

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА ВО ЛЬДУ, КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕМСЯ ИЗ СОЛЕНОЙ ВОДЫ

В. В. Богородский, В. П. Гаврило, В. А. Никитин

Распространение ультразвука в снежно-ледяном покрове обсуждено в работах [1–3], где приведены зависимости скорости продольных и сдвиговых волн от температуры, солености морского льда, плотности и структурных особенностей льда и снега. При объяснении особенностей распространения ультразвука в снегу и в морских льдах авторами в предыдущих работах [2, 3] применена теория распространения волн деформации в пористых средах, разработанная авторами [4] и получившая подробную физическую интерпретацию для различных моделей в экспериментальных исследованиях [5], а также метод расчета скорости звука в двухкомпонентной пористой среде [6].

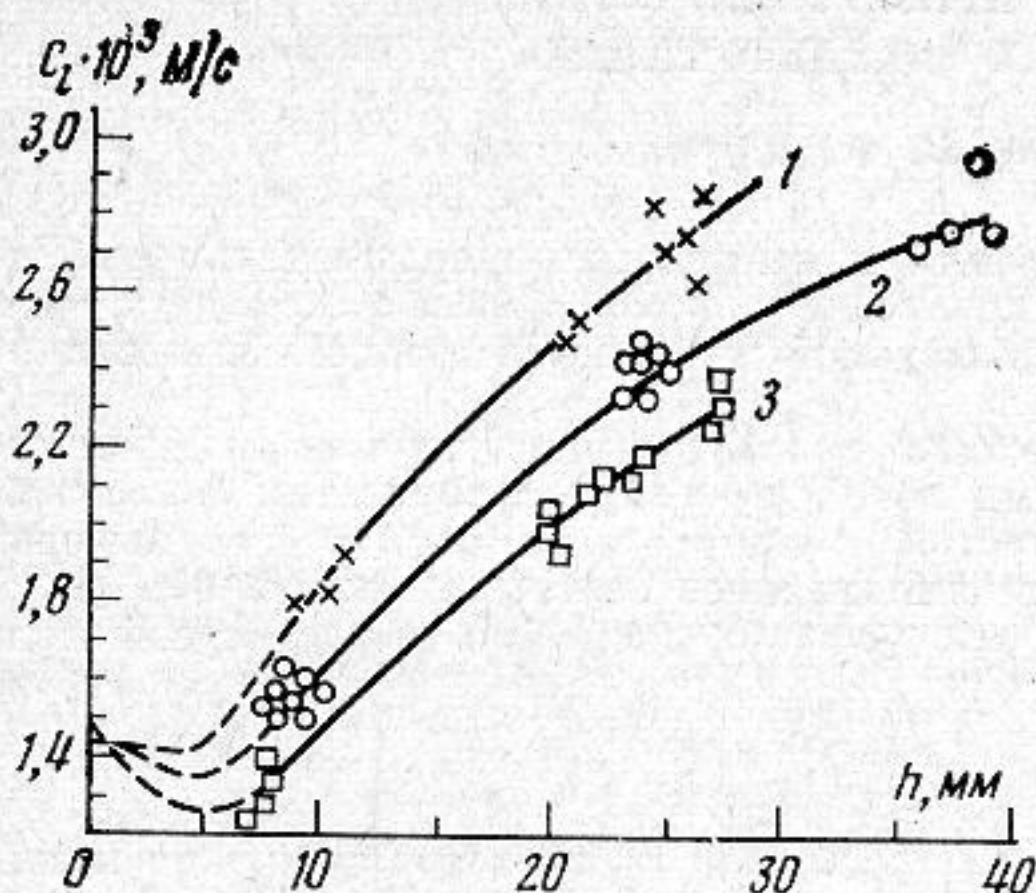
На основании работ [3–5] авторы высказали предположение, что существует такое состояние снежного покрова, которое можно назвать слабо консолидированной системой; при этом волна деформации распространяется в ней по сообщающимся между собой воздушным полостям. Акустическая длина пути по полостям увеличивается по сравнению с таковой по жесткому остову системы или в открытом пространстве, соответственно, значение скорости звука в снеге получается меньшим, чем в воздухе, что и подтверждено экспериментально [3].

Рассматривая структуру различных возрастных стадий морского льда (от иласса до белого) всегда можно установить наличие твердого остова, сформированного из кристаллов, и полостей, заполненных морской водой. Чем моложе лед, тем крупнее полости. В начальных формах (ледяное сало, снежура, шуга), а также в «ажурном» слое льда [7], возникающем на границе раздела фаз (при интенсивном росте ледяного покрова), наличествует слабо консолидированная структура: спаянные иглы, тонкие пластинки льда, а также сообщающиеся полости, заполненные морской водой. Отметим, что фазовый переход всегда сопровождается выделением примесей, в том числе пузырьков растворенного в морской воде газа. Следовательно, образующийся морской лед с определенными допущениями может рассматриваться как двухкомпонентная пористая система, в которой содержится незначительное количество газа. Было высказано предположение, что возникающие при кристаллизации газовые пузырьки вызовут увеличение сжимаемости такой системы, и как следствие — уменьшение скорости звука до значений меньших, чем скорость звука в воде, из которой лед образуется. Кроме того, локальное направление колебательного потока воды в такой слабо консолидированной среде, как образующийся морской лед, в котором полости соединены между собой, будет отличаться от направления градиента давления. Инерция вещества, заполняющего полости, увеличивается; эффективная плотность среды становится равной $k\rho_v$, где k — структурный фактор, ρ_v — плотность воды. Это также способствует уменьшению скорости звука C_l , зави-

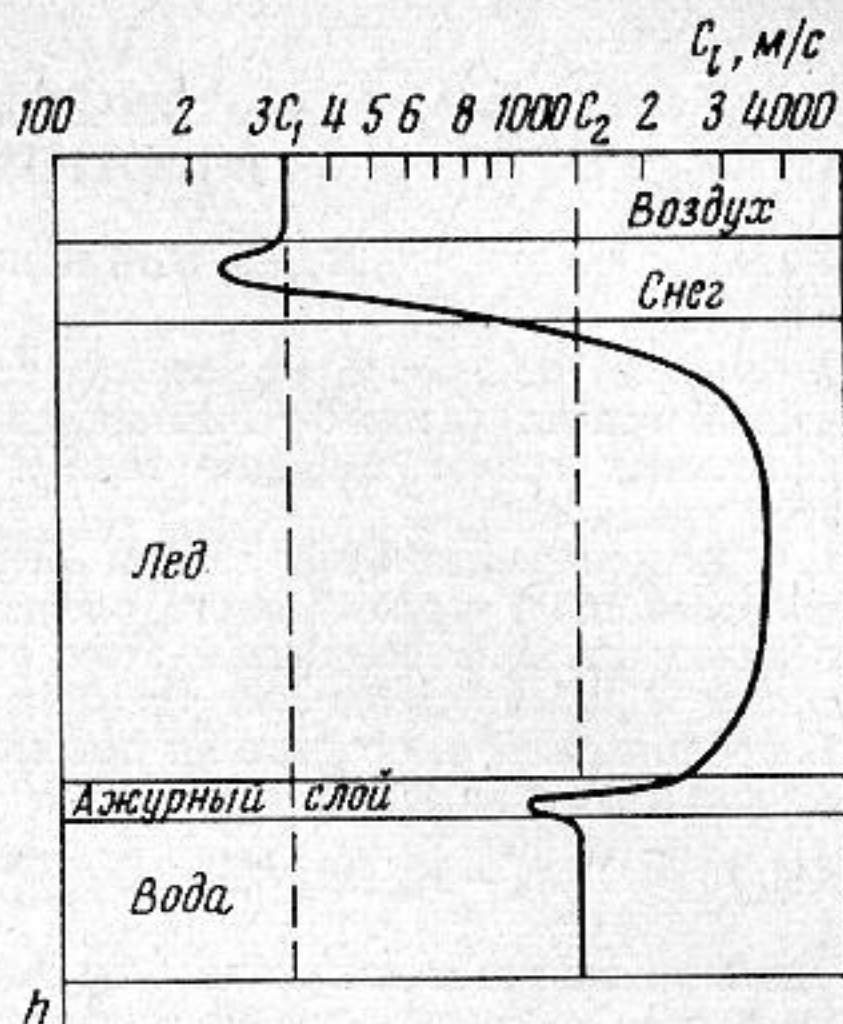
симость которой от сжимаемости K имеет вид $C_l = \sqrt{\frac{1}{\rho K}}$. Эти выводы подтвердились

экспериментами, проведенными в ледовом бассейне ААНИИ. Измерялась скорость ультразвука при частоте 800 кгц во льду, кристаллизующемся из воды соленостью 8; 25,3 и 36,6‰ по мере нарастания его толщины от 3 до 40 мм. Температура воздуха в бассейне при проведении опытов поддерживалась в пределах -11 — -13°C . Образующийся лед прозвучивался в направлении, перпендикулярном поверхности замерзания. Ошибка в измерении скорости не превышала ± 10 м/сек и определялась в основном погрешностью определения толщины ледяного покрова. Результаты измерений представлены на фиг. 1. Экстраполируя кривые, проведенные через экспериментальные точки, и зная скорость звука в морской воде в функции солености, мы получаем значения минимальной скорости ультразвука в ледяном слое. Во льду толщиной от 3 до 6 мм, образовавшемся из воды соленостью 8 и 25,3‰, нами не было обнаружено наличия скорости звука, меньшей, чем в воде соответственной солености. Однако во льду толщиной 7–8 мм, замороженном из воды соленостью 36,6‰ были получены значения скорости звука от 1230 до 1400 м/сек. Скорость звука в воде такой солености при $t = -1,8^\circ\text{C}$ равна 1440 м/сек. Полученные на основании эксперимента графические зависимости показывают, что минимумы скорости существуют для всего диапазона изменения солености воды; они отличаются друг от друга своими абсолютными значениями.

При увеличении толщины льда область перехода фаз начинает оказывать меньшее влияние, сообщающиеся полости постепенно изолируются друг от друга, и волна распространяется уже по жесткому скелету. Скорость распространения увеличивается и стремится к скорости звука в консолидированном льде, обладающем как объемной, так и сдвиговой упругостью. При уменьшении толщины, при движении по оси абсцисс влево от минимума (см. фиг. 1), скорость также возрастает и стремится к скорости звука в воде данной солености.



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Зависимость скорости ультразвука C_1 в формирующемся льду от степени его насыщения водой различной солености S_v : 1 — $S_v=8\text{‰}$; 2 — $S_v=25,3\text{‰}$; 3 — $S_v=36,6\text{‰}$

Фиг. 2. Распределение скорости ультразвука C_1 по толщине ледяного покрова, покрытого снегом, C_1 — скорость ультразвука в воздухе, C_2 — скорость ультразвука в воде

Необходимо отметить, что рассмотренные особенности распространения ультразвука будут наблюдаться не только во льдах, находящихся в процессе формирования, но и в так называемых внутриводных льдах (глубинных и донных), которые могут достигать при определенных условиях значительных объемов [8]. Внутриводный лед также является начальной стадией развития ледяного покрова и представляет собой слабо консолидированную систему, и, следовательно, к нему также относятся сделанные выше выводы.

На основании данных, приведенных в работах [1,3], а также полученных результатов, можно представить распределение скорости ультразвука по толщине ледяного покрова в период его нарастания так, как это показано на фиг. 2: скорость продольной волны имеет два минимума (в снегу и «ажурном слое») и максимум в средних слоях льда.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Богородский. Упругие характеристики льда. Акуст. ж., 1958, 4, 1, 19–23.
2. В. П. Гаврило, А. В. Гусев, В. А. Никитин. Исследование механических характеристик льдов Берингова моря. Тр. ААНИИ, Л., Гидрометеиздат, 1974, 324, 63–68.
3. В. В. Богородский, В. П. Гаврило, В. А. Никитин. Некоторые особенности распространения звука в снегу. Акуст. ж., 1974, 20, 2, 195–198.
4. К. Цвикер, К. Костен. Звукопоглощающие материалы. М., Изд-во иностр. лит., 1952, 160.
5. Н. Патерсон. Распространение сейсмических волн в пористых средах. Проблемы современной физики. М., Изд-во иностр. лит., 1957, 11, 109–129.
6. P. L. Chambre. Speed of a Plane Wave in a Gross Mixture. J. Acoust. Soc. Amer., 1954, 26, 3, 329–336.
7. Н. В. Черепанов. Структура морских льдов большой толщины. Тр. ААНИИ, Л., «Морской транспорт», 1964, 267, 13–18.
8. С. И. Кан. Морские льды. Л., Гидрометеиздат, 1974, 136.

Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт

Поступила
15 апреля 1975 г.