic pulse, laboratory experiment.

Введение

Серьезной угрозой развитию современной цивилизации является быстрое изменение климата, проявляющееся в увеличении количества, интенсивности и продолжительности опасных явлений погоды: наводнений, засух, волн жары, лесных пожаров, ураганов, в повышении уровня Мирового океана и др. Оперативный мониторинг состояния Мирового океана и ледяного покрова имеет огромное значение для судоходства, обеспечения безопасности работ на льду и на морских сооружениях арктического шельфа. Также эта информация важна для развития климатических моделей и улучшения прогноза погоды. Характеристики ледяного покрова в арктической и антарктической зоне являются важным параметром для анализа климатических изменений. Глобальное покрытие и высокую повторяемость наблюдений в труднодоступных регионах могут обеспечить только методы дистанционного зондирования.

В настоящее время разработаны и широко используются в полевых исследованиях несколько методов исследования параметров ледяного покрова [2]: 1) бурение льда; 2) методы эхолокации с использованием сонаров на подледных буях и лодках; 3) электромагнитные методы; 4) визуальные и телевизионные наблюдения с борта судов и ледоколов, осуществляющих ледовое плавание. Однако для масштабных измерений толщина льда остается одним из наиболее трудных параметров.

Ледяной покров является более сложной отражающей поверхностью [3,4], чем морская поверхность, состоящей из разных слоев. В общем случае на поверхности льда может присутствовать снежный покров. Внутри ледяного покрова могут присутствовать неравномерно распределенные концентрации воздушных пузырьков и ячеек рассола. В результате на рассеяние влияет большое число параметров, которые сложно контролировать дистанционно [5], и результаты моделирования непросто сравнить с натурным экспериментом.

Толщина ледяного покрова измеряется лазерными и микроволновыми радиовысотометрами, установленными на спутниках и самолетах [1]. Толщина льда вычисляется по разности расстояний: до верхней границы ледяного покрова и до открытой воды в полыньях. Существует ряд приборов, например, георадары, для бесконтактного надледного измерения толщины льда. Эти приборы хорошо работают на льдах, образующихся в пресной или распресненной воде. Активно применяются методы гидроакустического определения толщины льда из-под воды, в которых при анализе используется время прихода отраженного импульса от нижней кромки льда в сочетании с датчиком гидростатического давления [6].

В данной работе будут представлены первые результаты, полученные в процессе лабораторных экспериментов по исследованию параметров пресноводного ледяного покрова в малом ледовом бассейне ААНИИ с использованием усовершенствованного ультразвукового гидролокатора. В процессе исследований расстояние до отражающей границы определялось по времени от момента излучения до начала переднего фронта импульса. Удалось оценить скорость звука во льду.

Экспериментальный стенд в ААНИИ

В конце ноября 2024 года в малом ледовом бассейне Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) была запущена уникальная экспериментальная установка с целью исследования рассеяния СВЧ и ультразвукового сигналов ледяным покровом при разной толщине. Бассейн имеет глубину 2,5 м, длину 5 м, ширину 5 м. Установка состоит из двух радиолокаторов Ka- и X-диапазона. Радиолокатор Ka-диапазона имеет симметричную диаграмму направленности антенны (ДНА) $4^\circ \times 4^\circ$, радиолокатор X-диапазона имеет ножевую ДНА $3,6^\circ \times 30^\circ$ производства АО НПФ Микран (<https://www.micran.ru/>). Сигнал обоих радиолокаторов имеет линейную частотную модуляцию с возможностью изменения девиации до 1 ГГц, что позволяет при подходящих значениях девиации по частоте и периоде модуляции разделять отражение от границ воздух-лёд и лёд-вода. Радиолокаторы закреплялись на поворотном устройстве, которое отвечало за изменение угла падения, таким образом предполагается рассчитать зависимость мощности отражённого сигнала от угла падения. Поворотное устройство крепилось на балке, дальность до первой отражающей границы таким образом составляла ≈ 2 м. Фотографии радиолокаторов в момент установки на рис. 1 (слева).



Рис. 1 Фотография радиолокаторов(слева) и гидролокатора и акустических датчиков (справа) в момент установки.

Для подлёдных исследований использовался ультразвуковой гидролокатор с симметричной ДНА $15^\circ \times 15^\circ$, установленный на дне бассейна. В гидролокаторе в качестве излучателя и приёмника используется пьезокерамическая пластина. Излучается импульс на частоте 200 кГц с длительностью 4 периода. В момент излучения в приемнике детектируется остаточный звон, по которому в дальнейшем определяется точка отсчёта по времени для отражённого импульса. В дополнение к гидролокатору была установлена линейка пассивных пьезокерамических датчиков, так, чтобы попадать в ДНА гидролокатора, которые позволяют оценить параметры импульса в толще среды. Фотографии гидролокатора и датчиков в момент установки на рис. 1 (справа) и на рис. 2 фотография установки в целом (справа) и акустическая часть (слева) в момент максимальной толщины ледяного покрова.

В целях изучения свойств замороженного ледяного покрова также проводились исследования механики деформации и разрушения на малых образцах льда. Исследования физико-механических свойств включали в себя измерения:

- температурного профиля по всей толщине льда;
- пределов прочности льда при изгибе по результатам испытания малых образцов;
- пределов прочности льда при сжатии цилиндрических образцов, отобранных перпендикулярно ледяному покрову.



Рис. 2 Фотографии установки в целом (справа) и акустическая часть (слева) в момент максимальной толщины ледяного покрова.

Экспериментальные данные ультразвукового гидролокатора

Период намораживания в малом ледовом бассейне ААНИИ начался 12.12.24. Формирование ледяного покрова происходит под действием системы кондиционирования воздуха, которая поддерживает стабильную отрицательную температуру. Первый ледяной покров появился на поверхности уже 15.12.24 и за период намораживания длительностью в 45 дней толщина ледяного покрова достигла 55 см, данные об изменении толщины ледяного покрова приведены в Таблице 1. Измерения толщины льда выполнялись контактным способом (брались керны).

Таблица 1. Толщина ледяного покрова, измеренная по длине кернов.

Дата	15.12.2024	23.12.2024	26.12.2024	28.12.2024	03.01.2025	06.01.2025	09.01.2025	14.01.2025	17.01.2025	20.01.2025	31.01.2025
Толщина, см	0	5	13	16,5	25,5	29,5	34,5	39,5	43	45,5	55

В процессе намораживания и увеличения толщины ледяного покрова у отражённого акустического импульса формируется два локальных экстремума. Первый локальный экстремум формируется при отражении от границы вода-лёд, второй — от границы лёд-воздух. Пример отражённого импульса за 28.12.24, когда толщина ледяного покрова достигла 16,5 см по данным кернов, приведён на рис. 3 (слева).

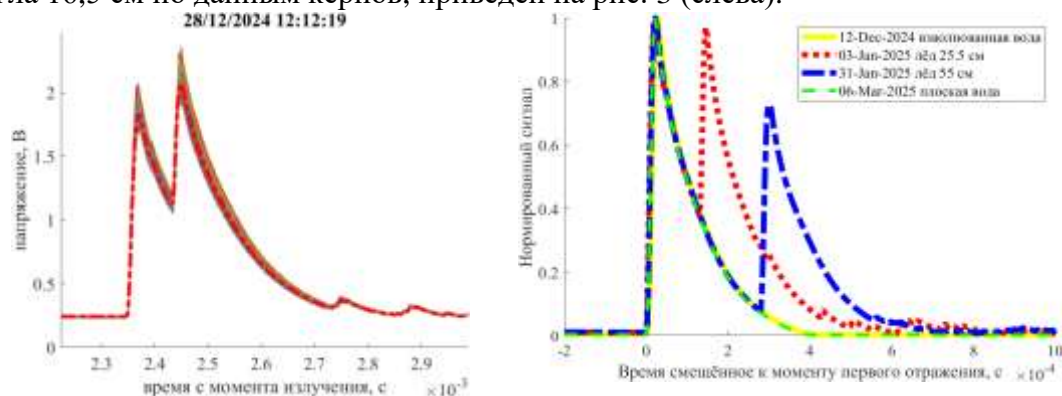


Рис. 3 Отражённый импульс при толщине ледяного покрова 16,5 см (слева) и сравнение отражённых импульсов, совмещённых в моменте отражения, для льда разной толщины и для плоской воды.

В течение записи длительностью 1 минута с частотой 6 Гц излучается импульс и регистрируется соответствующий ему отражённый. Таким образом в одной записи набирается ≈ 360 «мгновенных» отражённых импульсов. На рисунке 3 (слева) мгновенные импульсы показаны тонкими сплошными линиями. Мгновенные импульсы колебались по мощности в небольших пределах. Поэтому при дальнейшем анализе использовался усреднённый за 1 минуту импульс, который показан на рисунке красной штрихпунктирной линией. По временной задержке между двумя отражениями от разных границ и зная толщину льда (керн) можно определить скорость звука во льду. Определение момента отражения (времени задержки) является важным и в данной работе рассматривается определение дальности до границы на основе точки, отстоящей от локального экстремума на длительность излученного импульса. Дело в том, что на фоне шумов сложно определить «момент» касания переднего фронта отраженного импульса приемника, а максимум соответствует моменту, когда отражающей поверхности достигает задний фронт излученного импульса и круг «засветки», формируемый падающим излучением, превращается в кольцо. Это положение легче точно определить.

Справа на рис. 3 наглядно показано сравнение импульсов при отражении от плоской границы вода-воздух (данные получены перед началом заморозки) и при отражении от структуры вода-лёд-воздух. Охлаждение комнаты реализуется с помощью кондиционеров, которые создают поток воздуха, который в начале экспериментов создавал небольшое волнение на поверхности бассейна. Данное волнение влияет на характеристики отражённого импульса, немного уширяя его.

На рис. 4 приведён средний отражённый импульс 31.01.25, когда толщина ледяного покрова достигла 55 см. Розовыми точками показано время, смещённое на длительность излученного импульса относительно точек локальных экстремумов. Предполагается, что это соответствует приходу на приемник переднего фронта отраженного импульса (от границ раздела).

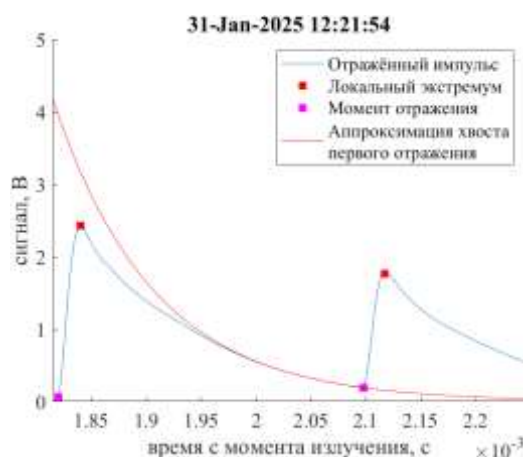


Рис. 4 Средний отражённый импульс за 31.01.25 с указанием точки первого момента отражения.

Разница между моментами отражения во времени и данные о толщине ледяного покрова по длине кернов (таблица 1) позволяют рассчитать среднюю скорость звука в ледяном покрове (рис. 5 слева). Среднее значение скорости звука – 4046 м/с. Полученное значение скорости использовали для вычисления толщины ледяного покрова за всё время работы гидролокатора, записи делались раз в час на протяжении всего периода намораживания, полученная зависимость толщины ледяного покрова от даты записи на рис. 5 справа.

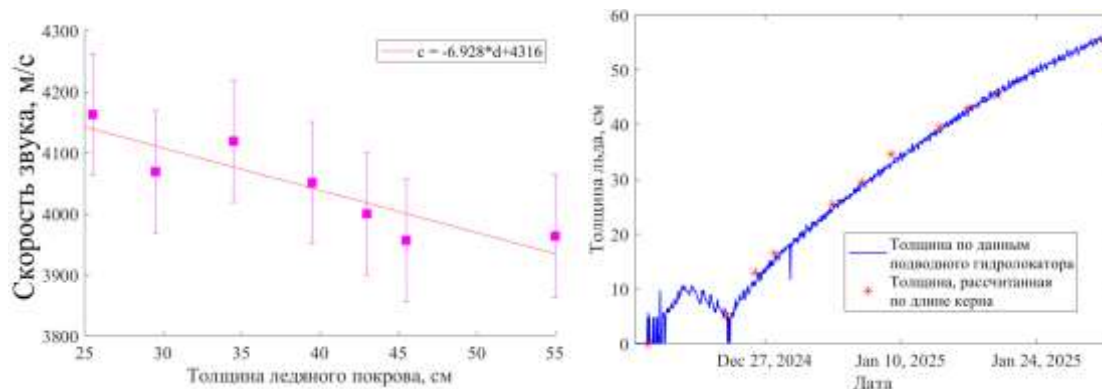


Рис. 5. Зависимость скорости звука от толщины ледяного покрова (слева) и толщина ледяного покрова, рассчитанная по данным гидролокатора за весь период намерзания.

Необычное поведение толщины ледяного покрова в начале эксперимента (рис. 5 справа) обусловлено отключением морозильной установки на кратковременный период из-за чего лёд начал таять.

Выводы

В работе представлены первые результаты обработки данных эксперимента, выполненного на уникальной лабораторной установке по исследованию характеристик ледяного покрова в малом ледовом бассейне ААНИИ. Период намораживания ледяного покрова длился 45 дней и лёд достиг максимальной толщины 55 см. По данным установленного подводного ультразвукового гидролокатора удалось сравнить вид отражённого импульса при разных толщинах ледяного покрова и при открытой воде. Первое отражение, при нормировке на максимум, совпадает для всех случаев, кроме взволнованной водной поверхности, что говорит о сохранении плоской границы при формировании ледяного покрова. Сравнение импульса, отражённого от взволнованной водной поверхности и плоской границы показало небольшое уширение переднего склона на 8 мкс, что и предполагалось в силу влияния уклонов на поверхности в случае с волнением.

За весь период было проведено 11 контактных измерений толщины ледяного покрова. Используя временную задержку между отражением от границ вода-лёд и лёд-воздух, вычисленную по отражённым импульсам, была определена средняя скорость звука в ледяном покрове в зависимости от толщины. Среднее значение скорости звука составило 4046 м/с, что согласуется с ранее [7] полученными данными для скорости звука в пресноводном ледяном покрове.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение зависимости мощности отражённого акустического сигнала от угла падения по форме отражённого импульса. Полученная зависимость будет использоваться при моделировании рассеяния акустического сигнала слоистой структурой вода-лёд-воздух.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-77-10064, <https://rscf.ru/project/23-77-10064/>.

Литература

1. J. F. Beckers, J. Alec Casey and C. Haas, "Retrievals of Lake Ice Thickness From Great Slave Lake and Great Bear Lake Using CryoSat-2," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 55, no. 7, pp. 3708-3720, July 2017, doi: 10.1109/TGRS.2017.2677583

2. 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). С. 33–49.
3. Golden K. M., Cheney M., Ding K., Fung A. K., Grenfell T. C., Isaacson D., Kong J., Nghiem S., Sylvester J., Winebrenner D. Forward Electromagnetic Scattering Models for Sea Ice // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1998. V. 36. No. 5. P. 1655–1674.
4. Лебедев Г. А., Сухоруков К. К. Распространение электромагнитных и акустических волн в морском льду. / – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2001.
5. Фильчук К. В., Ковалев С. М., Гузенко Р. Б., Хотченков С. В., Павлов А. Н., Панов Л. В., Гаврилов Ю. Г., Буйнов Р. П. Ледовые исследования в экспедиции «Северный полюс-41» // Российские полярные исследования. – 2023. – Т. 53, № 3. – С. 19-28.
6. Y. Titchenko, V. Karaev, M. Ryabkova, M. Panfilova, E. Meshkov and A. Yablokov, "Experimental study of the possibility of using an underwater acoustic wave gauge in freezing waters to measure the thickness of the ice cover," OCEANS 2019 - Marseille, Marseille, France, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/OCEANSE.2019.8867337
7. В.В. Богородский, А.В. Гусев, «Затухание звуковых волн во льду в диапазоне частот 200-1100 кГц», Акустический журнал, 1973, Т. 19, Вып. 2.