

К. В. КОНЯЕВ, К. Д. САБИНИН

РЕЗОНАТОРНАЯ ГИПОТЕЗА ГЕНЕРАЦИИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В МОРЕ

(Представлено академиком Л. М. Брежневским 4 IX 1972)

Недавние ⁽¹⁾ и более ранние ^(2, 3) наблюдения обнаруживают пакетное, или цуговое, строение во времени высокочастотных внутренних волн, движущихся в термоклине моря или океана. Колебания в пределах цугов часто имеют квазисинусоидальный характер и включают от 2—3 до нескольких десятков периодов. Частоты колебаний в цугах близки к максимальной частоте Вайсяля и соответствуют периодам от 2 до 5 мин. в Черном море ⁽¹⁾ и периодам в несколько десятков минут в океане. Даже в усредненных за значительное время спектрах внутренних волн нередко обнаруживается

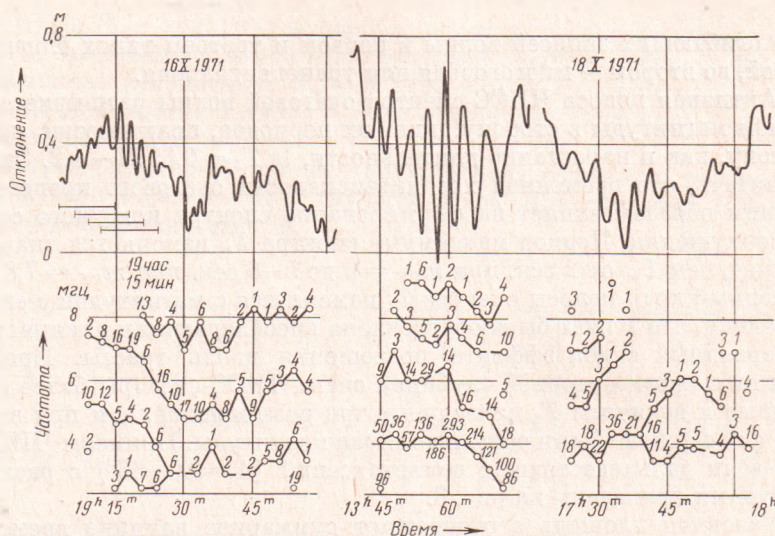


Рис. 1. Цуги внутренних волн, записанные в прибрежной части Черного моря, и текущие периодограммы цугов. Периодограммы рассчитаны по 12-минутным отрезкам со сдвигом на 3 минуты. Отмечены все пики периодограмм с указанием величины в относительных единицах

пик на частоте, близкой к максимальной частоте Вайсяля. Обращают на себя внимание еще три особенности колебаний в цугах: пространственная локализация ⁽¹⁾, многопиковое строение периодограммы и своеобразное изменение частоты пиков периодограммы во времени (рис. 1, 2).

Известен механизм сдвиговой неустойчивости водных слоев (неустойчивость в слое с вертикальным градиентом горизонтальной скорости движения) ⁽⁴⁾, в рамках которого объяснимо появление узкополосных цугов. Однако этот механизм плохо объясняет такие факты, как привязка частоты колебаний к максимальной частоте Вайсяля, многопиковое строение и изменение периодограммы во времени. Частота пиков периодограммы может изменяться во времени из-за доплеровского сдвига высокочастотных внутренних волн при орбитальном движении воды в низкочастотных волнах. Но доплеровским сдвигом трудно объяснить наблюдаемые случаи не-

согласованного изменения частоты двух пиков и случаи раздвоения и слияния пиков (рис. 1).

Ниже излагается резонаторная гипотеза возникновения внутренних волн, которая позволяет объяснить все перечисленные факты. Гипотеза основана на существовании пространственной (в горизонтальной плоскости) неоднородности термоклина.

Неоднородность термоклина может возникать по ряду причин. Одна из них, например, спорадически возникающее из-за обрушения внутренних волн перемешивание в термоклине ⁽⁵⁾. Более универсальной причиной являются, по-видимому, сами внутренние волны; поскольку амплитуда внутренних волн меняется с глубиной, термоклин в процессе колебаний сжимается и растягивается по вертикали, в результате чего формируется сложное пространственно-временное распределение плотности в термоклине. Нетрудно показать, что при прохождении плоской внутренней волны $\xi(x, z, t)$ частота Вейселя $N(x, z, t)$ меняется следующим образом:

$$N(x, z, t) = N_0(z) [1 + \xi'(x, z, t)]^{-1/2},$$

где x и z — горизонтальная и вертикальная координаты, t — время, $N_0(z)$ — невозмущенное значение частоты Вейселя, $\xi'(x, z, t)$ — вертикальный градиент отклонений водных слоев от невозмущенного состояния.

Если стабильный в пространстве термоклин можно рассматривать как волновод для внутренних волн, то зона сжатия изопикн в термоклине, ограниченная с двух сторон зонами растяжения, образует объемный резонатор для высокочастотных внутренних волн, которые могут существовать в зоне сжатия и не могут в зоне растяжения. Если переход от зоны сжатия к зоне растяжения происходит на расстоянии, сравнимом с длиной высокочастотной волны, то такая волна хорошо отражается неоднородностью и, следовательно, для таких волн резонатор обладает высокой добротностью. Однородный термоклин можно сравнить с упругой пластиной неограниченных размеров, на которой могут развиваться волны любой длины, а неоднородный термоклин — с набором изолированных или слабо связанных между собой пластин, каждая из которых обладает набором собственных (резонансных) частот.

Волновод, образуемый однородным по горизонтали термоклином, наглядно изображается изолиниями постоянной частоты Вейселя на плоскости глубина z — горизонтальная координата x . При обычной однопиковой зависимости частоты Вейселя от глубины эти изолинии вырисовывают хребет, вытянутый вдоль оси x . Горизонтальная неоднородность термоклина

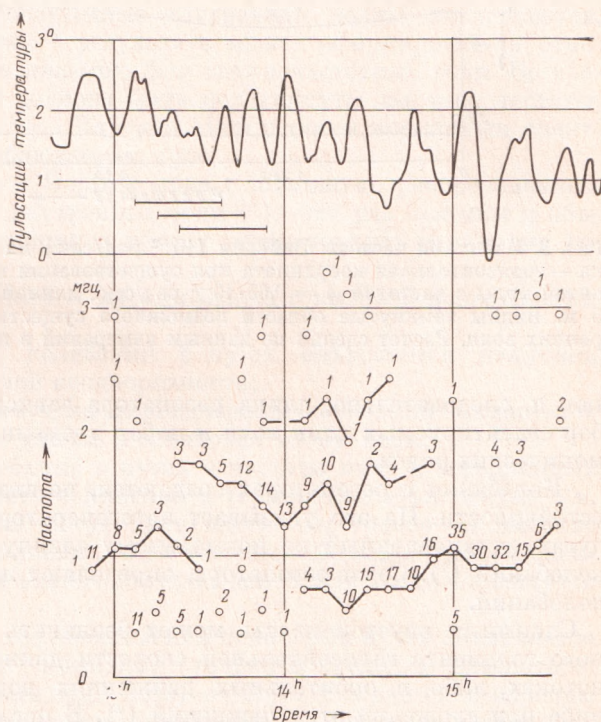


Рис. 2. Пут внутренних волн, записанный в тропической Атлантике 31 VIII 1970 г., и его текущая периодограмма (рассчитана по получасовым отрезкам со сдвигом на 15 мин.)

проявляется в расчленении хребта на отдельные вершины, разделенные седловинами. В отдельных возвышениях могут формироваться резонаторы для тех колебаний, длина волны которых кратна длине резонатора (рис. 3).

Условие кратности в общем случае в пределах одной неоднородности выполняется только для дискретного набора частот. Каждой частоте соответствует свой резонатор, так как положение условных отражающих сте-

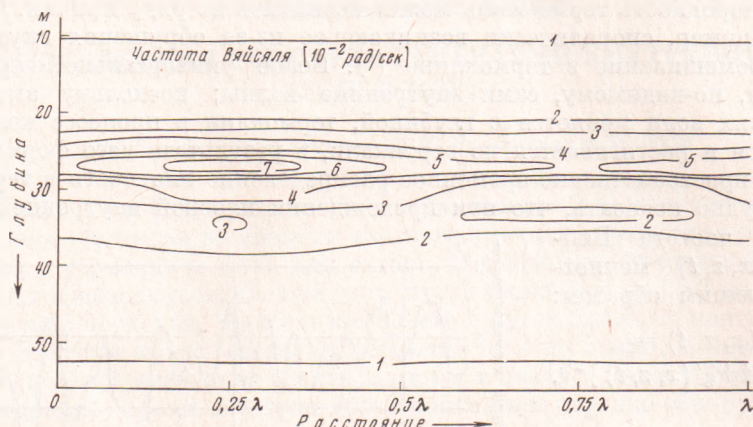


Рис. 3. Изолинии частоты Вяйсяля (10^{-2} рад/сек.) на вертикальной плоскости глубина — горизонтальная координата при существовании в термоклине внутренней волны пятой моды с частотой $\omega = 0,65 \cdot 10^{-3}$ рад/сек., длиной волны $\lambda = 1990$ м, амплитудой 5 м. Видны замкнутые области возможного существования высокочастотных внутренних волн. Расчет сделан по данным измерений в прибрежной части Черного моря

нок и, следовательно, длина резонатора зависят от частоты. Поэтому набор селективируемых длин волн и набор временных частот не образуют гармонических рядов.

Колебания в резонаторах создаются, по-видимому, из-за сдвиговой неустойчивости. На это указывает автогенераторный характер колебаний в цугах, установленный по нормальному закону распределения огибающей колебаний ⁽¹⁾. Сами резонаторы определяют лишь частоты генерируемых колебаний.

Сдвиговая неустойчивость может возникать из-за большого вертикального градиента горизонтальной скорости движения либо в осредненных потоках, либо в орбитальных движениях воды во внутренних волнах, либо при сложении этих движений ⁽⁶⁾. В последних двух случаях нужно учитывать не только изменение вертикального градиента скорости в волнах, как это сделано в ⁽⁶⁾, но и изменение частоты Вяйсяля в волнах. В частности, неустойчивость могут создавать или усиливать орбитальные движения в тех же внутренних волнах, которые формируют резонаторы. Некоторые оценки позволяют предполагать, что возможна замкнутая картина формирования резонаторов и возбуждения в них высокочастотных внутренних волн, например, в идеализированных условиях существования низкочастотных стоячих волн, подобных изображенным на рис. 3.

Цуговое строение высокочастотных волн указывает на относительно быстрое изменение условий генерации. Прежде всего это связано с изменением свойств резонаторов. Частотная модуляция колебаний хорошо согласуется с изменением длины резонаторов в процессе развития неоднородности, создаваемой низкочастотной стоячей внутренней волной. В неоднородности могут возникать одновременно несколько резонаторов, изменяющихся во времени по-разному. Подробный анализ возможных типов развития резонаторов в неоднородности, создаваемой низкочастотной стоячей внутренней волной, показал, что могут наблюдаться дугообразные изменения частоты и согласованные и несогласованные изменения частоты

ты двух пиков. Если условие кратности выполняется в некотором диапазоне частот, то возможно раздвоение или слияние пиков периодограммы.

Неоднородности возникают, развиваются и исчезают в течение каждой половины периода низкочастотной внутренней волны. Такой же цикл проходят резонаторы, связанные с этими неоднородностями: однородный волновод трансформируется в цепочку резонаторов, а затем вновь становится однородным. Если в резонаторах возникли узкополосные колебания, то после восстановления однородного волновода пути начинают двигаться по волноводу (по одному пути в противоположные стороны из каждого резонатора). Продолжительность колебаний в путях, наблюдаемых внутри резонаторов, зависит только от времени жизни неоднородности и резонаторов. Число волн в путях, выпедших из резонаторов, определяется номером горизонтальной моды колебаний в резонаторе и может быть равно единице. Движущиеся пути сталкиваются с вновь возникшими неоднородностями, на которых высокочастотные внутренние волны поглощаются, отражаются и преломляются. В результате может сформироваться относительно однородный по направлению фон высокочастотных волн. Во временном спектре таких волн должны быть подчеркнуты высокие частоты, близкие к максимальной частоте Вайсяля. Фон с таким временным спектром обычно сопровождает наблюдаемые пути.

Используя наблюдаемые в Черном море с помощью распределенных датчиков температуры пути внутренних волн (¹), еще раз отметим и объясним факты, свидетельствующие в пользу резонаторного механизма генерации этих путей:

1) узкополосность колебаний в путях связана с высокой добротностью резонаторов;

2) многопиковый спектр колебаний в путях объясняется наличием нескольких резонаторов в одной неоднородности;

3) ход частоты пиков текущих периодограмм колебаний согласуется с возможными изменениями длины резонаторов во времени;

4) близость частоты колебаний в путях и частоты пика в осредненных спектрах к максимальной частоте Вайсяля в термоклине объясняется тем, что возникающие резонаторы могут быть настроены только на высокие частоты, лежащие вокруг максимальной частоты Вайсяля невозмущенного термоклина, а для более низкочастотных колебаний волновод остается относительно однородным;

5) четкая пространственная локализация некоторых путей объясняется длительным существованием колебаний только в пределах резонатора.

Летом 1972 г. в Каспийском море вдали от берегов в районе с плоским дном были проведены измерения внутренних волн с помощью нескольких разнесенных в пространстве датчиков температуры. При анализе пространственных и пространственно-временных спектров квазимонохроматических волн было обнаружено, что коэффициент стоячей волны в этих случаях, как правило, отличен от нуля и нередко достигает единицы (чистая стоячая волна). Стоячие волны могут возникать из-за сильных отражений, претерпеваемых внутренними волнами на неоднородностях термоклина.

Горизонтальная неоднородность термоклина является постоянным и повсеместным свойством термоклина, связанным, как уже говорилось, в частности, с его волновым движением. Поэтому рассмотренный механизм может носить универсальный характер и проявляться в море и в океане в широком диапазоне частот.

Акустический институт
Москва

Поступило
14 VIII 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ К. В. Коняев, К. Д. Сабинин, ДАН, 209, № 1 (1973). ² E. Hollan, Kieler Meeresforschungen, 25, H. 1, 19 (1969). ³ R. L. Zalkan, Deep-Sea Res., 17, № 1, 91 (1970). ⁴ J. D. Woods, Radio Science, 4, № 12, 1289 (1969). ⁵ J. D. Woods, R. L. Wiley, Deep-Sea Res., 19, № 2, 87 (1972). ⁶ О. Филлипс, Динамика верхнего слоя океана, М., 1969.