АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том IV 1958 Вып. 1

УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЬДА

В. В. Богородский

Рассмотрено применение импульсного ультразвукового метода для определения модулей Юнга и сдвига поликристаллического льда в зависимости от его температуры и текстурных особенностей по измеренной скорости распространения продольных и сдвиговых волн. Эксперименты по определению скорости ультразвука проводились на пресноводных льдах и в районе дрейфующей станции «СП-4» специально разработанным прибором.

Решение ряда научных и практических вопросов требует достоверных данных относительно упругих характеристик ледяного покрова морей, озер, рек. Лед представляет собою поликристаллическое твердое тело. Как известно, модуль Юнга E, модуль сдвига μ и коэффициент Пуассона ν полностью определяют упругие свойства любого изотропного материала. Для льда понятие об изотропности является несколько условным, так как известно, что при нарастании толщины льда его кристаллы принимают некоторую упорядоченную ориентацию и ледяной покров приобретает анизотропные свойства.

Своеобразие льда, как твердой среды, заключается в том, что по мере нарастания толщины льда, его кристаллы, выклиниваясь, постепенно увеличиваются в размерах, достигая нескольких десятков сантиметров; изменение метеорологических условий приводит к появлению в ледяном покрове слоев, сильно различающихся по своим физическим свойствам.

Льды Центрального Арктического бассейна по сравнению с пресными льдами обладают еще большим разнообразием свойств. Арктический лед, помимо множества слоев, обладающих различной плотностью, соленостью, характерным распределением температуры по сечению, имеет весьма сложное структурное строение: в нем при определенной температуре выкристаллизовываются все соли, встречающиеся в морской воде. При температуре —1,5— —2° появляется жидкая фаза — рассол.

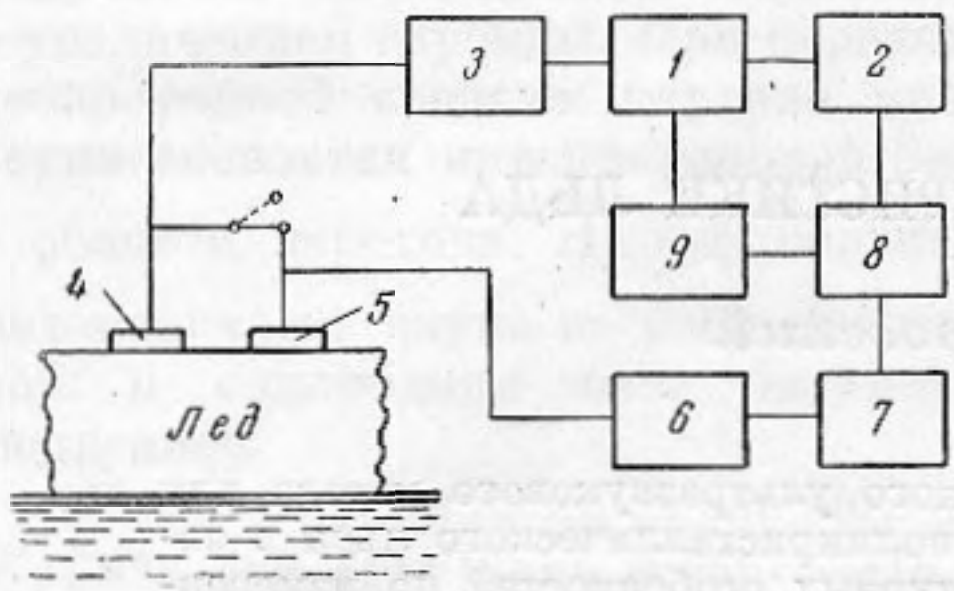
В настоящее время опубликован ряд работ, в которых описаны динамические методы определения упругих характеристик как поликристаллического льда, так и монокристалла [1, 2]. К ним относятся сейсмический, резонансный и оптический методы.

Сейсмический метод измерения упругих постоянных льда основан на фиксации моментов «вступления» импульса для нескольких сейсмоприемников, расположенных в определенном порядке на некотором расстоянии от места возбуждения упругих волн при помощи удара или взрыва. При таком способе возбуждаются как продольные сферические волны, так и сдвиговые и поверхностные волны. При этом упругие колебания имеют целый спектр частот волн, которые трансформируются слоями льда.

Эти явления значительно усложняют выделение сдвиговых волн, скорость которых почти совпадает со скоростью поверхностных волн.

Так как в сейсмике используются низкочастотные составляющие спектра, порядка 50 *гц* (для льда длина волны $\lambda \cong 10$ *м*), то при толщинах арктического льда от 1,5 до 4 *м* точное измерение скорости продольных волн затруднено из-за явления дисперсии.

Изучить упругие характеристики отдельных слоев ледяного покрова, а также определить их зависимость от температуры в широком диапазоне изменения последней, этот метод не позволяет. К тому же измерение скорости упругих волн этим методом возможно произвести только с точностью 5÷7 %. Серьезным недостатком метода является его трудоемкость, а также сложность обработки и интерпретации сейсмограмм. Резонансный метод имеет бо́льшую точность по сравнению с сейсмическим, но требует для измерения специально приготовленных образцов льда, линейные размеры которых должны быть очень точно выдержаны. Приготовление таких образцов в полевых условиях весьма затруднительно; к тому же образцы ограниченных размеров не могут с достаточной полнотой отобразить особенности ледяного покрова. Это же следует сказать и об оптическом методе, использующем явление дифракции света на ультразвуковых волнах.

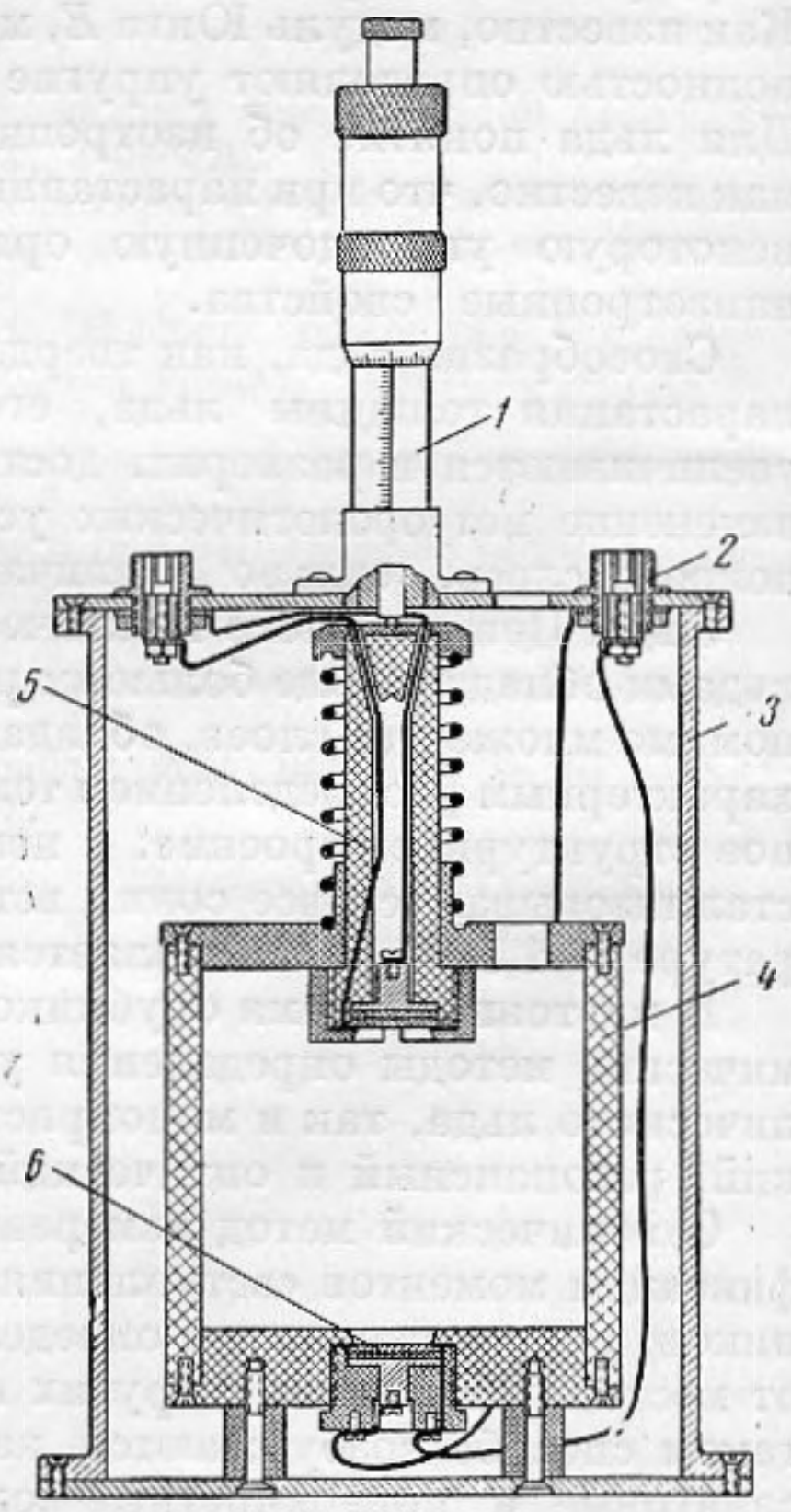


Фиг. 1

В данной работе рассмотрен вопрос о применении импульсного ультразвукового метода для определения упругих характеристик поликристаллического льда. Блок-схема импульсного ультразвукового прибора, при помощи которого измерялись скорости упругих волн во льду, приведена на фиг. 1.

Принцип работы прибора и методика измерения заключаются в следующем: задающий генератор *1* одновременно через определенные промежутки времени запускает генератор развертки *2* и генератор импульсов высокой частоты *3*. Генератор импульсов возбуждает пьезоэлектрический преобразователь *4*, излучающий акустический импульс в исследуемую среду. После прохождения определенного расстояния в среде акустический импульс возбуждает приемный пьезоэлектрический преобразователь *5*.

Электрические колебания с приемного пьезопреобразователя поступают на усилитель *6*, детектор *7* и затем подаются на электронный осциллоскоп *8*.



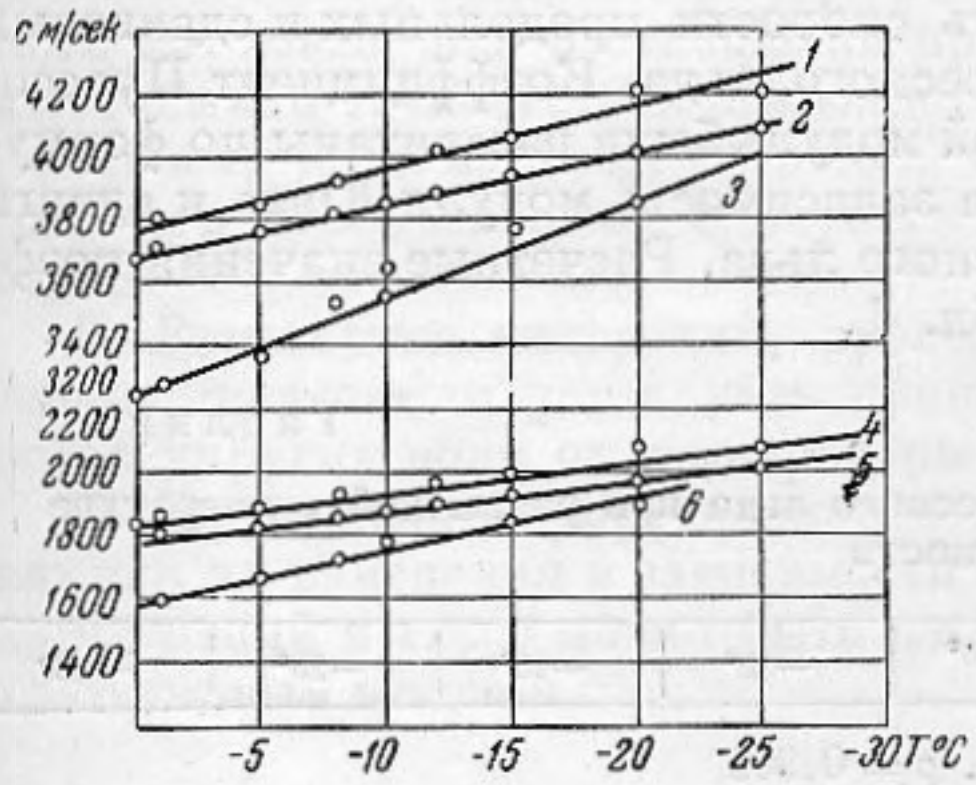
Фиг. 2. Акустическая линия:

1 — микрометр, *2* — коаксиальное гнездо, *3* — наружный цилиндр, *4* — камера для эталонной жидкости *5* — шток с вибратором, *6* — пьезовибратор

Для измерения промежутка времени между посылкой акустического импульса в исследуемую среду и приемом после прохождения некоторого пути, линия развертки на экране индикатора калибруется при помощи электронного калибратора *9*.

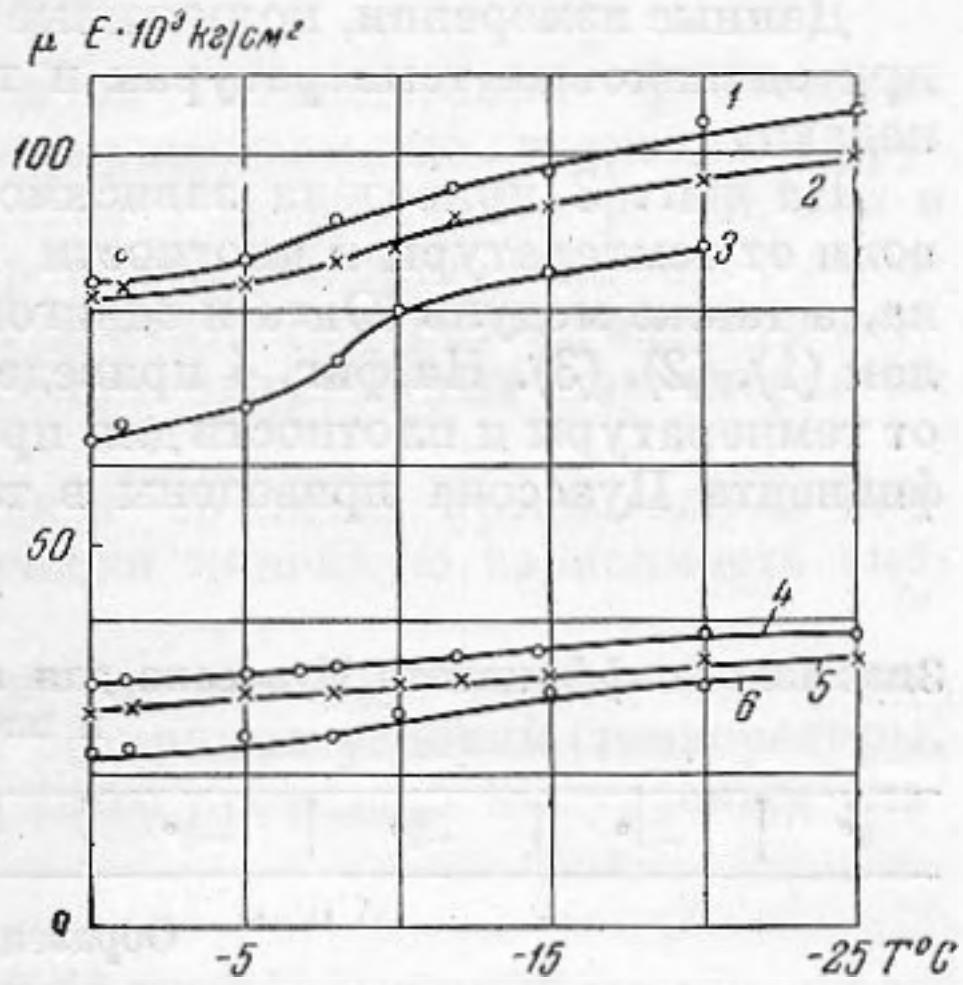
Контроль точности показаний прибора по скорости производится при помощи специальной эталонной акустической линии (фиг. 2). Измерив

время распространения акустического импульса в исследуемой среде и длину его пути (т. е. размеры исследуемой среды), можно рассчитать скорость распространения упругой волны. Возбуждение продольных волн во льду производилось при помощи пластинок из титаната бария, сдвиговых волн — кварцевыми вибраторами Y-среза, которые примораживались ко льду. Все пьезопреобразователи имели резонансную частоту 500 *кгц*. Применение пластинок Y-среза и среза Кюри дает возможность одновременно определять скорость как продольной, так и сдвиговой волн, что



Фиг. 3. График зависимости скоростей ультразвуковых волн от температуры и плотности пресного льда:

1 — C_l (1); ρ=0,902; 2 — C_l (2); ρ=0,900; 3 — C_l (3); ρ = 0,890; 4 — C_t (1); ρ = 0,902; 5 — C_t (2); ρ= 0,900; 6 — C_t (3); ρ=0,890



Фиг. 4. График зависимости модулей Юнга и сдвига от температуры и плотности пресного льда:

1 — $E_1\rho$—0,902; 2 — $E_2\rho$ — 0,900; 3 — $E_3\rho$—0,890; 4 — $\mu_1\rho$ — 0,902; 5 — $\mu_2\rho$ — 0,900; 6 — $\mu_3\rho$—0,890

позволяет получить значения всех упругих констант ледяного покрова с высокой степенью точности в зависимости от температуры, солености и т. д.

Разработанный прибор для измерения скорости продольных C_l и сдвиговых C_t волн позволял проводить эти измерения как на образцах, так и в ледяном покрове, достигающем толщины 1,5—2 *м**. Ошибка при измерении скорости ультразвука во льду составляла 0,6%.

Перед измерениями неровная поверхность льда слегка оплавлялась и иногда смазывалась автолом, что в значительной степени увеличивало передачу ультразвуковой энергии в лед.

Как известно, по скорости продольной и сдвиговой волны можно определить модули Юнга E, сдвига μ и коэффициент Пуассона ν

$$E = C_l^2 \cdot \rho \, \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}, \tag{1}$$

$$\mu = C_t^2 \cdot \rho, \tag{2}$$

$$\nu = \frac{C_l^2 - 2C_t^2}{2(C_l^2 - C_t^2)}. \tag{3}$$

Первая серия измерений была проведена в лаборатории. Для этого были выколоты образцы льда размерами 60 × 60 × 100 *см*, подобранные так, чтобы полнее отобразить строение ледяного покрова пресных водоемов.

* Первый прибор был разработан автором при участии А. В. Гусева и Е. Д. Пигулевского на кафедре электроакустики ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина) под руководством проф. С. Я. Соколова.

Часть образцов была приготовлена из прозрачного льда и имела плотность $\rho = 0{,}902$, другие содержали слой мутно-белого льда толщиной от 10 до 30 *см* с большим количеством воздушных включений и меньшей плотностью. Температура образцов льда изменялась от 0 до — 25° и контролировалась термосопротивлениями. При экспериментах на ледяном покрове Ладожского озера температура также измерялась термосопротивлениями, вмороженными на различную глубину; толщина льда измерялась ледомерной рейкой.

Данные измерений, полученные на образцах льда и в ледяном покрове, при одинаковых температурах и текстурных особенностях, хорошо совпадают.

На фиг. 3 приведена зависимость скорости продольных и сдвиговых волн от температуры и плотности пресного льда. Коэффициент Пуассона, а также модуль Юнга и сдвиговой модуль были рассчитаны по формулам (1), (2), (3). На фиг. 4 приведена зависимость модуля Юнга и сдвига от температуры и плотности для пресного льда. Расчетные значения коэффициента Пуассона приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента Пуассона для пресного льда при различной температуре и плотности

0°	—1°	—5°	—8°	—10°	—12°	—15°	—20°	— 25°
Образец 1, $\rho = 0{,}902$								
0,344	0,342	0,34	0,345	0,345	0,342	0,34	0,339	0,339
Образец 2, $\rho = 0{,}900$								
0,346	0,344	0,336	0,33	0,344	0,33	0,33	0,335	0,342
Образец 3, $\rho = 0{,}890$								
0,334	0,343	0,354	0,350	0,344	0,345	0,347	0,332	0,344

Аналогичные измерения были проведены и для морского льда. Они выполнялись в 1955 г. в районе дрейфующей станции «СП-4». Измерения проводились на всех разновидностях арктического ледяного покрова и выколотых из него образцах.

Полученные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значение скорости ультразвука и упругих характеристик для отдельных слоев и полного профиля арктического льда («СП-4», май 1955 г.)

Определяемая величина	Толщина исследуемого слоя льда и его плотность									
	Годовалый лед				Паковый лед					
	I 0—20 *см* $\rho = 0{,}897$	II 20—130 *см* $\rho = 0{,}91$	III 130—190 *см* $\rho = 0{,}913$	Среднее значение для полного профиля	I 0—90 *см* $\rho = 0{,}9$	II 90—200 *см* $\rho = 0{,}911$	III 200—215 *см* $\rho = 0{,}9$	IV 210—300 *см* $\rho = 0{,}913$	V 300—400 *см* $\rho = 0{,}913$	Среднее значение для полного профиля
C_l *см/сек*·10^5	2,1	3,46	2,55	3,00	3,15	3,78	3,0	3,6	2,7	3,3
C_t » »	1,07	1,77	1,3	1,55	1,56	1,92	1,49	1,8	1,36	1,66
ν (коэффициент Пуассона)	0,325	0,323	0,324	0,323	0,338	0,325	0,337	0,333	0,333	0,332
E *кг/см*^{2}·10^3	27,7	76,5	41,6	60,6	59,6	91,2	54,1	81,1	46,5	69,4
μ » »	10,4	29,2	15,7	22,9	22,4	34,3	20,8	30,2	17,2	25,2
Средняя температура слоя	*H*—13	—7,4	—3,8	—	—8,5	—5,5	—5,5	—5	—3,5	—

При использовании импульсного метода и методики, изложенной в [3], удалось установить анизотропию скорости продольных волн в кристалле льда в функции от направления волнового вектора по отношению к гексагональной оси кристалла и ее зависимость от температуры. Вычисленные по полученным значениям скорости продольной волны при 0° гексагональные модули δ_{11} и δ_{33} хорошо совпадают со значениями, приведенными в [4].

Заключение

1. Импульсный ультразвуковой метод исследования физических свойств льдов обладает серьезными преимуществами по сравнению с другими методами как в отношении простоты и скорости измерений, так и в отношении точности. Он позволяет проводить исследования как в лабораторных, так и полевых условиях, что значительно расширяет перспективы его использования для установления прочностных характеристик льдов.

2. Результаты измерений, проведенные на льдах пресноводных бассейнов, позволили установить практически линейную зависимость скорости упругих волн от температуры.

3. Исследование упругих коэффициентов монокристаллов льда и динамики их изменения в зависимости от различных условий (температуры, напряжений и т. д.) может быть легче всего проведено импульсным ультразвуковым методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Oliver A. P. Crary, R. Cotel. Elastic waves in arctic pack ice. Trans. Amer. geophys. Un., April 1954, 35, 2, 282—292.
2. F. Jona, P. Scherrer. Die elastischen Konstanten von Eis-Einkristallen. Helv. phys. Acta, 1952, 25, 35—54.
3. К. С. Александров, О. В. Носиков. Прибор для измерения упругих модулей кристаллов. Акуст. журн., 1956, 2, 3, 244—248.
4. Л. Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., ИЛ, 1956, стр. 363.

Арктический научно-исследовательский институт
Ленинград

Поступила в редакцию
3 февраля 1957 г.