ЗОНАЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЧНОСТЬ ВЯЗКИХ ВОЛН НА БЕТА-ПЛОСКОСТИ

Зырянов В.Н., Чебанова М.К.

*Институт водных проблем РАН, 119333, Москва, ул.Губкина, д.3,
тел: +7 499 135-5456 e-mail: v.n.zyryanov@yandex.ru; ejek@inbox.ru*

Effects of the viscosity, Earth rotation and sphericity (beta-effect) on the long waves dynamics are investigated based on the linear model. The basic equation for the complex amplitudes of gravitational long waves was obtained. As shown, for the waves of frequency near inertial viscosity always plays a significant role irrespective of ocean depths. The beta-effect and fluid viscosity can be reasons of the asymmetry of western and eastern bays in the tidal waves dynamics.

Детально длинные волны в океане постоянной глубины в приближении β -плоскости описаны в монографии [1]. Однако в мелководных областях морей и океанов трение начинает существенно влиять на динамику длинных волн и распространение таких волн, как приливные, в мелководных областях, эстуариях и бухтах плохо описываются в приближении невязкой жидкости. Критерием применимости приближения идеальной жидкости является волновой слой Стокса, при глубинах меньше которого трение становится существенным и пренебрегать им нельзя [2].

Впервые эффект вязкого затухания в динамике морских течений исследовался Экманом [3], позже Веландером [4], а также авторами [5; 6]. Мофьелд [7] исследовал влияние вертикальной вязкости на распространение баротропной волны Кельвина. В [8] автор обобщил экмановскую теорию на нестационарный случай и получил уравнения, описывающие предельные режимы распространения длинных волн во вращающейся однородной вязкой жидкости.

Вязкость играет существенную роль в динамике приливных волн в бухтах и эстуариях. Контрольным параметром для разделения режимов течения на вязкий и слабовязкий в эволюции длинных волн является толщина слоя Стокса, при глубинах меньших слоя Стокса трение становится существенным для волн данной частоты. Роль трения не сводится только к процессу вязкого затухания амплитуды волны, как это обычно представляется в литературе, а проявляется в изменении

дисперсионных соотношений. Важным следствием влияния вязкости в динамике длинных волн является возникновение редуцированной глубины в уравнении, которая всегда меньше реальной глубины водоема.

В работе получено основное уравнение для комплексных амплитуд колебаний уровня воды в водоеме на β -плоскости:

$$i\omega\bar{\xi} = \frac{\partial}{\partial x}(F_1\bar{\xi}_x) + \frac{\partial}{\partial y}(F_1\bar{\xi}_y) + \frac{\partial G_1}{\partial H}J(H, \bar{\xi}) - \frac{\partial G_1}{\partial f}\beta\bar{\xi}_x,$$

где

$$F_1 = \frac{giH\omega}{f^2 - \omega^2} + \frac{ig}{2\mu_1(f + \omega)}\text{th}\mu_1 H - \frac{ig}{2\mu_2(f - \omega)}\text{th}\mu_2 H,$$

$$G_1 = \frac{gHf}{f^2 - \omega^2} - \frac{g}{2\mu_1(f + \omega)}\text{th}\mu_1 H - \frac{g}{2\mu_2(f - \omega)}\text{th}\mu_2 H,$$

$$J(G_1, \xi) = \frac{\partial G_1}{\partial H}J(H, \xi) - \frac{\partial G_1}{\partial f}\beta\xi_x - \text{якобиан},$$

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{i(\omega + f)}{A_z}} \quad \mu_2 = \sqrt{\frac{i(\omega - f)}{A_z}}$$

H – глубина, g – ускорение свободного падения, A_z – коэффициент вертикального турбулентного обмена (константа), ω – частота волны, i – мнимая единица, $f = 2\Omega\sin\tilde{\phi}$ – параметр Кориолиса, Ω – угловая скорость вращения Земли, $\beta = \frac{\partial f}{\partial y}$ – бета-эффект.

Уравнение также описывает предельные режимы распространения длинных волн – гравитационные волны, волны Россби и вязкие волны при глубинах меньших слоя Стокса.

Во вращающейся жидкости возникает два слоя Стокса. Толщина одного из слоев Стокса стремится к бесконечности при приближении к инерционной частоте. Учитывая роль слоя Стокса как контрольного параметра для оценки влияния вязкости, можно сделать вывод, что для волн около инерционной частоты вязкость всегда должна играть существенную роль, независимо от глубины океана.

В [2] показано, что поправка к основному эволюционному уравнению за счет учета ускорения Кориолиса для волн в закритической области глубин является малой и ею можно пренебречь. При таком подходе

будем всегда иметь симметричность бухт, открытых на запад (западные бухты) и открытых на восток (восточные бухты). Однако в природе наблюдается явная несимметричность зональных бухт. Как показывает простой анализ бухт и заливов с большими приливами – залив Фанди, Мезенская губа Белого моря, Пенжинский залив Охотского моря и др., все эти заливы западные. Очевидно, что имеет место явная несимметричность в приливах в западных восточных заливах и эта несимметричность должна быть как-то связана с вращением Земли. В данной работе представлены результаты теоретических исследований влияния вращения и сферичности Земли (бета-эффект) на динамику длинных волн.

Сферичность Земли создает несимметричность в динамике зональных волн, которая проявляется через возникновение планетарного дрейфа. Скорость планетарного дрейфа зависит от широты, частоты волны и глубины океана. Для данной широты имеется диапазон около инерционных частот, в пределах которого планетарный дрейф направлен на запад. За пределами этого интервала планетарный дрейф имеет восточное направление. Максимальные значения планетарного дрейфа достигаются в широтах 45–55°с.ш. Интересно, что именно в этих широтах лежат бухты с экстремальными приливами, причем, эти бухты открыты на запад. Таким образом, планетарный дрейф для полусуточных приливов дополнительно нагоняет воду в западные бухты, создавая преимущество приливных колебаний в западных бухтах относительно восточных.

Другой причиной несимметричности западных и восточных направлений в приливной динамике является трение. Влияние трения проявляется в различии декрементов затухания для западных и восточных волн. Для волн с частотами, близкими к инерционной, декремент затухания для западных волн может быть 5–6 раза больше, нежели для восточных.

Несимметричность западных и восточных волн проявляется и в поведении групповой скорости, с которой происходит перенос энергии и массы в зональных направлениях. В определенном диапазоне частот, близких к инерционной, групповая скорость волн, бегущих как на восток, так и на запад, имеет исключительно восточное направление. В средних широтах частота полусуточного периода попадает в такой диапазон.

Несимметричность западных и восточных направлений в динамике длинных волн проявляется также в несимметричности амплитуд длинных волн в западных (открытых на запад) и восточных (открытых

на восток) бухтах. Как следует из теории, амплитуда полусуточного прилива в западных бухтах оказывается больше, нежели в восточных, при прочих равных условиях.

Вязкость, вращение и сферичность Земли влияют на периоды сейш в частично закрытых водных объектах. Уравнение, описывающее динамику приливной волны в прямолинейном зональном канале, позволяет получить дисперсионное соотношение на спектр сейшевых колебаний с учетом вязкости и бета-эффекта. В пренебрежении вязкостью и вращением Земли это соотношение сводится к формуле Мериана. Расчеты периодов сейш для вязкой вращающейся жидкости дают меньшее значение периода соответствующей моды сейши, нежели расчет по формуле Мериана для идеальной не вращающейся жидкости. Более того, в результате вращения Земли периоды сейш начинают зависеть от широты. Вязкость, в свою очередь, вызывает увеличение периода из-за уменьшения длины гравитационной волны. Совместное действие этих факторов может вызывать эффект, схожий с диссипативно-конфузорной перемежаемостью в динамике приливных волн в мелководном эстуарии, как описано в [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. Т. 1 / Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 480 с.
2. Зырянов В.Н. Топографические вихри в динамике морских течений. М: Ин-т водн. пробл. РАН, 1995. 239 с.
3. Ekman V.W. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents // *Aroh. math. astron. fhs.* 1905. Vol. 2. No. 11. P. 1–53.
4. Welander P. Wind action on a shallow sea: Some generalizations of Ekman's theory // *Tellus.* 1957. Vol. 9. No. 1. P. 45–52.
5. Jelesnianski C.P. Bottom stress time-history in linearized equations of motion for storm surges // *Month. Weather Rev.* 1970. Vol. 98. No. 6. P. 462–478.
6. Jordan T.P., Baker J.R. Vertical structure of time-dependent flow dominated by friction in a well-mixed fluid // *J. Phys. Oceanogr.* 1980. Vol. 10. No. 7. P. 1091–1103.
7. Mofjeld H.O. Effects of vertical viscosity on Kelvin waves // *J. Phys. Oceanogr.* 1980. Vol. 10. No. 7. P. 1039–1050.
8. Музылев С.В. Влияние вертикального турбулентного обмена на длинные волны во вращающейся жидкости // *Динамика течений и литодинамические процессы в реках, водохранилищах и окраинных морях.* М.: Наука, 1991. С. 173–183.
9. Зырянов В.Н., Чебанова М.К. Диссипативно-конфузорная перемежаемость в динамике приливных волн // *Известия РАН. Механика жидкости и газа.* 2017. № 6. С. 13–23.