ГЕОФИЗИКА

УДК 551.466

МЕХАНИЗМ ТРАНСФОРМАЦИИ СТРАТИФИКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ОКЕАНА ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЯХ ДНА

М. А. Носов, С. Н. Скачко

(*кафедра физики моря и вод суши*)

Показано, что один из возможных физических механизмов, способных обеспечить транспорт глубинных вод к поверхности океана при подводном землетрясении, состоит в формировании нелинейного течения при колебаниях участка дна.

В работах [1, 2] описано возникновение аномалий температуры поверхности океана над эпицентрами подводных землетрясений. Образование этих аномалий может быть объяснено интенсификацией вертикального обмена в океане в результате сейсмических движений дна. С точки зрения затрат энергии такое объяснение обосновано в работе [3]. Но конкретный механизм, вызывающий подъем глубинных вод к поверхности, до сих пор обнаружен не был.

Для определения этого механизма была проведена серия лабораторных экспериментов в бассейне кубической формы с внутренними размерами $22 \times 22 \times 22$ см. В центре дна бассейна имелось круглое отверстие, в котором располагался поршень диаметром 7 см, совершающий вертикальные гармонические колебания заданных амплитуды и частоты. Эксперименты проводились в диапазонах частот колебаний 5–35 Гц и их амплитуд 0,6–2,65 мм. Бассейн заполнялся непрерывно стратифицированной жидкостью (водный раствор NaCl), закон вертикального распределения плотности которой был близок к линейному. Градиент плотности в различных экспериментах варьировался от 30 до 500 кг/м^4. Глубина воды в бассейне во всех случаях составляла 16 см. Прозрачные боковые стенки позволяли визуализировать процесс трансформации стратификационной структуры теневым методом и регистрировать теневые картины с помощью цифровой фотокамеры.

Размер плейстосейстовой зоны подводного землетрясения обычно значительно превосходит глубину океана. В экспериментах размер поршня меньше глубины бассейна. В этой связи отметим, что нашей целью было выявление механизма транспорта глубинных вод к поверхности, а не моделирование реального природного процесса. Кроме того, при небольшом размере поршня колебательное движение жидкости сосредоточено вблизи источника, а генерацией гравитационных волн можно пренебречь [4]. Последнее обстоятельство позволяет использовать бассейн небольших размеров.

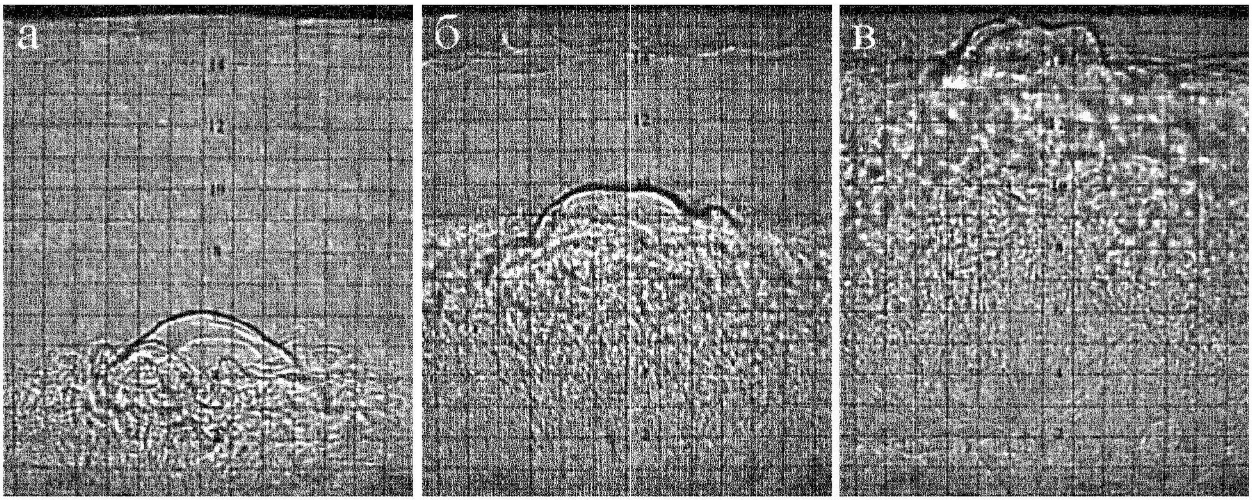

Рис. 1. Теневые картины разрушения непрерывной стратификации при гармонических колебаниях участка дна по мере возрастания колебательной скорости поршня (от *а* к *в*). Шаг сетки — 1 см

В результате экспериментов было установлено, что над колеблющимся поршнем формируется «купол» (рис. 1), высота которого определяется градиентом плотности и колебательной скоростью поршня. При фиксированной частоте колебаний поршня высота «купола» меняется медленно. Причиной возникновения «купола» является ярко выраженное турбулизованное течение, сосредоточенное над центральной частью поршня внутри цилиндрической области диаметром 2–3 см. Течение направлено вертикально вверх. Его максимальная скорость (по визуальной оценке) достигала 10 см/с. Вблизи стенок бассейна происходило относительно медленное опускание жидкости. На поверхности, так же как это наблюдалась в работах [5, 6], формировались стоячие волны (диссипативные структуры). Поверхностные волны приводили к разрушению стратификации в приповерхностном слое толщиной около 2 см, что хорошо видно на теневой картине (рис. 1, *б*). При больших колебательных скоростях поршня (рис. 1, *в*) происходило смыкание приповерхностного перемешанного слоя и турбулизованного течения: «глубинные воды выходили на поверхность».

Далее рассмотрим вспомогательную задачу, решение которой позволит описать поле скорости в жидкости при колебаниях участка дна. Будем считать, что безграничный по горизонтали слой идеальной несжимаемой однородной жидкости расположен в поле силы тяжести. Глубина слоя постоянна и равна H. Начало цилиндрической системы координат расположим на невозмущенной свободной поверхности, ось Oz направим вертикально вверх. Будем решать осесимметричную задачу относительно потенциала скорости течения $F(r,z,t)$:

$$r^{-1}(rF_r)_r + F_{zz} = 0, \tag{1}$$

$$F_{tt} = -gF_z, \quad z = 0, \tag{2}$$

$$F_z = \eta_t, \quad z = -H, \tag{3}$$

где g — ускорение силы тяжести. Закон движения дна $\eta(r,t)$ выберем в виде $\eta(r,t) = \eta_0[1 - \theta(r-a)]\theta(t)\sin(\omega t)$, где η_0 и ω — амплитуда и циклическая частота колебаний дна, a — радиус колеблющегося участка дна, θ — функция Хевисайда.

Решение задачи (1)–(3) ищем в виде преобразований Лапласа и Фурье–Бесселя с использованием метода разделения переменных. Опуская необходимые выкладки, выпишем результирующее выражение для потенциала:

$$F(r,z,t) = \eta_0\omega a \int\limits_0^\infty \frac{J_0(kr)J_1(ka)\,\mathrm{ch}(kz)}{k\,\mathrm{ch}(kH)} \times \tag{4}$$
$$\times \frac{1}{gk\,\mathrm{th}(kH) - \omega^2} \times$$
$$\times \Big\{ \Big[gk\,\mathrm{th}(kH)\,\mathrm{th}(kz) + gk \Big] \cos\Big(t(gk\,\mathrm{th}(kH))^{1/2} \Big) -$$
$$- \Big[\omega^2\,\mathrm{th}(kz) + gk \Big] \cos(\omega t) \Big\}\, dk,$$

где J_i — функция Бесселя первого рода i-го порядка. По потенциалу рассчитываются радиальная u и вертикальная w скорости: $u = F_r$, $w = F_z$.

Расчет компонент вектора скорости позволил установить, что при частотах $\omega > \omega_0 \approx \pi(g/H)^{1/2}$ переходным процессом при «включении» колебаний (в момент времени $t = 0$) можно пренебречь. Кроме того, имеет место следующее выражение: $\{u(r,z,t), w(r,z,t)\} = \{u(r,z), w(r,z)\}\cos(\omega t)$.

Теперь будем искать источник среднего (медленного по сравнению с колебательной скоростью) течения, радиальную и вертикальную компоненты которого обозначим U и W. Компоненты полной скорости, входящие в уравнение Навье–Стокса (u^Σ и w^Σ), выразим как сумму скоростей колебательного и среднего движения:

$$u^\Sigma(r,z,t) = u(r,z)\cos(\omega t) + U(r,z,t), \tag{5}$$

$$w^\Sigma(r,z,t) = w(r,z)\cos(\omega t) + W(r,z,t). \tag{6}$$

Подставляя выражения (5) и (6) в левую часть уравнения Навье–Стокса (в цилиндрических координатах) и производя осреднение за время, равное периоду колебаний дна, получаем

$$\overline{\frac{\partial u^\Sigma}{\partial t} + u^\Sigma \frac{\partial u^\Sigma}{\partial r} + w^\Sigma \frac{\partial u^\Sigma}{\partial z}} = \frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial r} + W\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{1}{2}\left[u(r,z)\frac{\partial u(r,z)}{\partial r} + w(r,z)\frac{\partial u(r,z)}{\partial z}\right], \tag{7}$$

$$\overline{\frac{\partial w^\Sigma}{\partial t} + u^\Sigma \frac{\partial w^\Sigma}{\partial r} + w^\Sigma \frac{\partial w^\Sigma}{\partial z}} = \frac{\partial W}{\partial t} + U\frac{\partial W}{\partial r} + W\frac{\partial W}{\partial z} + \frac{1}{2}\left[u(r,z)\frac{\partial w(r,z)}{\partial r} + w(r,z)\frac{\partial w(r,z)}{\partial z}\right]. \tag{8}$$

Из выражений (7) и (8) следует, что в уравнениях для среднего движения возникает дополнительный член, который можно интерпретировать как внешнюю постоянно действующую силу с радиальной R и вертикальной Z компонентами:

$$R(r,z) = -\rho\frac{1}{2}\left[u(r,z)\frac{\partial u(r,z)}{\partial r} + w(r,z)\frac{\partial u(r,z)}{\partial z}\right], \tag{9}$$

$$Z(r,z) = -\rho\frac{1}{2}\left[u(r,z)\frac{\partial w(r,z)}{\partial r} + w(r,z)\frac{\partial w(r,z)}{\partial z}\right], \tag{10}$$

где ρ — плотность жидкости.

На рис. 2 представлено пространственное распределение силы, рассчитанное в соответствии с формулами (9), (10) для условий эксперимента ($R/H = 0{,}22$). Компоненты скорости u, w определялись по модели идеальной жидкости (1)–(3). Из рис. 2 видно, что направление действия полученной силы соответствует наблюдаемой картине течений (см. рис. 1). Отметим, что модель идеальной жидкости не описывает движение в тонком придонном слое. Учет вязкости, очевидно, уменьшит абсолютные значения R и Z вблизи дна. В частности, в силу условия прилипания $R(r, -H) = 0$.

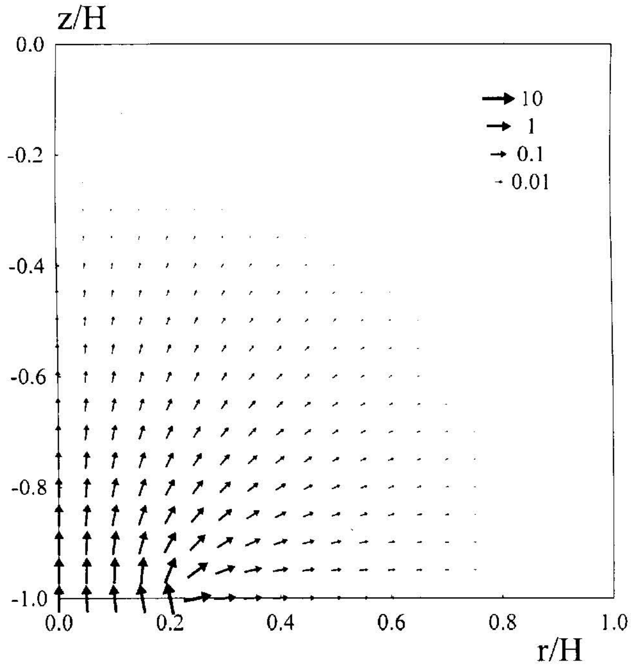

Рис. 2. Пространственное распределение силы, формирующей течение, в логарифмическом масштабе. Направление и величина стрелки соответствуют силе в данной точке, нормированной на характерное значение $\rho(\eta_0\omega)^2 H^{-1}$

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 98-05-64522).

Литература

1. *Левин Б.В., Носов М.А., Павлов В.П., Рыкунов Л.Н.* // ДАН. 1998. **358**, № 3. С. 1.
2. *Носов М.А.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1998. № 4. С. 23 (Moscow University Phys. Bull. 1998. No. 4. P. 23).
3. *Носов М.А., Скачко С.Н.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1999. № 5. С. 51 (Moscow University Phys. Bull. 1999. No. 5. P. 66).
4. *Носов М.А.* // Там же. 1992. № 1. С. 109 (Ibid. 1992. No. 1. P. 110).
5. *Levin B.W.* // Chaos. 1996. **6**, No. 3. P. 405.
6. *Носов М.А., Иванов П.С.* // Вулканология и сейсмология. 1997. № 1. С. 102.

Поступила в редакцию
05.01.00