**Экспериментальное исследование упругих колебаний льда вмороженным векторным приемником**

Б.В. Неверов1, А.А. Кнышов1, А.Н. Котов2, Д.А. Преснов2, А.С. Шуруп1,2

1Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова,

физический факультет, кафедра акустики

2Инситут физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

neverov.bv21@physics.msu.ru

В настоящее время происходит интенсивное потепление в Арктике, превышающее по скорости изменения климата в других регионах Земли. Одним из главных признаков этого является быстрое сокращение как площади ледяного покрова, так и его толщины [1, 2]. Для улучшения точности климатических моделей и прогнозов глобального потепления проводятся полевые исследования. Ввиду сложных условий Арктики возможности таких экспериментов долгое время были ограничены. Современные методы пассивной сейсмоакустики позволяют преодолеть эти трудности, а также ограничения, связанные с использованием активных источников [3]. Анализ сейсмоакустических данных, полученных от автономных станций, позволяет проводить мониторинг параметров ледового покрова, тем самым улучшая понимание происходящих процессов. Настоящая работа посвящена развитию методов оценки параметров ледового покрова с помощью акустических приемников. Используется векторный приемник [4], вмороженный в лед, позволяющий проводить одновременные измерения трех ортогональных компонент упругих колебаний, формирующихся в ледовой пластине.

Экспериментальные исследования проводились в феврале 2024 года в акватории Клязьминского водохранилища на гидроакустическом полигоне МГУ. Регистрировались сигналы, формирующиеся при ударах кувалдой по поверхности льда. Расстояние от точки ударов до приемника составляло 130 метров; измерения проводились при удалении от берега 200 м. При постановке один канал приемника был ориентирован вертикально (), другой – вдоль линии, соединяющей точку приема и излучения (), третий – перпендикулярно этой линии (). В месте проведения эксперимента глубина водного слоя составляла 6.7 м, толщина льда 0.4 м. Результаты измерений на различных каналах векторного приемника представлены на рис. 1а. На рис. 1б изображена сумма спектрограмм сигналов с трех каналов ,  и . Как видно на рис. 1, в принятом сигнале выделяются несколько типов волн с различной поляризацией и с различными скоростями распространений. Первой приходит волна, дающая основной вклад на канале , причем дисперсии групповой скорости этой волны не наблюдается. Следующей приходит волна, наиболее заметная на канале ; дисперсия этой волны также не проявляется. Далее вступает широкополосный сигнал, энергия которого сосредоточена в высокочастотной области  250 Гц и после этого наблюдается последняя волна, у которой ярко проявляются дисперсионные свойства – вначале приходят высокие частоты, после чего низкие.

Ледовая пластина является волноводом, акустическое поле в котором представляет собой сумму мод. На низких частотах , когда  100 Гцм, здесь  – толщина льда, основной вклад в регистрируемый сигнал дают четыре моды [2]: нулевые симметричная и антисимметричная моды Лэмба (в дальнейшем обозначаются  и , соответственно), горизонтально поляризованная мода () и гравитационная изгибная мода. Мода  на рассматриваемых низких частотах практически совпадает c продольной волной во льду, не диспергирует и дает основной вклад на канале векторного приемника, направленного на источник () – это первая из пришедших на векторный приемник волн (рис. 1). Горизонтально поляризованная  мода также не проявляет дисперсионных свойств на низких частотах, распространяется со скоростью поперечных волн и дает основной вклад на горизонтальном канале  – это вторая из пришедших на векторный приемник волн (рис. 1). Гравитационная изгибная мода на низких частотах совпадает с волной Шолте – медленной поверхностной волной, распространяющейся вдоль границы «лед-вода», дисперсия которой проявляется заметно. Это последняя из пришедших на векторный приемник волн, дающая основной вклад на вертикальном канале , а также присутствующая на канале  в силу эллиптической поляризации этой волны в вертикальной плоскости. Тип полны, преобладающей в высокочастотном диапазоне  250 Гц (см. рис. 1б) на текущем этапе исследований однозначно не определяется. Это может быть как антисимметричная мода , так и сигнал, переотраженный от дна водоема, или иной тип волн. Присутствие вкладов отмеченных выше мод и на других каналах векторного приемника может быть связано с неидеальностью позиционирования этих каналов при установке приемника во льду. На текущем этапе обработки экспериментальных данных важно, что удалось выделить основные типы мод, формирующие низкочастотные колебания ледовой пластины. С одной стороны, выделенные моды соответствуют данным других авторов [2], с другой стороны, полученные результаты демонстрируют возможности используемого типа векторных приемников для мониторинга состояния льда, что является новым практическим результатом.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-27-00271.





(а) (б)

Рис 1. Пример временных реализаций сигналов  (а) от удара кувалдой по поверхности льда, а также сумма спектрограмм  этих сигналов (б).

ЛИТЕРАТУРА

1. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Шуруп А.С. // Акуст. журн. 2021. Т. 67. С. 72.
2. Serripierri A., et al. // The Cryosphere. 2022. V. 16ю. No. P. 2527.
3. Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С. // Акуст. журн. 2023. Т. 69 (5). С. 637–651.
4. Гордиенко В.А. “Векторно-фазовые методы в акустике”. М.: Физматлит, 2007.