

УДК 534.2;534.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ПУЗЫРЬКОВОГО СЛОЯ В ОКЕАНЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННЕЙ ВОЛНЫ

© 2011 г. А.С. Топольников¹, К.Р. Хуснутдинова², Л.А. Островский³, Р. Гримшоу²¹Институт механики УНЦ РАН, Уфа²Университет Лафборо (Великобритания)³Университет Колорадо, Боулдер (США)

tandrew@anrb.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

На основе построенной математической модели исследуется влияние внутренней волны на распределение пузырьков в приповерхностном слое океана. Изучаются два возможных механизма обрушения поверхностных волн: сильный ветер и взаимодействие с внутренней волной. Численная реализация математической модели для заданной формы внутренней волны (периодическая синусоидальная и кноидальная) показала, что оба механизма способствуют возникновению неравномерного распределения пузырьков в слое вблизи поверхности океана, которое качественно копирует профиль внутренней волны.

Ключевые слова: подводная акустика, внутренние волны, пузырьковый слой.

Введение

Согласно экспериментальным наблюдениям [1, 2], при распространении внутренней волны по поверхности раздела двух слоев жидкости разной плотности в прибрежном слое океана наиболее интенсивное обрушение поверхностных волн происходит в моменты времени, соответствующие прохождению гребня внутренней волны. Такая картина наблюдается как для слабого ветра (2–3 м/с), когда обрушение поверхностных волн имеет очаговую структуру, так и в случае сильного ветра (10–15 м/с), когда обрушение происходит равномерно по поверхности океана. При этом распределение пузырьков в приповерхностном слое океана приблизительно копирует профиль внутренней волны.

Математическая модель

Для теоретического обоснования наблюдаемого эффекта предлагается математическая модель, которая описывает динамику пузырьков в приповерхностном слое океана под действием внутренней волны. Решение задачи ищется для двумерной пространственной области

$$\Omega = \{(x, z) : 0 \leq x \leq \lambda, -H \leq z \leq 0\},$$

где x и z – горизонтальная и вертикальная координаты, λ – длина внутренней волны, H – общая глубина. Для описания динамики пузырьков используется система уравнений [3]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Nu) + \frac{\partial}{\partial z}(Nv) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_v \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial N}{\partial z} \right) - \sigma^* N + q(x, z, t), \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt_b} \left(\frac{4}{3} \pi \rho_g a^3 \right) = -4\pi a D \kappa (p_g - p) Nu,$$

$$\frac{d}{dt_b} \left(\frac{p_g}{\rho_g} \right) = 0, \quad (2)$$

где N – объемная концентрация пузырьков, u и v – компоненты скорости, K_v и D – коэффициенты турбулентной и молекулярной диффузии, σ^* – скорость растворения пузырьков, $q(x, z, t)$ – поток пузырьков с поверхности, a – радиус пузырька, ρ_g и p_g – плотность и давление газа в пузырьке, p – давление в жидкости, Nu – число Нуссельта,

$$\frac{d}{dt_b} = \frac{\partial}{\partial t} + \left(u - \frac{K_v}{N} \frac{\partial N}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial x} + \left(v - \frac{K_v}{N} \frac{\partial N}{\partial z} \right) \frac{\partial}{\partial z}. \quad (3)$$

Изменение концентрации пузырьков в жидкости обусловлено их генерацией на поверхности в результате обрушения поверхностных волн, растворением, турбулентной диффузией, действием сил плавучести и конвективным переносом в жидкости. Смещение пикноклина, который разделяет жидкости с плотностями ρ_1 и ρ_2 , задается функцией $z = -h + \xi(x, t)$. Система уравнений (1)–(3) решается численно с периодическими граничными

ми условиями при $x = 0$ и $x = \lambda$. Верхняя и нижняя границы считаются непроницаемыми, на верхней границе поддерживаются постоянные значения a , ρ_g и N . Внутренняя волна задается аналитическим решением для линейной или кноидальной волны в двухслойной жидкости.

Для адекватного задания $q(x, z, t)$ изучаются два возможных механизма обрушения поверхностных волн: сильный ветер и взаимодействие с внутренней волной. В первом случае обрушение поверхностных волн порождает равномерную по всей поверхности океана инъекцию пузырьков в жидкость ($q = q_0 \delta(z + \epsilon)$, $0 < \epsilon \ll H$). Во втором случае, который является характерным для слабых скоростей ветра (2–3 м/с), когда приток пузырьков с поверхности не является равномерным, происходит непосредственное взаимодействие внутренней волны с сонаправленными волнами на поверхности: обрушение наблюдается в тех областях, где разность скоростей волны и горизонтального перемещения жидкости вблизи поверхности превышает пороговое значение ($q = q(x - ct, t, z)$, где c – скорость распространения внутренней волны).

Результаты расчетов

Численная реализация математической модели для заданной формы внутренней волны (периодическая синусоидальная и кноидальная) показала, что каждый из описанных механизмов способствует возникновению неравномерного распределения пузырьков в слое вблизи поверхности океана. На рис. 1 показаны распределения объемной концентрации газа в жидкости для кноидальной формы внутренней волны (движется слева направо): *а*) равномерное обрушение при сильном ветре (12.5 м/с); *б*) обрушение, вызванное взаимодействием с внутренней волной, при слабом ветре (2.5 м/с). Установлено, что профили объемной концентрации пузырьков, скорости звука и функции рассеяния, построенные для глубин порядка 0.5–3 м, качественно повторяют структуру внутренней волны с небольшим сдвигом в направлении ее перемещения.

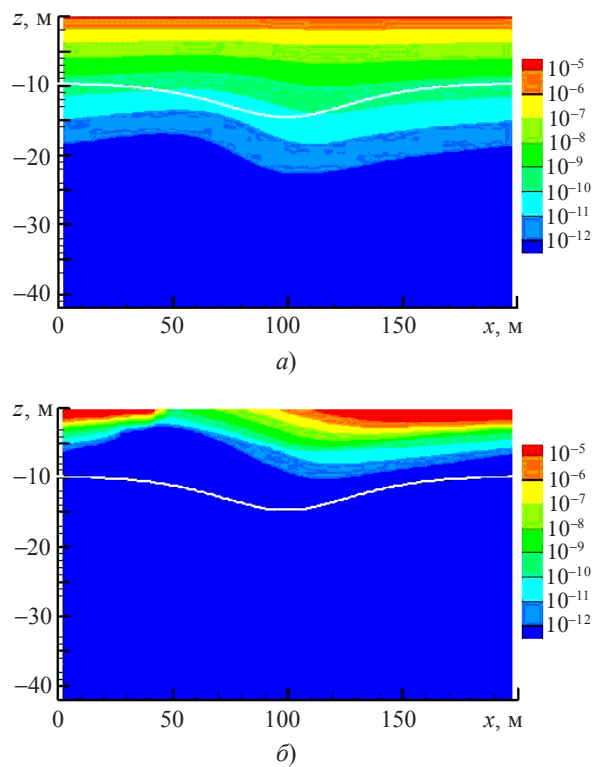


Рис. 1

Заключение

Проведенные теоретические исследования показали, что внутренняя волна оказывает влияние на распределение пузырькового слоя вблизи поверхности океана, модулируя его в соответствии со своей формой. Полученные результаты могут найти приложения для описания явлений, возникающих в поверхностном слое океана, и опосредованного наблюдения внутренних волн.

Список литературы

1. Thorpe S.A., Belloul M.B., Hall A.J. // Nature. 1987. V. 330. P. 740–742.
2. Серебряный А.Н., Галыбин Н.Н. // Материалы XI школы-семинара акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана» и XVII Сессии РАО. 2006. С. 378–383.
3. Grimshaw R.H.J., Khusnutdinova K.R., Ostrovsky L.A., Topolnikov A.S. // Physics of Fluids. 2010. V. 22. P. 106603.

**MODELING THE DYNAMICS OF THE SUBSURFACE BUBBLE LAYER
IN THE OCEAN UNDER THE EFFECT OF AN INTERNAL WAVE***A.S. Topolnikov, K.R. Khusnutdinova, L.A. Ostrovsky, R. Grimshaw*

The effect of an internal wave on the distribution of bubbles in the subsurface ocean layer is investigated using the developed mathematical model. Two possible mechanisms of breaking of surface waves are considered: when breaking is caused either by a strong wind or by its interaction with an internal wave. The numerical simulation of the mathematical model for the given shape of an internal wave (periodic sinusoidal and cnoidal) shows that both mechanisms lead to the formation of a non-uniform distribution of bubbles in the layer near the ocean surface, which qualitatively copies the profile of the internal wave.

Keywords: underwater acoustics, internal waves, bubble layer.