

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА ПО СТОЯЧИМ ВОЛНАМ

К.В. Федин^{1,2,3}, **Ю.И. Колесников**¹, **Л. Нгомайезве**²

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Коптюга, 3, fedinkv@ipgg.sbras.ru

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³ Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20

Аннотация. Приведены результаты натурных экспериментов, направленных на оценку возможностей определения толщины ледяного покрова водоемов по зарегистрированным на поверхности льда акустическим шумам. Показано, что по частотам генерируемых шумами в слое льда стоячих волн вертикального сжатия-растяжения уверенно определяются как толщина ледяного покрова, так и тип подстилающей среды (вода или мерзлый грунт).

Ключевые слова: ледяной покров водоемов, определение толщины льда, акустические шумы, стоячие волны вертикального сжатия-растяжения.

DETERMINATION OF ICE THICKNESS BY STANDING WAVES

K.V. Fedin^{1,2,3}, **Yu.I. Kolesnikov**¹, **L. Ngomayezve**²

¹ Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, pr. Koptuyga, 3

² Novosibirsk State University, Russia, 630090, Novosibirsk, 630090, st. Pirogova, 2

³ Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Karl Marx ave., 20

Abstract. The results of field experiments aimed at assessing the possibilities of determining the thickness of the ice cover of water bodies based on acoustic noise recorded on the ice surface are presented. It is shown that the frequencies of the standing waves of vertical compression-expansion generated by noise in the ice layer reliably determine both the thickness of the ice cover and the type of underlying medium (water or frozen ground).

Keywords: ice cover of reservoirs, determination of ice thickness, acoustic noises, standing waves of vertical compression-stretching.

Необходимость измерения толщины образующегося над водной поверхностью при отрицательных температурах ледяного покрова может возникать при решении множества практических задач – обеспечения безопасного передвижения людей по замерзшим водоемам и транспортных средств по ледовым переправам и автозимникам, прогнозирования паводков, оценки качества ледовых карт, создаваемых на основе спутниковых методов дистанционного мониторинга ледовой обстановки и т.д. Кроме водоемов, иногда представляет интерес и оценка толщины льда, образовавшегося на суше, например, для оценки запасов ледниковой воды [1].

Среди методов определения толщины ледяного покрова самым точным, но и самым трудоемким, является прямой метод, предполагающий бурение лунок и измерение толщины льда ледомерной рейкой. При мониторинговых работах такие измерения проводят дистанционными методами, например, с использованием авиации [2] или космических аппаратов [3], но точность этих методов относительно невысока. При движении судоводного транспорта во льдах применяются визуальные или телевизионные наблюдения за обломками льдин, занимающих возле судна положение близкое к вертикальному, что дает возможность оценить толщину их бокового скола [4].

Наиболее распространенный метод определения толщины льда основан на электромагнитном зондировании ледяного покрова георадаром [1, 5, 6]. Этот метод характеризуется высокой производительностью и достаточно хорошей точностью, но при большой изменчивости электрических параметров льда (например, в соленой воде)

он может требовать периодической калибровки аппаратуры.

В последнее время предлагаются и новые методы, основанные на анализе интерференционных диаграмм, создаваемых сигналами навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS [7], на оптических эффектах (с использованием лидара) [8] или на анализе высоты звука от возбуждаемой в ледовой пластине волны Лэмба [9].

Акустические методы также применяются для определения толщины льда. Как правило, это активные методы, например, эхолокация с поверхности льда [10] или из-под воды с помощью сонара [11]. Ниже представлены результаты применения для определения толщины льда пассивного акустического метода, основанного на выделении стоячих волн из записанного на поверхности льда акустического шума.

Этот метод уже неоднократно применялся нами ранее, например, при проведении физического моделирования и натурных экспериментов по определению пустот в грунтовых отложениях [12]. Метод сводится к регистрации акустических шумов на поверхности исследуемого ограниченного объекта и накоплению амплитудных спектров большого числа шумовых записей. Это позволяет выделять из шума формирующиеся под его воздействием в объекте стоячие волны.

В нашем случае таким ограниченным объектом является слой льда, лежащий на поверхности воды или мерзлого грунта. В таком слое при формировании стоячих волн между его нижней и верхней границами должно укладываться, в зависимости от условий отражения на них, либо целое число полудлин, либо нечетное число четвертей длин стоячих волн (подобно стоячим волнам в незакрепленном или закрепленном с одного конца стержнях [13]).

Частоты стоячих волн вертикального сжатия-растяжения в слое (собственные частоты слоя) в этих двух случаях определяются, соответственно, формулами

$$f_n = \frac{nV_p}{2h}, \quad (1)$$

для льда, под которым находится вода или воздух, или

$$f_n = \frac{(2n-1)V_p}{4h}, \quad (2)$$

для льда, лежащего поверх мерзлого грунта. Здесь n – номер моды стоячих волн, V_p – скорость продольных волн, h – расстояние между границами слоя.

В обоих случаях интервал между соседними собственными частотами равен $\Delta F = (f_{n+1} - f_n) = V_p / 2h$. На осредненных в результате накопления амплитудных спектрах это проявляется в появлении регулярной последовательности резонансных пиков на частотах стоячих волн. Таким образом, при известной скорости V_p и частот каких-либо двух соседних (по порядку моды) стоячих волн вертикального сжатия-растяжения толщина слоя льда может быть определена по формуле

$$h = \frac{V_p}{2\Delta F} \quad (3)$$

Заметим также, что для формулы (1) $\Delta F = f_1$, а для формулы (2) $\Delta F = 2f_1$. Поэтому вычислять толщину слоя можно и по частоте низшей моды, имея ввиду вид зависимости, которой соответствует распределение резонансных пиков на оси частот. То есть, над водой (или над воздухом в случае зависания льда) интервал ΔF равен частоте низшей моды, а над грунтом – ее удвоенной величине.

Для оценки возможностей применения для определения толщины льда пассивного акустического метода, основанного на выделении стоячих волн из акустического шума, в конце января – начале февраля 2019 г. были проведены натурные эксперименты на

двух водоемах в районе новосибирского Академгородка – на р. Зырянка и на пляже «Звезда» на Обском водохранилище (рис. 1). Регистрация шумовых записей проводилась на линейных профилях с шагом 1 м. На реке профиль длиной 20 м был ориентирован вдоль берегов и находился примерно в ее средней части, причем заведомо над водой, так как из-под льда отчетливо было слышно ее журчание. На пляже «Звезда» профиль наблюдений был примерно перпендикулярен к береговой линии и располагался частично над водой, частично над мерзлым песком.



Рисунок 1. Положение участков наблюдений на р. Зырянка (1) и на пляже «Звезда» на Обском водохранилище (2).

Регистрация шумовых сигналов производилась на верхних гранях моделей двумя широкополосными датчиками поршневого типа, изготовленными на основе дисков из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 2 мм и толщиной 1 мм. Оси максимальной чувствительности датчиков были ориентированы перпендикулярно поверхностям, на которых проводились измерения, поэтому регистрировались преимущественно вертикальные колебания. Один датчик использовался как опорный: он устанавливался неподвижно в одной из точек на верхней грани очищенного льда. Второй датчик в ходе экспериментов последовательно устанавливался также на верхней грани очищенного льда. После установки передвижного датчика каждой точке системы наблюдений производилась синхронная запись шумовых сигналов от обоих датчиков – после предварительного усиления они регистрировались двухканальным цифровым осциллографом В-423 и записывались на жесткий диск персонального компьютера (ПК) для последующей обработки. Длительность регистрации при каждом положении передвижного датчика составляла примерно 2 с при частоте дискретизации 100 кГц. Применение одного или нескольких датчиков в качестве опорных позволяет использовать разновременные данные, полученные с помощью малоканальной (в нашем случае двухканальной) аппаратуры, для имитации одновременных наблюдений в большом числе точек. Алгоритм пересчета данных к «единому» времени, программная реализация которого использовалась при обработке данных физического моделирования, описан в [14, 15]. Он позволяет по шумовым данным, полученным при разновременных наблюдениях в разных точках исследуемого объекта, и дополнительным данным, синхронно записанным в одной или нескольких неподвижных опорных точках, эффективно выделять когерентные колебания, связанные со стоячими волнами, на фоне некогерентного шума. Схема экспериментов приведена на рис. 2.

Общая длительность шумовых записей в каждой точке составляла 30 секунд при наблюдениях на р. Зырянка и 2 минуты на пляже «Звезда», где течение практически отсутствует, и уровень шума, соответственно, был значительно ниже.

При обработке записи разбивались на фрагменты длительностью по 8192 отсчетов

(примерно 82 мс), после чего проводилось накопление амплитудных спектров этих фрагментов. Частоты выделяемых на осредненных амплитудных спектрах резонансных пиков использовались для определения по формуле (3) толщины ледяного покрова в точках наблюдений. При этом предполагалось, что скорость продольных волн V_p для льда известна и в разных точках наблюдений меняется незначительно. Поэтому при расчетах использовалось значение $V_p = 4090$ м/с, определенное импульсным методом на керне льда, полученном при бурении контрольной лунки в районе пляжа «Звезда».

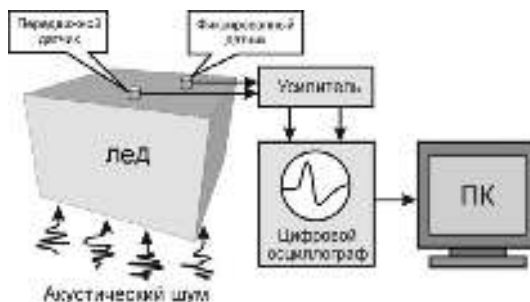


Рисунок 2. Схема экспериментов.

На рис. 3 приведены примеры осредненных спектров шумовых записей, зарегистрированных на двух участках наблюдений. Как можно видеть, даже при относительно малой длительности регистрации шумов на их спектрах можно уверенно выделить несколько регулярных резонансных пиков. Регулярность пиков на амплитудных спектрах и согласие с формулами (1) и (2) позволяет идентифицировать эти пики как резонансы на частотах стоячих волн.

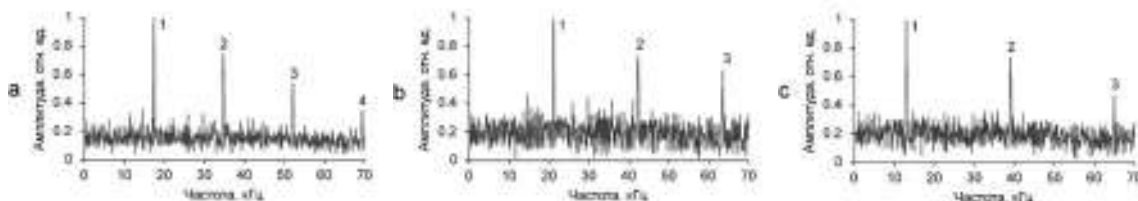


Рисунок 3. Примеры нормированных осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных на ледяном покрове р. Зырянка (а) и возле береговой линии Обского водохранилища на льду над водой (б) и над мерзлым песком (с).

Действительно, если лед покрывает более низкоскоростную относительно него воду (рис. 1, а-в), то эти пики расположены на оси частот с высокой точностью в соответствии с формулой (1). Например, на рис. 3, а частоты первых четырех мод стоячих волн равны 17.4 кГц, 34.8 кГц, 52.1 кГц и 69.5 кГц. В то же время над мерзлым песком (рис. 3, в) распределение пиков согласуется с формулой (2), что говорит о его большей акустической жесткости в сравнении со льдом (в основном, по-видимому, из-за более высокой плотности минеральных зерен).

Соответствие выделенных регулярных пиков стоячим волнам вертикального сжатия-растяжения ледового слоя, а не стоячим волнам других типов (например, сдвиговым), обусловлено применением при измерениях датчика, регистрирующего преимущественно вертикальную компоненту акустического шума. Подтверждение такой природы стоячих волн дает сопоставление результатов прямого измерения толщины льда в контрольной лунке ледомерной рейкой и расчет толщины по формуле (3). Измеренная рейкой толщина льда над водой составила примерно 10.2 см.

Определенная по записанному рядом с лункой шума частота низшей моды равна $f_1 = 19.92$ кГц, что при измеренной скорости $V_p = 4090$ м/с в соответствии с формулой (3) дает практически такую же толщину 10.27 см. Этот пример, кроме того, подтверждает корректность применения рассматриваемого метода для определения толщины ледяного покрова водоемов.

Частоты трех низших мод для всех точек наблюдений двух экспериментов приведены на рис. 4. На этом рисунке хорошо видно, что для наблюдений на р. Зырянка частоты второй и третьей мод превышают частоту первой моды в 2 и 3 раза, соответственно, что согласуется с формулой (1). Такая же закономерность наблюдается для измерений, выполненных на пляже «Звезда», но только для участка профиля 9–15 м. На части профиля от 0 до 8 м частотный интервал между соседними модами равен удвоенной частоте низшей моды, что согласуется с формулой (2). Из этого следует, что от 0 до 8 м профиль проходит над мерзлым песком, от 9 до 15 м над водой, а между отметками 8 и 9 м находится граница этих зон.

И, наконец, на рис. 5 показано распределение толщины льда вдоль профилей, на которых были выполнены шумовые измерения. Как можно видеть, на р. Зырянка толщина льда составила в среднем около 11 см, изменения на профиле в основном не превышают 3 см. На Обском водохранилище (возле пляжа «Звезда») толщина льда над водой примерно такая же порядка 10–11 см. Но в зоне береговой линии наблюдается ее резкое снижение, связанное, по-видимому, с резким уменьшением наклона дна.

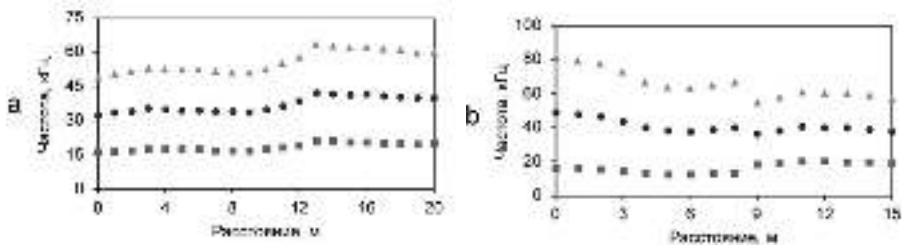


Рисунок 4. Частоты первой (квадратные маркеры), второй (круглые маркеры) и третьей (треугольные маркеры) мод стоячих волн сжатия-растяжения для профилей наблюдений на р. Зырянка (а) и на пляже «Звезда» (б).

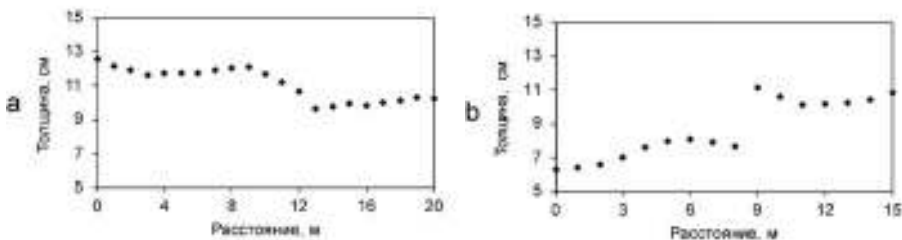


Рисунок 5. Распределение толщины льда вдоль профилей наблюдений на р. Зырянка (а) и на пляже «Звезда» (б).

Резюмируя, можно отметить, что проведенные эксперименты показали эффективность использования акустических шумов для определения толщины ледяного покрова водоемов, а также для оценки типа подстилающей среды (вода или мерзлый грунт), на которой лежит слой льда.

Литература / References:

1. Кулижников А.М. Георадиолокационные обследования ледовых переправ // Инженерные изыскания. 2016. № 8. С. 22–29.
2. Михайлов М.И., Музалевский К.В., Миронов В.Л. Измерение толщины льда на пресноводном пруде и

- реке с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 167–174.
3. Смирнов В.Г., Бушуев А.В., Бычкова И.А., Захваткина Н.Ю., Лощилов В.С. Спутниковый мониторинг морских льдов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2 (85). С. 62–76.
 4. Сероветников С.С., Фролов С.В., Клейн А.Э. Судовой телевизионный комплекс – реализация автоматизированной системы натурных измерений толщины морского льда // Российская Арктика. 2018. №2. С. 41–55.
 5. Финкельштейн М.И., Лазарев Э.И., Чижов А.Н. Радиолокационные аэроледомерные съемки рек, озер, водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 112 с.
 6. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.
 7. Fu H., Liu Z., Guo X., Cui H. Double-frequency ground penetrating radar for measurement of ice thickness and water depth in rivers and canals: Development, verification and application // Cold Regions Science and Technology. 2018. V. 154. pp. 85–94.
 8. Kirby M.S., Hansman R.J., Jr., Method and Apparatus for Measurement of Ice Thickness Employing Ultrasonic Pulse Echo Technique. United States Patent, Number: 4,628,736, Date of Patent: Dec. 16, 1986.
 9. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment // Geophysical Prospecting. 2018. V. 66. No. 2. pp. 342–353.
 10. Pershin S.M., Lednev V.N., Klinkov V.K., Yulmetov R.N., Bunkin A.F. Ice thickness measurements by Raman scattering // Optics Letters. 2014. V. 39. No. 9. pp. 2573–2575.
 11. Singh S.K., Rathore B.P., Bahuguna I.M., Ramnathan A.L. Estimation of glacier ice thickness using Ground Penetrating Radar in the Himalayan region // Current Science. 2012. V. 103. No. 1. pp. 68–73.
 12. Shaw A., Declercq N.F. Determination of Ice Thickness on Lakes and Canals Using Audio Sound // Acta Acustica United with Acustica. 2015. V. 101. pp. 484–493.
 13. Wadhams P., Hughes N., Rodrigues J. Arctic sea ice thickness characteristics in winter 2004 and 2007 from submarine sonar transects // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. C00E02.
 14. Еманов А.Ф., Красников А.А., Бах А.А., Черных Е.Н., Еманов А.А., Семин А.Ю., Черепанов А.В. Резонансные свойства верхней части разреза // Физ. мезомех. 2008. Т. 11. № 1. С. 26–36.
 15. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчет стоячих волн при детальных инженерно-сейс-мологических исследованиях // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 2. С. 192–207.