

УДК 534.22+551.32

АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЬДА, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД СТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ

В. В. Богородский, Г. П. Хожлов

Описываются эксперименты, предпринятые с целью измерения скорости звука в поликристаллическом пресном льду, находящемся под всесторонним статическим давлением. Скорость звука измерялась при изменении давления до 500 кг/см^2 и температуре образца льда $-5, -7^\circ$.

Ледники Антарктиды, Гренландии и других арктических архипелагов и островов аккумулируют в себе колоссальные массы замерзшей пресной воды и играют существенную роль в геофизических процессах нашей планеты. В настоящее время исследователями предпринимаются настойчивые попытки определить с достаточной степенью точности массу ледниковых образований Земли. Для решения этой задачи исследователи применяют различные радиофизические методы: электромагнитный [1], сейсмо-акустический [2] и др.

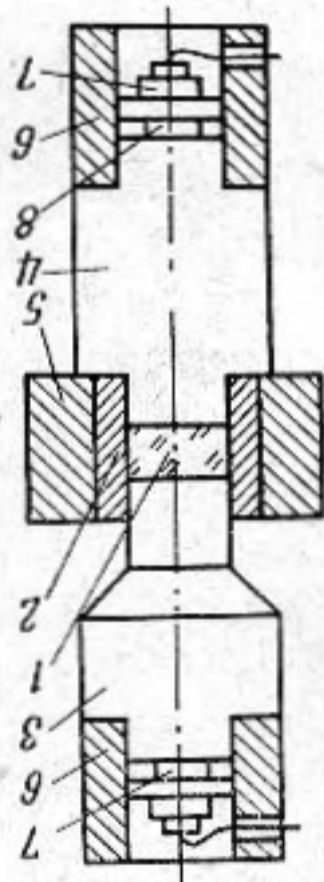
Вследствие больших толщин, достигающих до 5000 м (Антарктида), в материковых ледниках возникают значительные давления, достигающие до 500 кг/см^2 . Естественно ожидать, что физические характеристики такого льда (кристаллитная структура, плотность, скорость звука, объемная сжимаемость и др.) будут иными по сравнению с характеристиками льда, находящегося при нормальных условиях.

Исследования физических характеристик льдов, находящихся под большим всесторонним давлением, позволяют определить ошибки методов, при помощи которых ведется измерение толщин ледника, оценить, исходя из измененной структуры, рассеяние акустических и электромагнитных волн, распространяющихся в толще ледника. Кроме того, эти исследования представляют существенный интерес с точки зрения физики твердого тела.

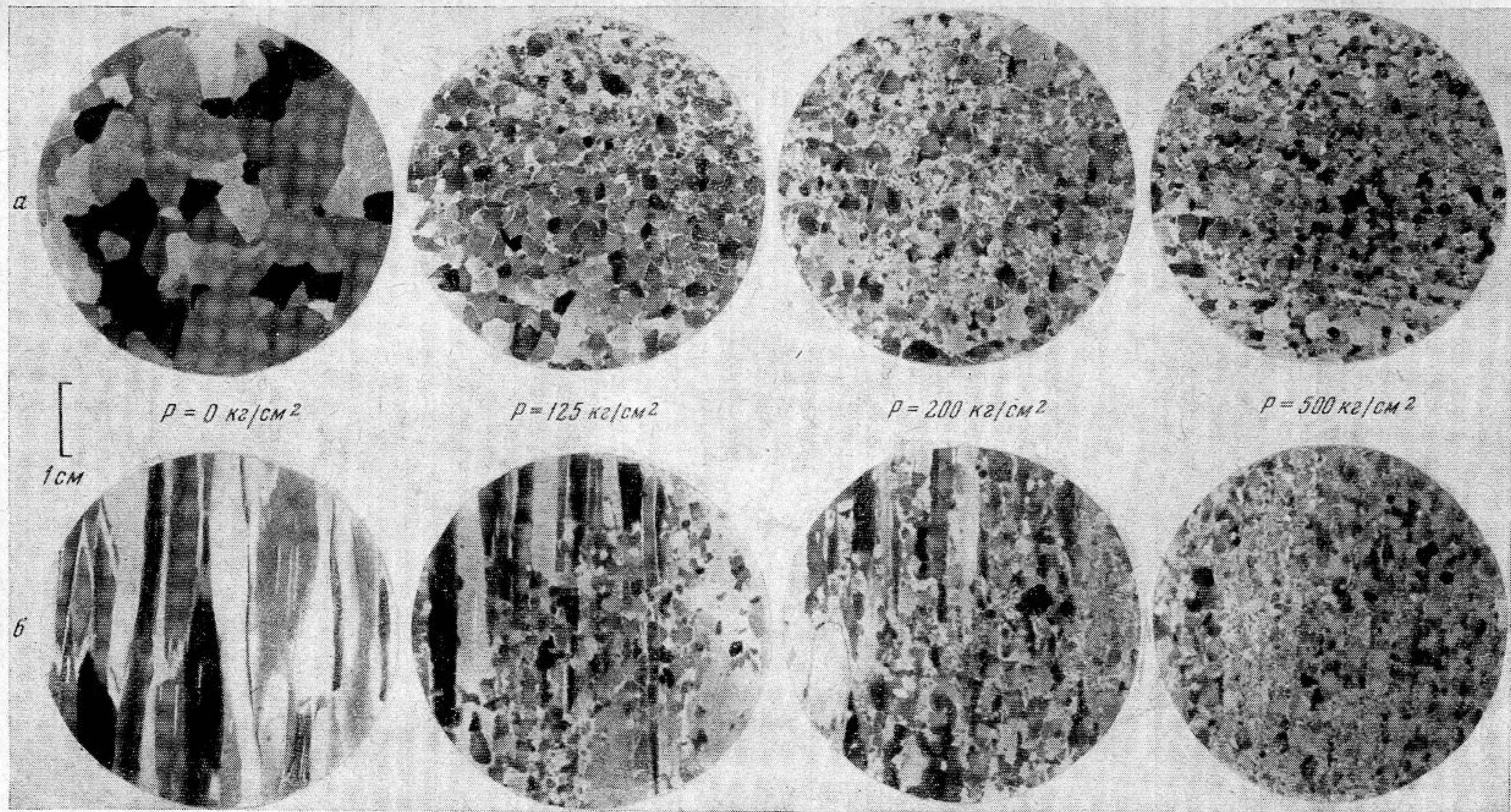
Мы осуществили измерение скорости продольных ультразвуковых волн в пресном поликристаллическом льде при изменяемом статическом давлении. Учитывая, что при использованных в экспериментах давлениях лед мог существовать при $t \leq -4,5^\circ$ [3], все измерения проводились при температуре образца льда, заключенной в пределах $-5, -7^\circ$.

Измерение скорости звука производилось при помощи ультразвукового измерителя скорости «УЗИС-6» [4]. В качестве излучающего и приемного пьезоэлектрических преобразователей использовались кварцевые пластины X-среза с резонансной частотой 5 Мгц.

Для измерения скорости звука во льду под давлением была сконструирована специальная установка (фиг. 1). Образец льда 1, тщательно подогнанный по размерам эбонитовой втулки 2, помещался между стержневыми волноводами 3, 4. Втулка 2 охватывалась стальной гильзой 5;



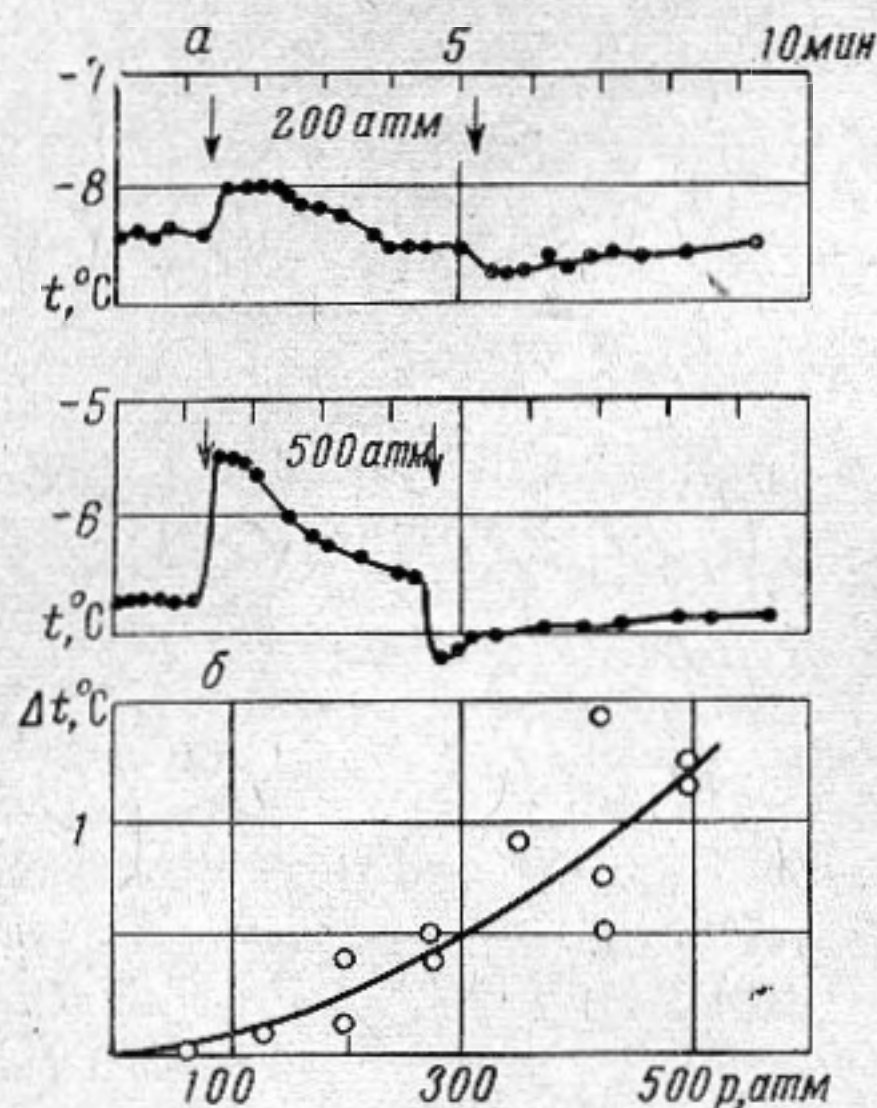
Фиг. 1



Фиг. 2

штулки 6 служили для передачи усилия и одновременно защищали пьезопреобразователи 7. Вся измерительная установка располагалась на подвижном столе гидравлического пресса, смонтированного в холодильной камере. Одновременно с манометрическим контролем силы давления индикатором часового типа производился отсчет суммарной деформации образца льда и стержней задержки.

Исследуемый образец льда имел форму цилиндра высотой $15 \div 30$ мм и диаметром 40 мм. Образцы льда готовились из мелкозернистого «засеянного» льда, намороженного в бассейне холодильной камеры. Перед измерениями и в процессе экспериментов из каждого образца препарировались шлифы. Для них выбирались срезы, параллельные и перпендикулярные плоскости намерзания; для контроля изменения структуры они фотографировались в поляризованном свете.



Фиг. 3

В работе [5] показано, что скорость звука в пресном льде является линейной функцией его температуры. Контроль температуры льда в период непрерывного и ступенчатого сжатия мы осуществляли при помощи четырех последовательно соединенных термопар, спаи которых были расположены в горизонтальной плоскости на расстоянии от центра образца, равном радиусу пьезопреобразователя.

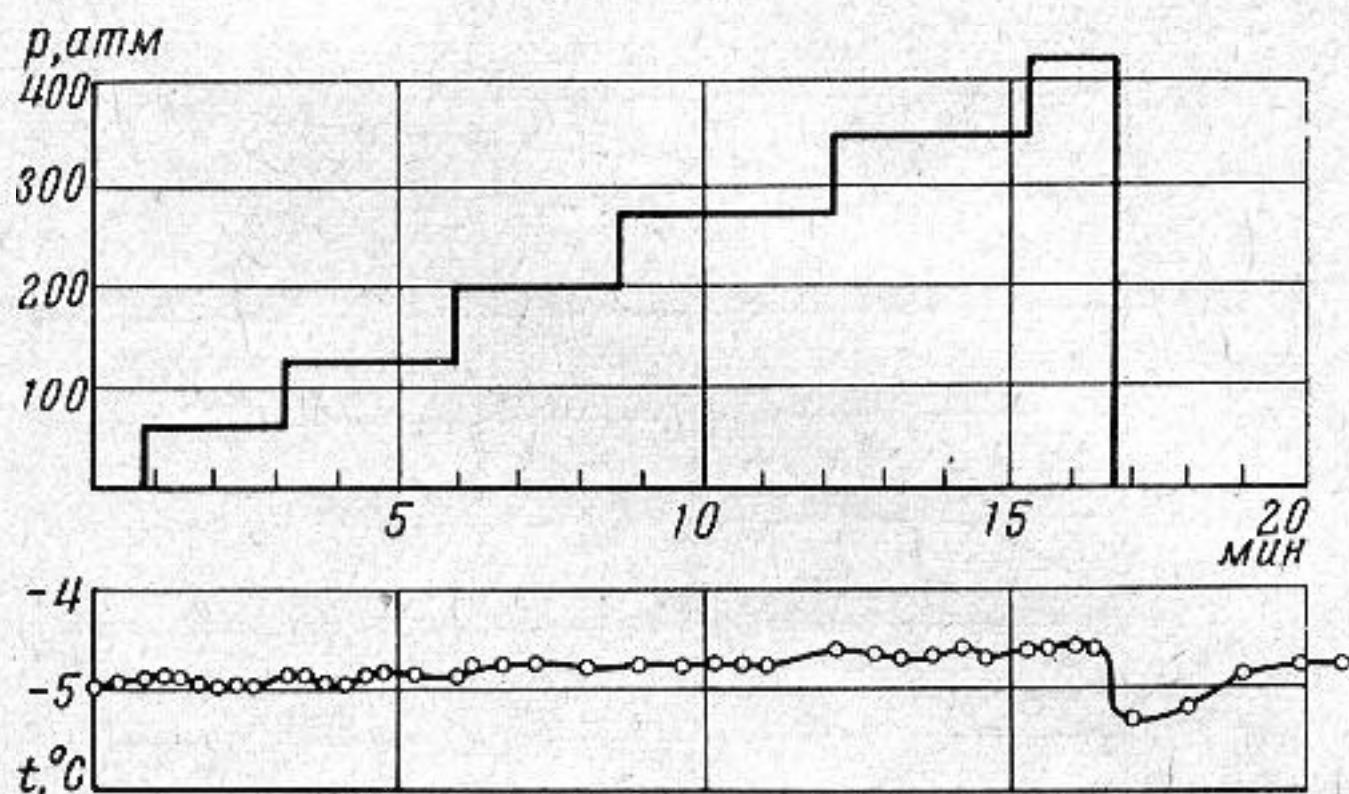
Результаты измерения температуры при непрерывном сжатии до 200 и 500 $\text{кг}/\text{см}^2$ приведены на фиг. 3, а. Моменты начала сжатия образца и снятия давления обозначены стрелками. Учитывая краткость времени сжатия (несколько секунд) и относительно малую теплопроводность льда, термодинамический процесс при сжатии можно было с достаточной степенью точности считать адиабатическим.

Из фиг. 3, б видно, что максимальный прирост температуры Δt^0 при больших давлениях доходит до $1,5^\circ$. В дальнейшем, в результате теплообмена образца льда с массивными стальными стержневыми волноводами, образец постепенно принимает температуру окружающей среды. После снятия давления температура образца, вследствие быстрого его расширения, резко понижается, после чего медленно повышается до температуры окружающей среды.

Были проведены также измерения температуры образца при ступенчатом его сжатии. Давление, доведенное до определенной величины, оставалось постоянным в течение 3—4 мин. При этом максимальное повышение температуры льда, когда давление достигало 500 $\text{кг}/\text{см}^2$, составляло $0,35^\circ$ (фиг. 4). Заметим, что измерение скорости звука производилось всегда при фиксированном давлении после 3—4-минутной выдержки. Учитывая, что точность измерения скорости звука прибором «УЗИС-6» составляет $\sim 1\%$, легко рассчитать, что повышение температуры на доли

градуса вызывает изменение скорости на величину, меньшую погрешности измерений [5].

В процессе увеличения давления объем льда изменяется. По результатам измерений была построена графическая зависимость плотности льда от величины давления. Из фиг. 5 видно, что в пределах давлений, использованных при опытах, плотность льда изменялась от 0,89 до 1 г/см³.



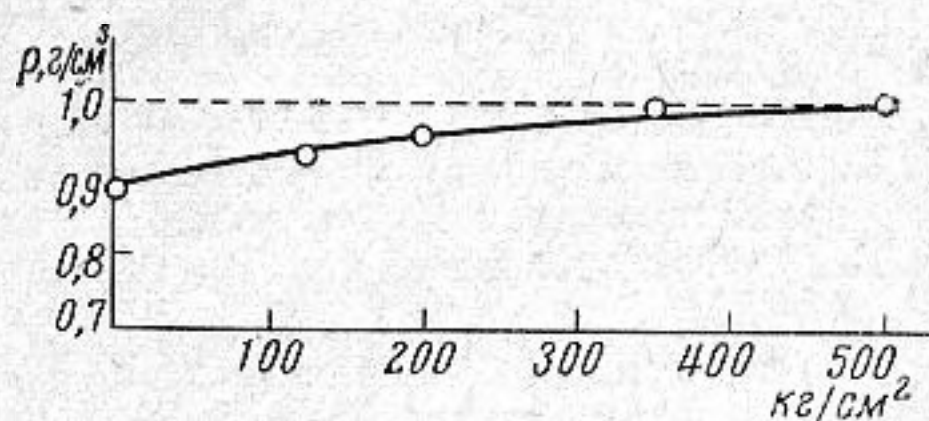
Фиг. 4

Как указывалось выше, при достижении на образце определенного давления производилось измерение скорости звука и деформации льда. Скорость звука вычислялась по формуле:

$$c = \frac{h_0 - (\Delta + \Delta e)}{n_2 - n_1} c_0,$$

где c_0 — скорость звука в жидкости эталонной линии, h_0 — начальная толщина образца льда, Δ — общая деформация льда и стержней волноводов, Δe — упругая деформация стержней, n_2 — отсчет по микрометру, соответствующий времени прохождения ультразвукового импульса через волноводы, n_1 — отсчет по микрометру, соответствующий времени прохождения ультразвукового импульса через волноводы и образец льда. Прозвучивание образцов льда производилось вдоль кристаллитов льда и в плоскости, перпендикулярной к ним.

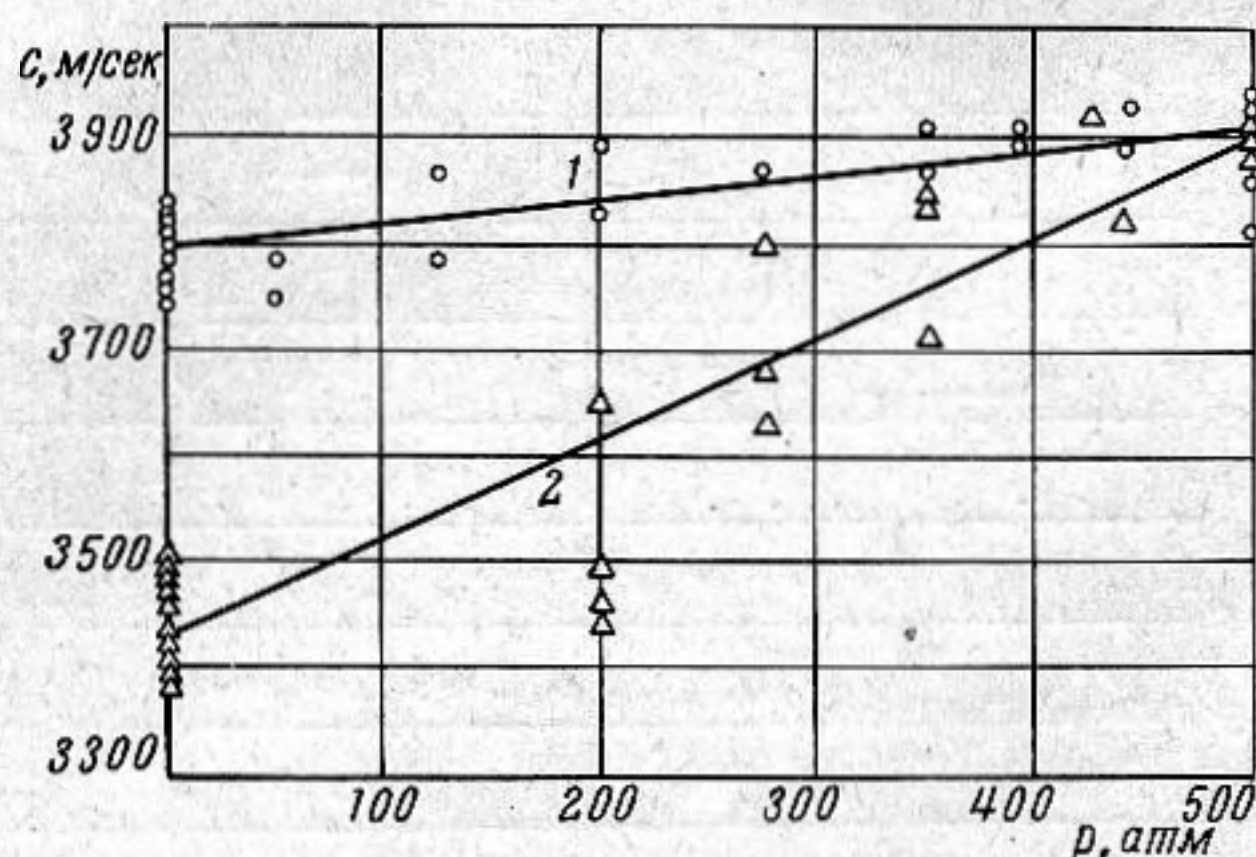
Результаты измерения скорости звука приведены на фиг. 6. Из фигуры видно, что при увеличении давления скорость звука, в случае распространения упругой волны вдоль кристаллитов, изменяется незначительно (кривая 1). При прозвучивании в перпендикулярном направлении изменение скорости звука больше (2). Следует заметить, что при нормальном давлении скорость звука при прозвучивании вдоль кристаллитов и перпендикулярно к ним различна: она больше при прозвучивании вдоль кристаллитов. Когда



Фиг. 5

давление в исследуемом образце достигает 500 кг/см², скорость звука в обоих направлениях становится практически одинаковой. Этот существенный факт, вероятно, можно объяснить изменением кристаллитной структуры образца и гомогенизацией льда при высоком давлении. Это подтверждается также и фиг. 2, где четко видно, что при $p = 500$ кг/см² образец льда утрачивает анизотропные свойства: его структура становится мелкозернистой: размеры кристаллитов уменьшаются до 0,01—2 мм;

кристаллиты уже не имеют заметной упорядоченной ориентировки, воздушные включения не обнаруживаются. Существенное различие скорости звука, измеренной в различных направлениях при $p = 0$, естественно объясняется анизотропией структуры льда и воздушных включений (фиг. 2).



Фиг. 6

Проведенные опыты дают возможность учитывать изменение скорости звука в толще ледника, что позволит улучшить точность измерения толщины ледового слоя сейсмо-акустическим методом. Заслуживающим внимания является также факт изменения кристаллитной структуры льда при увеличивающемся давлении. Приведенные экспериментальные данные показывают, что в толще ледников должна преобладать мелкокристаллическая структура. Это позволяет приблизительно оценить рассеяние электромагнитных и звуковых волн при распространении в толще ледника, что имеет практическое значение при создании соответствующих измерительных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Богородский и В. Н. Рудаков. К вопросу об измерении толщины ледников электромагнитными методами. Ж. техн. физ., 1960, 30, 1, 82—89.
2. А. П. Капица. Предварительные итоги сейсмосондирования ледникового покрова в течение Советской антарктической экспедиции АН СССР 1955—1957 гг. Информ. сб. о работах географ. ф-та МГУ по МГГ, 1958, 1.
3. П. А. Шумский. Основы структурного ледоведения. М., Изд-во АН СССР, 1955, 281—288.
4. К. С. Александров, О. В. Носиков. Прибор для определения упругих модулей кристалла. Акуст. ж., 1956, 2, 3, 244—247.
5. В. В. Богородский. Упругие характеристики льда. Акуст. ж., 1958, 4, 1, 19—23.

Арктический и антарктический
н.-и. институт
Ленинград

Поступила в редакцию
17 апреля 1965 г.