

Рис. 1

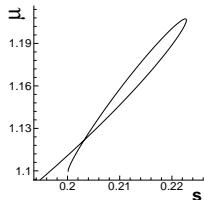


Рис. 2

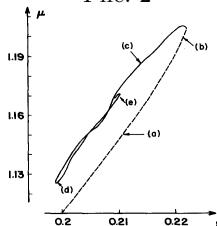


Рис. 3

Распространение волн под ледяным покровом: результаты натурных измерений, физические механизмы диссипации энергии и моделирование

А. В. Марченко

Университетский центр на Сvalльбарде, Норвегия
Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова,
Россия

При распространении волн из свободных ото льда областей океана в области, находящиеся под ледяным покровом, происходит изменение спектра волн и затухание их амплитуды. Воздействие волн на сплошной лед может привести к его разделению на небольшие льдины на достаточно обширной площади в течение нескольких часов. По сравнению со сплошным льдом битый лед

менее устойчив к термическому воздействию и более подвижен. Эти эффекты вызывают интерес в связи с уменьшением площади льда в Арктике и прилегающих морях, освоением арктического шельфа и развитием навигации в высоких широтах.

Регистрация волн проводилась в нескольких экспедициях в Баренцево море с 2004 года по настоящее время. Измерения проводились с помощью акустического измерителя скоростей частиц воды (ADV SonTek, 5 MHz), закрепленного на дрейфующем льду, на глубине порядка 1 м подо льдом. В экспериментах использовалась частота измерений от 1 до 10 Гц. Дополнительные измерения проводились двумя датчиками давления воды (SBE-39), подвешенными на тросе на различной глубине, и с помощью закрепленных на льду акселерометров, измеряющих углы отклонения их осей от вектора магнитной индукции Земли, угловые скорости и линейные ускорения в собственной системе координат. Частота измерений давления — 1 Гц, частота измерений акселерометров — 5 Гц. Измерения, проведенные тремя методами, показывают аналогичные спектральные характеристики измеряемых величин.

По результатам натурных измерениям восстанавливается амплитуда, частота и длина волн в точке измерений. Высокочастотные измерения скоростей воды в подледном слое дают возможность расчета напряжений Рейнольдса и коэффициента вихревой вязкости в подледном слое. Характерные периоды волн, наблюдавшихся в Баренцевом море под ледяным покровом, находились в интервале 10–12 секунд соответствующем волнам зыби. Максимальные амплитуды волн не превышали 30 см и, как правило, были меньше 10 см. Коэффициенты вихревой вязкости изменились в широких пределах. При этом их максимальные значения превышали $100 \text{ см}^2/\text{с}$. Корреляция между амплитудой волн и вихревой вязкостью не замечена. Установлено, что вихревая вязкость и кинетическая энергия флюктуаций средних течений в подледном слое пропорциональны средней скорости дрейфа льда относительно воды. Высокие значения вихревой вязкости были получены для районов интенсивного дрейфа льда в Баренцевом море, возникающего вследствие воздействия ветра и приливов.

Влияние упругости льда на волны периодом 10–12 секунд мало, когда толщина льда менее 1 м (в Баренцевом море толщина дрейфующего льда обычно не превышает 60 см). Поэтому основное влияние на изменение спектра и амплитуд волн оказывает процесс диссипации энергии в граничном слое воды около льда.

Простейшая модель состоит в использовании решения Стокса, описывающего пограничный слой около осциллирующей пластины. В случае волн решение вне пограничного слоя описывается известным решением, описывающим линейную гравитационную волну, а решение внутри пограничного слоя зависит от коэффициента вихревой вязкости и движения льда относительно воды. Использование этой модели объясняет затухание высокочастотных волн и смещение спектрального максимума в область низкочастотных волн с периодом порядка 10 секунд и более.

При распространении волн в более толстых льдах влияние вязкости льда на затухание волн может оказаться существенным. Для оценок использованы результаты экспериментов по циклическому нагружению образцов льда, показывающие, что энергия диссиpации не превышает 5 процентов упругой энергии льда при напряжениях сжатия-растяжения меньших 0.5 МПа. Эта оценка обычно выполняется для напряжений, вызванных изгибом льда, не приводящим к его разрушению.

Литература

1. Collins, C.O., Rogers, W.A., Marchenko, A., Babanin, A.V., 2015. In situ measurements of an energetic waves event in the Arctic marginal ice zone. Geoph. Res. Letters, 42, 6, 1863–1870.
2. Marchenko, A.V., Gorbatsky, V.V., Turnbull, I.D., 2015. Characteristics of under-ice ocean currents measured during wave propagation events in the Barents Sea. POAC15-00171, Trondheim, Norway, 11 pp.
3. Marchenko, A.V., Morozov, E.G., 2016. Surface manifestation of the waves in the ocean covered with the ice. Russian Journal of Earth Sciences, Vol. 16, ES1001, doi:10.2205/2016ES000561.
4. Marchenko, A., 2016. Damping of surface waves propagating below solid ice. Proceedings of the Twenty-sixth International Ocean and Polar Engineering Conference ISOPE, Rhodes, Greece, 16TPC-0680, 8pp.
5. Marchenko, A., Rabault, J., Sutherland, G., Collins III, C.O., Wadhams, P., Chumakov, M., 2017. Field observations and preliminary investigations of a wave event in solid drift ice in the Barents Sea. POAC17-087, 13pp.
6. Marchenko, A., Cole, D., 2017. Three Physical Mechanisms of Wave Energy Dissipation in Solid Ice. POAC17-086, 9pp.