

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕЩАЮЩЕГОСЯ ПЛОСКОГО ФРОНТА ВОЗМУЩЕНИЙ НА ГЕНЕРАЦИЮ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ЧЕРНОМ МОРЕ

А.А. Белобров, В.М. Савоськин

Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 4
E-mail: sv78@mail.ru

Исследуются плоские внутренние волны (ВВ), возбуждаемые движущимся нестационарным фронтом аномалии атмосферного давления. Рассчитаны характеристики генерируемых ВВ выполнены для различных скоростей перемещения возмущающего фронта, с использованием вертикального распределения частоты Брента-Вяйсяля $N(z)$, рассчитанного по данным температуры и соленности в Черном море

Введение. Значительную часть времени ВВ существуют как свободные, получая и теряя сравнительно мало энергии [1,2]. Поэтому в природных условиях определить их связь с внешними возмущениями затруднительно. Одним из основных источников ВВ являются динамические процессы, происходящие в атмосфере и осуществляющие передачу энергии морю за счет колебаний атмосферного давления и за счет касательных напряжений ветра. Связь ВВ и атмосферных процессов подтверждает высокий уровень корреляции колебаний скорости ветра и гидрофизических полей как в диапазоне квазинерционных периодов [3], так и в высокочастотной области спектра [4]. Пространственная изменчивость обрушений поверхностных волн и ее связь с такими динамическими явлениями в морской среде, как ВВ, течения «струйного» типа, вихревые образования, геострофические фронтальные разделы и т.п. исследуется в работе [5]. Влияние поля ветра на формирование структуры поверхностных течений для открытой части Черного моря выполнено в [6], а возможность регистрации приводного ветра, с использованием спутниковых РЛСБО, рассмотрена в работе [7]. Следует отметить, что перемещающиеся фронты и зоны атмосферных возмущений не являются стационарными. Выделяют [8] три частотных диапазона временной изменчивости атмосферного давления: сезонный (0,01-0,06 сут.), синоптический (0,06-0,30 сут.) и околосуточный (0,34-4 сут.).

Для изучения возможных механизмов генерации ВВ представляет определенный инте-

рес использование математического моделирования процессов возбуждения волн движущимися аномалиями атмосферного давления, с учетом их временной изменчивости. В данной работе рассмотрена двумерная модель генерации волн., которую можно интерпретировать, как генерацию ВВ движущимся нестационарным фронтом атмосферного давления в безграничном море.

Плоские волны, вызываемые поверхностными возмущениями такого рода без учета вращения Земли, исследовались для двухслойного [9] и равномерно стратифицированного [10] океанов. Эффекты, связанные с вращением Земли, при генерации ВВ движущейся областью гармонических по времени давлений, включая анализ гироскопических волн, рассмотрены в работе [11]. Эти же эффекты рассмотрены для равномерно [12] и реально [13] стратифицированного океанов.

Новизной данной работы явился учет влияния на генерацию ВВ гидрологических условий, характерных для мелководной северо-западной части Черного моря.

Необходимые для проведения данного исследования комплексные натурные гидрологические измерения были выполнены в 44 рейсе НИС "Михаил Ломоносов" в августе 1985 года. В мелководной части Черного моря квазиоднородные слои у поверхности и дна, а также единый термогалоκлин формируют стратификацию близкую к двухслойной с одним максимумом частоты Брента-Вяйсяля (рис.1), положение которого (10-15 метров и

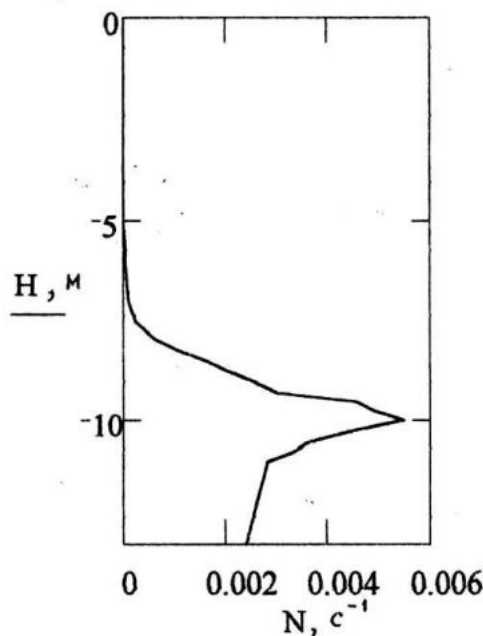


Рис. 1.

более) обусловлено сезонным прогревом. Такая стратификация разделяет северо-западный черноморский район и глубоководный центральный, где положение термоклина и галоклина может не совпадать.

Математическая постановка задачи.

Рассмотрим горизонтальный слой $-\infty < x, y < +\infty$, $-H < z < 0$ идеальной несжимаемой жидкости постоянной глубины H , вращающийся с угловой скоростью $\Omega/2$ относительно вертикальной оси Oz , где $\Omega = 2\omega_0 \sin\varphi$ - параметр Кориолиса, ω_0 - угловая скорость вращения Земли, φ - широта места. Вертикальное распределение средней плотности $\rho(z)$ жидкости предполагается непрерывным и устойчивым. В момент времени $t=0$ к свободной поверхности $z=0$ невозмущенной жидкости прикладывается перемещающаяся со скоростью U область гармонических по времени давлений

$$p = f(x)\exp(-i\omega t) \quad (x = X + Ut), \quad (1)$$

где U и ω - константы; функция $f(x) \rightarrow 0$ при $|x| \rightarrow \infty$ и допускает применение преобразования Фурье.

Анализ возникающих ВВ проводился в системе координат $Oxuz$, связанной с возмущением (1).

Движение жидкости при $t > 0$ в общей линейной постановке описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} Du - \Omega v &= -\rho_0^{-1}(p + p_0)_x, \quad Dv + \Omega u = 0 \\ Dw &= -\rho_0^{-1}(g\rho + p_z), \quad u_x + w_z = 0, \\ D\rho + \rho_{0z} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

с граничными и начальными условиями

$$\begin{aligned} w &= 0 \quad (z = -H), \quad p = \rho_1 g \zeta, \\ D\zeta &= w \quad (z = 0); \\ u = v = w = \rho = \zeta &= 0 \quad (t = 0), \end{aligned} \quad (3)$$

где $D = \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x}$; u, v, w - координаты вектора скорости по осям x, y, z ; p, ρ - динамические возмущения давления и плотности; ζ - смещение свободной поверхности жидкости; $\rho_1 = \rho_0(0)$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Интегральное представление для поля вертикальной скорости w получено, применяя к задаче (2), (3) преобразование Фурье по x и Лапласа по t аналогично работам [12, 13].

$$w = \exp(-i\omega \cdot t) \sum_j w_j, \quad w_j = w_{1j} + w_{2j},$$

Условия генерации и характеристики вынужденных ВВ.

Рассмотрим генерацию ВВ движущимся фронтом нестационарных барических возмущений для реального распределения частоты Брента-Вяйсяля $N(z)$ (рис. 1), рассчитанного с использованием натуральных измерений температуры и солености в Черном море.

Дисперсионные зависимости и вертикальная структура свободных ВВ.

Дисперсионные кривые для трех низших мод, были найдены методом пристрелки [14]. Их поведение типично для ВВ в непрерывно стратифицированном вращающемся океане.

Зависимости групповых скоростей ВВ от частоты имеют инерционно-гравитационные максимумы в низкочастотной области. Они возникают там, где взаимно компенсируются увеличение групповой скорости, обусловленное вращением Земли, и убывание групповой скорости, вызываемое частотной дисперсией. В области с сильной частотной дисперсией наблюдаются дополнительные локальные максимумы групповых скоростей, начиная со второй моды ВВ. В длинноволновой области бароклинные возмущения охватывают всю толщу моря и наиболее интенсивны в его глубинных слоях. Короткие внутренние волны локализируются в области пикноклина, являющегося для них волноводом [13].

Возможные режимы генерации ВВ.

Поле вынужденных ВВ для j -й моды w_j является суперпозицией волновых полей w_{1j} и w_{2j} . Выполненный анализ позволяет утверждать, что w_{1j} вдали от зоны генерации представляет собой прогрессивную ВВ, существующую всегда только за возмущением ($U_{1j} > 0$), где U_{1j} - скорость распространения переднего фронта волны w_{1j} , и распространяющуюся от него при любых значениях U и $\omega > 0$.

Численный анализ уравнений, с использованием найденных дисперсионных зависимостей для ВВ, показал, что, как и в случае $N(z) = \text{const}$ [12], поле w_{2j} формируется из одной или трех прогрессивных ВВ. В последнем случае одна из волн существует перед атмосферным возмущением ($U_{2j} < 0$), где U_{2j} - скорость распространения переднего фронта

волны w_{2j} . Переходу от одного волнового режима к другому соответствуют критические скорости барического фронта. Их зависимости от периода $T=2\pi\omega^{-1}$ колебаний давления p представлены на рис.2.

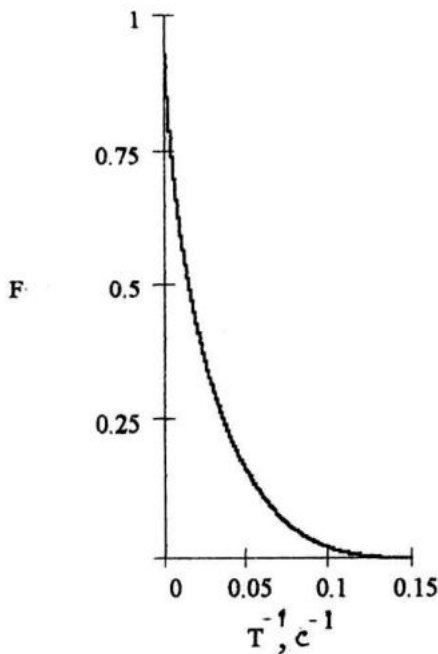


Рис.2.

где $F = j\pi U / \Omega H$.

Если точка (T, U) принадлежит области в форме криволинейного треугольника (рис.2), то возбуждаются три прогрессивные волны для каждой j -ой моды. С увеличением номера моды диапазон значений скорости U , соответствующий этому режиму, сужается приблизительно как j^{-1} .

Таким образом, для каждой вертикальной моды можно выделить четыре диапазона периодов колебания атмосферного давления в движущейся аномалии: $T > T_j$, $T_0 < T < T_j$, $T^* < T < T_0$, $0 < T < T^*$,

где $T_0 = 2\pi/\Omega$ - инерционный период, T_j - максимальный период колебаний для j -ой моды, при котором возможно резонансное возбуждение воли (соответствуют точки возврата на кривых на рис. 2). $T^* = 2\pi/N^+$ - минимальный период свободных ВВ, $N^+ = \max N(z)$.

Для критических значений параметров U и T происходит резонансное возбуждение ВВ, сопровождающееся степенным ростом их амплитуды со временем [12.13]. Волна является существенно неустановившейся и распростра-

няется в том же направлении, что и область аномалии давления. Известно [12.13] что, если волновое число соответствует локальному максимуму групповой скорости ВВ, то ее амплитуда неограниченно возрастает. Резонанс возникает в тех случаях, когда фазовая и групповая скорости j -й моды совпадают со скоростью перемещения возмущения.

Характеристики вынужденных ВВ определялись для модельного распределения поверхностных давлений. Как отмечалось выше, проведенный анализ условий их генерации, позволил для каждой вертикальной моды выделить четыре существенно отличающихся по количеству возбуждаемых внутренних волн режима, соответствующих четырем диапазонам периодов колебаний атмосферного давления в движущейся аномалии. Рассмотрим для них амплитудные характеристики ВВ.

А. Пусть $T > T_j$. Резонансного возбуждения ВВ при любых $U > 0$ не происходит. Излученные волны существуют только за движущимся возмущением и распространяются от него.

С ростом T ВВ w_{1j} и w_{2j} становятся близкими и волновое поле в пределе при $\omega \rightarrow 0$ трансформируется для j -й моды в одну волну за возмущением.

Б. Пусть $T_0 < T < T_j$. Из рис.2 видно, что при таких T существует два резонансных значения скорости U перемещения атмосферного возмущения. В интервале этих скоростей, ограниченном резонансными значениями, наибольшую амплитуду имеет волна перед движущимся атмосферным возмущением. Анализ показал, что вне окрестностей резонансных значений скорости U определяющей для j -й моды является только одна волна, которая существует или за движущейся аномалией давления или перед ней. Поскольку критические скорости перемещения возмущения убывают с ростом номера моды, полное волновое поле перед возмущением формируется из конечно-го числа низших мод ВВ.

В. $T^* < T < T_j$. Для любого T из этого интервала существует одно резонансное значение скорости переноса зоны атмосферных возмущений. Как и в случае Б, при больших U доминирует только одна волна w_{1j} , а при скоростях перемещения, меньших резонансной, генерируется волна w_{2j} перед барическим возмущением. Наиболее эффективная генерация ВВ происходит при квазирезонансных и меньших значениях скорости U перемещения аномалией давления.

Г. $0 < T < T^*$. Этот интервал соответствует высокочастотным колебаниям давления в движущемся атмосферном возмущении. Генерация ВВ при таких T малоэффективна. Волны существуют только за возмущением. Тем не менее, происходит слабое излучение незатухающих с расстоянием волн, имеющих частоты, лежащие вне диапазона $\Omega < \omega < N^+$ существования свободных ВВ.

С ростом номера моды j эффективность возбуждения волн аномалиями атмосферного давления падает, что согласуется с результатами анализа генерации ВВ флуктуациями давления и касательных напряжений ветра на поверхности океана, выполненного в [13]. Диапазон резонансных скоростей перемещения барической аномалии с увеличением номера моды j сужается.

Выводы.

В рамках двумерной гидродинамической модели, с учетом вращения Земли и без учета топографии берега и рельефа дна, выполнен анализ генерации ВВ движущейся полосой гармонических по времени поверхностных давлений в непрерывно стратифицированном Черном море. С помощью интегральных преобразований получено аналитическое выражение для ВВ вдали от зоны генерации, являющихся суперпозицией волновых полей для отдельных вертикальных мод.

Выполнен анализ условий генерации ВВ различных типов. Определены их возможные характеристики для рассчитанного по данным измерений вертикального распределения частоты Брента-Вяйсяля $N(z)$, характерного для мелководной северо-западной части Черного моря. Показано, что возбуждение незатухающих при удалении от зоны генерации прогрессивных ВВ происходит при любых скоростях U перемещения нестационарной аномалии атмосферного давления.

Установлено, что в зависимости от значенной скорости U перемещения аномалией атмосферного давления p и от периода $T=2\pi\Omega^{-1}$ его колебаний могут реализоваться два отличных друг от друга режима генерации ВВ. В первом случае возникает только бароклинный волновой след. Во втором случае, помимо следа за аномалией давления, возбуждаются волны и перед ней, что возможно только при скоростях U перемещения возмущения меньших максимальной групповой скорости ВВ. Более того, при таких скоростях существуют резонансные значения частоты ω изменения давления p в атмосферной аномалии, при которых происходит степенной рост амплитуд ВВ со временем [12,13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Thorpe S.A. The excitation dissipation and interaction of internal waves in the deep ocean // J. Geophys. Res., 1975. 80, N 3. P. 328-338.

2. Garrett C., Munk W. Internal waves in the ocean // Ann. Rev. Fluid Mec. 1979., N 11. P. 339-369.

3. Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. - М.: Мир, 1981. Т.1 - 480 с., т.2 - 365 с.

4. Kase R.H., Olbers D.J. Wind driven internal waves observed during phase III of GATE // Deep-Sea Res. 1980. 26, N 2A. P. 191-216.

5. Дулов В.А., Кудрявцев В.Н., Гродский С.А., Щербак О.Г. Наблюдения обрушений ветровых волн во фронтальной зоне Гольфстрима - Севастополь: 1996. 42 с. (Препринт. НАН Украины, МГИ).

6. Станичный С.В., Ратнер Ю.Б., Соловьев Д.М., Станичная Р.Р. Влияние поля ветра на формирование структуры поверхностных течений // Сб. трудов научн. конференции «Системы контроля окружающей среды -2001».

7. Малиновский В.В., Пустовойтенко В.В. Контроль океанических фронтальных разделов с использованием спутниковых РЛСБО // Сб. трудов научн. конференции «Системы контроля окружающей среды -2001».

8. Голобородько С.В., Дворянинов Г.С., Прусов А.В. Оценка параметров волн вблизи ВЗК // Метеорология и гидрология, 1985. N 10. С. 5-13.

9. Черкесов Л.В. Гидродинамика волню - Киев: Наук. думка, 1980. - 260 с.

10. Доценко С.Ф., Савоськин В.М. Генерация пространственных внутренних волн во вращающемся океане движущимися нестационарными возмущениями // Мор. гидрофиз. журн. 1991. N 4. С. 22-28.

11. Каменкович В.М. Основы динамики океана. - Л.: Гидрометеиздат, 1973. - 240 с.

12. Доценко С.Ф., Савоськин В.М. Генерация плоских внутренних и гироскопических волн движущимися нестационарными возмущениями // Мор. гидрофиз. журн. 1992. N 5. С. 12-20.

13. Доценко С.Ф., Савоськин В.М. Генерация внутренних волн движущимися нестационарными возмущениями в реально стратифицированном океане // Мор. гидрофиз. журн. 1993. N 5. С. 19-30.

14. Кулаков А.В. Численный метод расчета вертикальной структуры колебаний в океане // Океанология. 1977. N 5. С. 800-805.