

УДК 551.467

ЗАТУХАНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ПОД ПРИПАЕМ

Член-корреспондент РАН Б. В. Левин^{1,2}, П. Д. Ковалев¹,
Д. П. Ковалев^{1,*}, К. В. Кириллов¹

Поступило 07.08.2018 г.

Получены значения коэффициента затухания морских волн с периодами от 4 до 30 с подо льдом в зависимости от длины волны для прибрежной зоны Охотского моря по данным экспериментальных наблюдений. С использованием модельного дисперсионного соотношения волн подо льдом рассчитаны теоретические значения коэффициента затухания и выполнено их сравнение с полученными из экспериментальных данных по соотношению спектральных энергий волн для открытой воды и подо льдом. Используя полученные значения коэффициента затухания, можно для амплитуд волн разных периодов рассчитать до какого расстояния под припаем будут распространяться волны с критической амплитудой и где возможен разлом льда.

Ключевые слова: морские волны, лёд, пластина льда, затухание волн.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524844482-486>

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения за проникновением океанских волн под морской лёд, проведённые зарубежными исследователями, показали, что короткие морские ветровые волны очень быстро ослабевают и в пределах нескольких сотен метров от края льда (припая) их энергия в значительной степени уменьшается. Однако длинные волны и зыбь ещё обнаруживаются в сотнях километров подо льдом [1]. Результаты наших наблюдений, выполненные под припаем — ледовой зоной Охотского моря вблизи с. Охотское, юго-восточное побережье о. Сахалин, также согласуются с этими выводами.

Морские волны входят под ледяной покров в виде изгибно-гравитационных волн, заставляя лёд со временем ритмично изгибаться. Если изгиб вызывает напряжения, которые больше, чем лёд может выдержать, то происходит разрушение, а оставшийся лёд будет разрушаться аналогичным образом. Систематическое разрушение ледового щита этим способом является быстрым процессом, особенно когда ледяные поля примыкают к открытой воде.

В работе [1] приведены критические амплитуды морских волн различных периодов, при

превышении которых начинается разрушение льда. Так, для ветрового волнения с периодами 5–10 с критической является амплитуда всего в 9 см, для зыби с периодом около 15 с — 28 см и для волнения с периодами более 25 с — выше 1 м. Зная эти величины и коэффициент затухания волн подо льдом, можно определить, на каком расстоянии от кромки льда возможно его разрушение.

Исследование энергии волнения под припаем о. Сахалин имеет большое практическое значение, поскольку позволяет определить возможность разрушения прибрежного льда и образование свободных льдин и айсбергов. Данная информация необходима для безопасной работы буровых платформ на шельфе, подводных трубопроводов и морского транспорта как в Охотском море, так и в морях Арктического бассейна.

ДАнные НАБЛЮДЕНИЙ

ИМГиГ ДВО РАН изучает волнение в прибрежной зоне вблизи с. Охотское с 2009 г. с использованием автономных регистраторов волнения (АРВ) с записью данных с секундной дискретностью. На рис. 1 представлен район проведения круглогодичных наблюдений за волнением.

В результате были получены качественные ряды наблюдений волнения и температуры воды в зимний период, в том числе и в море, покрытом льдом (рис. 2), начиная с осени 2009 г. по весну 2017 г. за исключением зимнего периода

¹ Институт морской геологии и геофизики
Дальневосточного отделения Российской Академии наук,
Южно-Сахалинск

² Институт океанологии им. П.П. Шишова
Российской Академии наук, Москва

*E-mail: d.kovalev@imgg.ru

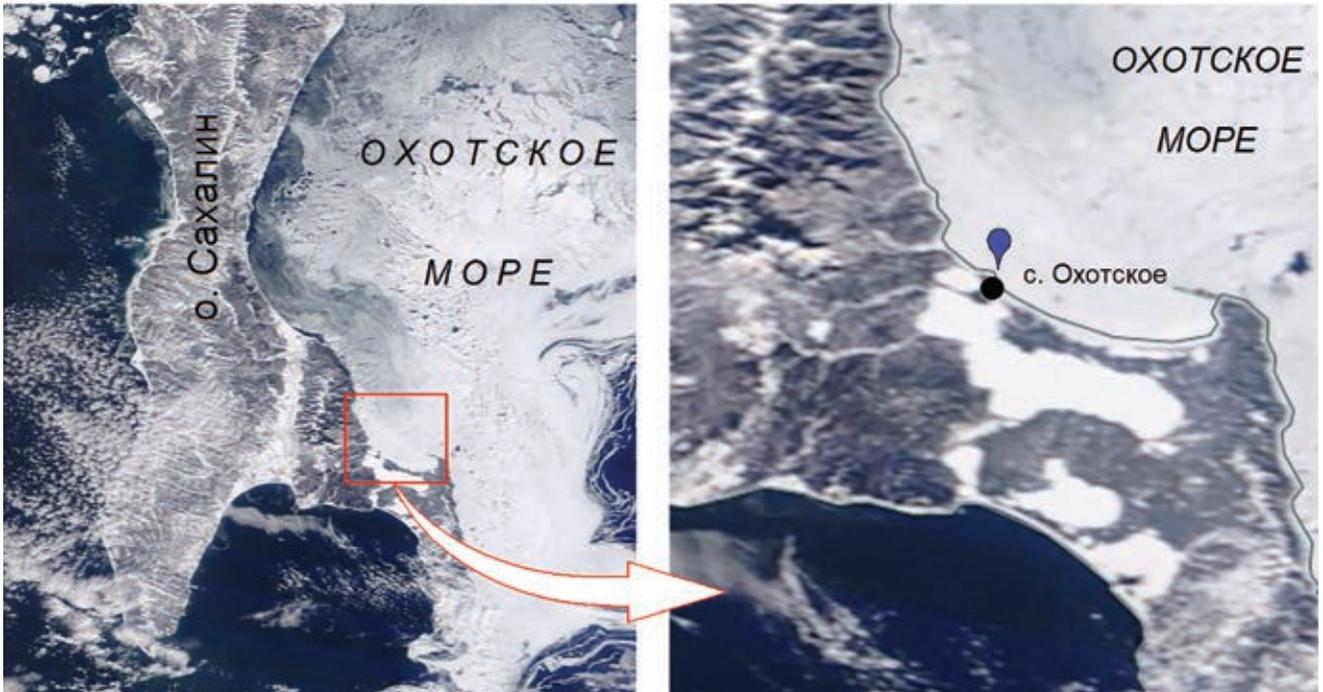


Рис. 1. Юго-западная часть Охотского моря 21 января 2016 г. Выделен район проведения наблюдений. По данным сайта NASA.

2010–2011 гг. Был проведён их спектральный анализ и оценена энергия колебаний в зависимости от периода волн. Результаты анализа натуральных данных использованы в настоящей работе для сравнения с модельными расчётами.

Следует отметить, что под припаем в настоящей работе понимается часть мощных ледяных образований, которая садится на грунт и при смене направления ветра не позволяет льду отойти от берега. Со временем происходит смерзание массива, и он существует в виде припая пока под воздействием нескольких одновременно действующих динамических факторов (как правило, сочетания сизигийных приливов, высоких скоростей вдольбереговых приливных течений, ветровых нагрузок и т.д.) не произойдёт его разрушения [2].

ДИСПЕРСИОННОЕ СООТНОШЕНИЕ

Оценить затухание волн подо льдом для волн различных длин только по экспериментальным данным непросто, поскольку имеется сложная зависимость длины волны подо льдом от периода, который, в свою очередь, зависит от толщины льда. Необходимо дисперсионное соотношение, с помощью которого можно определить коэффициенты затухания для волн разной длины.

Для оценки коэффициента ослабления волн подо льдом были рассмотрены модели разных

авторов, в которых получены дисперсионные соотношения для волн в море, покрытом льдом. Одной из первых, по-видимому, была модель Вадхэма [3, 4], основанная на работах Гринхила [5]. Модель разработана в начале 1970-х годов и ледовый покров в ней рассматривается как плавающий эластичный плот, а уравнения для потенциала скорости на переднем и заднем краях плота решались приближённо. Внутри самого плота энергия распространяется как изгибно-гравитационная волна с изменённым отношением дисперсии. Таким образом, льдина рассеивает поступающую энергию океанской волны из-за рассогласования импеданса между режимом распространения под плотом по сравнению с таковым для открытой поверхности воды. Обработка

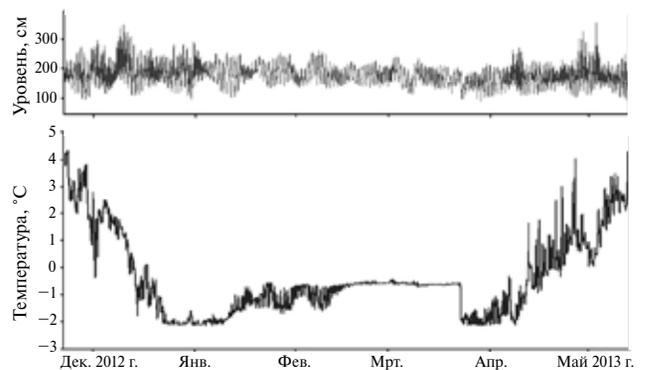


Рис. 2. Временной ход колебаний уровня моря и температуры с декабря 2012 по май 2013 г.

данных по волнению позволяет определить коэффициент отражения энергии, из которого может быть получен коэффициент затухания для поля таких плотов.

В модели Вадхэма не получено законченного решения с учётом потенциалов скорости по краю льдины. Такое решение позднее было найдено в работе [6] для полубесконечной льдины и для льдины конечной длины с использованием функции Грина в работе [7]. Другая модель ослабления волн, предложенная Лю и Молло-Кристенсенем [8], учитывает вязкое затухание волн при сжатии пакового льда. В конечном итоге исследователи пришли к схожим моделям и дисперсионным соотношениям для изгибно-гравитационных волн [9, 10].

Групповая скорость волн, движущихся подо льдом, зависит от частоты и от толщины льда, но для реалистичной толщины (например, 2 м) скорости волн с периодами менее 20 с значительно отличаются от скоростей волн в открытой воде. Для расчёта коэффициента затухания необходимы данные о групповой скорости волн в открытой воде и во льдах различной толщины, которые могут быть получены с использованием численного решения модельного дисперсионного соотношения [4]:

$$Dk_0^5 + (\rho_w g - \rho_i h \omega^2)k_0 - \rho_w \omega^2 = 0, \tag{1}$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-s^2)}, \tag{2}$$

где k_0 — волновое число, ρ_w и ρ_i — плотности воды и льда соответственно, $\rho_i/\rho_w = 0,9$ и $\rho_w = 1025 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, h — толщина льда и ω — угловая частота волны; D определяет жёсткость льда на изгиб и зависит от модуля Юнга E и коэффициента Пуассона s . В работе использовано значение $E = 6 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$, $s = 0,3$.

Для исследования затухания энергии волнения подо льдом было использовано выражение для коэффициента затухания энергии α , полученного в работе [11] и преобразованного нами к зависимости от длины и периода волны:

$$\alpha = \frac{15,7\sqrt{\nu/T}}{1,41(\lambda^2/T)(1+5,9 \cdot 10^6 h/\lambda)}, \tag{3}$$

где ν — вихревая вязкость в турбулентном пограничном слое подо льдом. В работе [12] показано, что её вертикальное среднее значение составляет $0,019 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. В результате расчёта построен график изменения коэффициента затухания энергии волн для разных длин волн и толщины льда, приведённый на рис. 3.

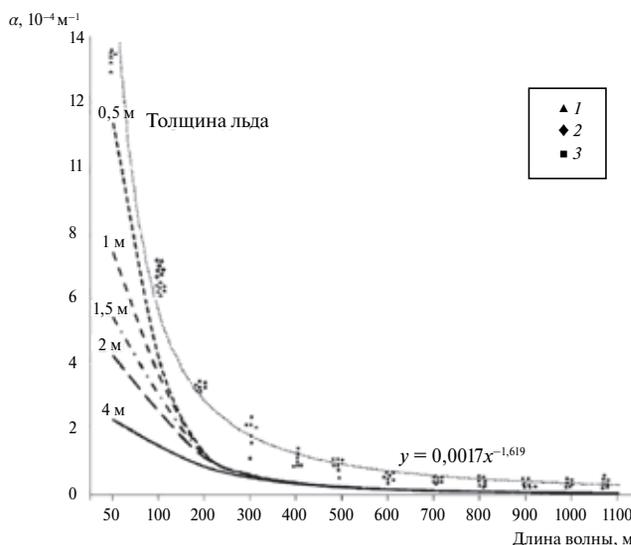


Рис. 3. Значения коэффициента затухания волн α в зависимости от длины волны и толщины льда. Точками отмечены данные из эксперимента: 1 — для льда толщиной 0,5 м, 2 — для 2 м, 3 — общие для толщины 0,5 и 2 м. Пунктиром показана степенная линия тренда и приведено её уравнение для экспериментальных данных.

Так же на рис. 3 приведены значения коэффициента затухания, полученные из экспериментальных данных, и показана линия тренда. Ход экспериментальной кривой коэффициента затухания близок к теоретическому. Видно, что значения коэффициентов затухания, полученные по данным экспериментов, больше, чем теоретические, что может быть связано с рядом причин, таких как сделанные в модели приближения, а также отличие реальных параметров льда и морской воды на момент конкретных измерений от принятых в модели, недостаточной плотности ледового припая и наличие больших трещин, которые не видны на спутниковых снимках.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что для коротких волн с длиной меньше 300 м коэффициент затухания существенно возрастает с уменьшением длины волны. Это, как полагают в работе [12], связано с многократным рассеянием и отражением волн на краях льдин. В природе часть ледяного поля, которая примыкает к открытому морю, почти всегда разбивается на конечные льдины, поэтому простая теория не может быть применена к волнам короткого периода.

Близкие значения коэффициентов затухания к экспериментально полученным в настоящей работе приведены в статьях П. Вадхэма, в частности [13]. Энергия волн экспоненциально убывает с коэффициентом затухания, который колеблется между $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ для длинных волн до $8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ для волн с периодом 8–9 с. Эти величины

основаны на “средних” значениях, и авторы [14] отмечают, что существуют большие неопределённости относительно точных значений коэффициента затухания и того, как он зависит от ледового состояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена зависимость коэффициента затухания волнения подо льдом от длины волны для прибрежной зоны Охотского моря. Сравнение полученных результатов с модельными и экспериментальными работами зарубежных авторов показали хорошее соответствие величин коэффициента затухания, хотя в зарубежных работах приведены средние значения, в то время как их авторы отмечают, что существуют большие неопределённости относительно точных значений коэффициента затухания и того, как он зависит от ледового состояния.

Показано, что длины волн подо льдом значительно больше по сравнению с длинами волн аналогичных периодов в открытой воде, т.е. присутствие жёсткого морского льда значительно изменяет длину волны в зависимости от толщины льда. Для волн с периодами больше 20 с их длина не зависит от толщины льда и близка к длине волн на открытой воде.

Для коротких волн с длиной меньше 300 м коэффициент затухания существенно возрастает с уменьшением длины волны, что связано с многократным рассеянием и отражением на краях льдин. В природе часть ледяного поля, которая примыкает к открытому морю, почти всегда разбивается на конечные льдины, поэтому простая теория не может быть применена к волнам короткого периода.

Используя полученный коэффициент затухания, можно для амплитуды волны на входе под припай рассчитать, до какого расстояния будет распространяться волна с критической амплитудой, способная разрушить лёд, а значит, определить, на каком расстоянии от кромки льда возможен его разлом.

Источник финансирования. Работа выполнена в соответствии с государственной программой ИМГиГ ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Squire V.A., Dugan J.P., Wadhams P., Rottier P.J., Liu A.K.* Of ocean waves and sea ice // *J. Fluid. Mech.* 1995. V. 27. P. 115–168.
2. *Пищальник В.М., Покрашенко С.А., Леонов А.В., Гальцев А.А.* Особенности развития ледяного покрова Охотского моря в 2001–2006 гг. Сб. статей РЭА № 1. М., 2009. С. 185–197.
3. *Wadhams P.* Attenuation of swell by sea ice // *J. Geophys. Res.* 1973. 78(18): P. 3552–3563.
4. *Wadhams P.* The Seasonal Ice Zone. In: *The Geophysics of Sea Ice.* N.Y.: Plenum, 1986. P. 825–991.
5. *Greenhill A.G.* Wave Motion in Hydrodynamics // *Amer. J. Math.* 1887. V. 9. P. 62–112.
6. *Fox C., Squire V.A.* On the Oblique Reflexion and Transmission of Ocean Waves from Shore Fast Sea Ice // *Phil. Trans. Roy. Soc. A* 1994. V. 347. P. 185–218.
7. *Meylan M., Squire V.A.* A Model for the Motion and Bending of an Ice Floe in Ocean Waves // *Int. J. Offshore Polar Eng.* 1993. V. 3. P. 322.
8. *Liu A.K., Mollo-Christensen E.* Wave Propagation in a Solid Ice Pack // *J. Phys. Oceanogr.* 1988. V. 18. P. 1702–1712.
9. *Музылев С.В.* Волны в океане под ледяным покровом: основы теории и модельные задачи. В сб.: *Современные проблемы динамики океана и атмосферы.* М.: Триада, 2010. С. 315–345.
10. *Marchenko A., Morozov E., Muzylev S.* Measurements of sea-ice flexural stiffness by pressure characteristics of flexural-gravity waves // *Ann. Glaciol.* 2013. V. 54(64). P. 51–60.
11. *Liu A.K., Vachon P.W., Peng C.Y., Bhogal A.S.* Wave attenuation in the marginal ice zone during LIMEX // *Atmos. Ocean.* 1992. V. 30. № 2. P. 192–206.
12. *McPhee M.G., Morison J.H.* Under-Ice Boundary Layer. *Encyclopedia of Ocean Sciences.* San Diego: Acad. Press, 2001. P. 3071–3078.
13. *Wadhams P., Squire V.A., Goodman D.J., Cowan A.M., Moore S.C.* The Attenuation Rates of Ocean Waves in the Marginal Ice Zone // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 6799–6818.
14. *Squire V.A., Moore S.C.* Direct Measurement of the Attenuation of Ocean Waves by Pack Ice // *Nature.* 1980. V. 283. P. 365–368.

ATTENUATION OF GRAVITY WAVES IN FAST ICE

**Corresponding Member of the RAS B. V. Levin, P. D. Kovalev,
D. P. Kovalev, K. V. Kirillov**

Received August 7, 2018

The attenuation coefficients of sea waves in ice in the coastal zone of the Sea of Okhotsk with periods from 4 to 30 s were estimated as a function of their wavelength based on observations. We used the model dispersion relation for these waves in ice and calculated the theoretical attenuation coefficients. We compared them with those from the data of experiments based on the relation of the spectral energies of waves in ice-free water and in ice. It is possible to use the estimated attenuation coefficients for waves of different periods to calculate the distance of wave propagation in fast ice with the critical amplitude where ice breaking is possible.

Keywords: sea waves, ice, ice plate, waves attenuation.