

УДК 551.466

Е.Г. Морозов, Т.А. Демидова, Л.В. Нечволодов

**ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ, ГЕНЕРИРОВАННЫЕ ОКОЛО  
ПОДВОДНОГО ХРЕБТА МЕНДОСИНО (ЗАПАДНОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ США)**

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Для изучения генерации и распространения внутренних приливов использованы данные измерений на буйковых станциях в 1986 г. к югу от подводного хребта Мендосино (западное побережье США) и численная модель. Изучаются внутренние волны, генерированные на хребте Мендосино и на континентальном склоне США. Получены оценки длин волн, амплитуд и направления полусуточных внутренних волн. Преобладающая генерация внутренних приливных волн происходит на хребте Мендосино. Генерация внутренних приливов на континентальном склоне весьма слабая.

*Ключевые слова:* внутренний прилив, подводный хребет, измерители течений на буях, численная модель.

Основным источником внутренних приливов в океане является взаимодействие течений баротропного прилива и топографии дна на континентальных склонах и над подводными хребтами. Данные многочисленных публикаций, посвященных изучению внутренних волн, подтверждают это [1, 3].

Задача данного исследования состоит в физической интерпретации распространения внутренневолновых возмущений, генерированных над подводным склоном. Генерация внутренних волн в районе подводного склона происходит за счет взаимодействия течений баротропного прилива с подводным склоном. Течения баротропного прилива, встречая на своем пути этот склон, приобретают вертикальные составляющие. Вертикальные составляющие течений вызывают периодические вертикальные смещения изопикнических поверхностей, тем самым генерируя внутренние волны.

Главной энергонесущей частотой внутреннего прилива является компонента, соответствующая баротропному приливу M2 с периодом 12.4 ч. Основным источником, генерирующим внутренние волны в шельфовом районе, является взаимодействие течений баротропного прилива с континентальным склоном в мористой части шельфа.

**Описание эксперимента**

Районом исследования выбран подводный хребет Мендосино в северо-восточной части Тихого океана. Задача решается с помощью численного моделирования генерации и распространения внутреннего прилива, возбужденного на склонах хребта. Исследуются полусуточные внутренние приливы. Карта района работ показана на рис. 1. В апреле-мае 1986 г. здесь было выставлено восемь буйковых станции с измерителями течений и температуры для изучения средних течений и внутренних волн.

Полигон располагался в 600-700 км к югу от подводного хребта Мендосино и в 400-500 км от западного побережья США. Измерения течений и температуры проводились на горизонтах 75, 150, 250, 400, 700 и 1200 м. Полусуточный пик на всех спектрах температуры очень хорошо выражен. Пик находится на частоте 0.00134 цикл/мин, что соответствует колебаниям волны M2 с периодом 12.42 часа. При пересчете колебаний температуры в вертикальные отклонения оценка амплитуд внутренних волн составила 15-20 м.

Взаимный анализ (кросс-анализ) измерений на различных горизонтах и буях показывает, что колебания температуры хорошо коррелированы на частоте полусуточного прилива M2. В табл. 1 даны значения вертикальной когерентности между колебаниями на разных парах горизонтов для двух буйковых станций.

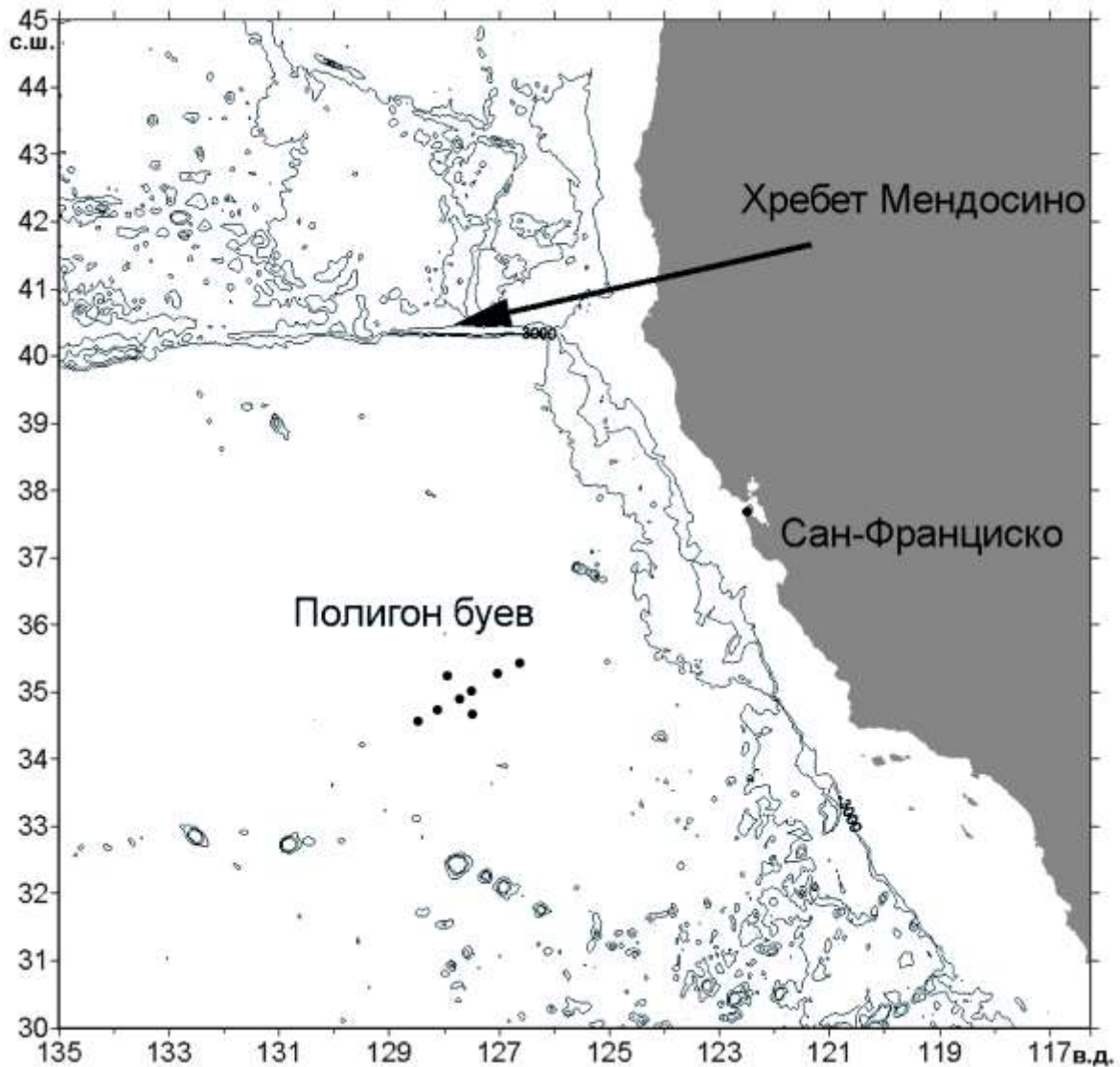


Рис. 1. Карта района работ (черные точки показывают положение буйковых станций)

Таблица 1

Значения вертикальной когерентности на разных парах горизонтов на полигоне южнее подводного хребта Мендосино. Верхнее значение соответствует бую 33 (34°54' N, 127°43' W), нижнее - бую 35 (34°33' N, 128°29' W). Когерентность колебаний температуры на полусуточном периоде приведена в клетке пересечения горизонтов измерений

Горизонты измерений	Горизонты измерений			
	250	400	700	1200
150	0.94	0.88	0.77	0.86
	0.75	0.59	0.86	0.61
250		0.92	0.84	0.84
		0.83	0.75	0.72
400			0.75	0.75
			0.70	0.77
700				0.77
				0.78

Взаимный анализ по горизонтали показывает, что колебания также хорошо коррелированы. На рис. 2 показана зависимость горизонтальной когерентности температурных ко-

лебаний от расстояния между буями для горизонтов 150, 700 и 1200 м. Когерентность повсеместно велика и превышает 95%-ный доверительный уровень (0.48) для 20 степеней свободы, использованных при расчете.

### Расчет направления и длины на основании данных измерений на буях

Для оценки длины волны и направления полусуточных приливных волн использовался метод Барбера, который был разработан для сейсмологии и применен к океанским волнам [2]. Предполагается произвольное расположение датчиков. Метод основан на расчете взаимных спектров для каждой пары возможных комбинаций датчиков с последующей сверткой на частоте изучаемой волны. Амплитуды и фазы взаимных характеристик используются для расчета пространственно-временного спектра на частоте изучаемой волны для оценки горизонтального волнового числа. Метод использует статистическую разность фаз между двумя парами датчиков. Для наших расчетов использовались датчики температуры, которые отражают вертикальные движения, связанные с внутренними волнами. Важно, чтобы расстояния между датчиками были сравнимы с длиной волны изучаемых волн, но расстояния между соседними датчиками не были больше длины волны. Иначе возникает неопределенность в интерпретации разностей фаз. Если расстояние между датчиками слишком мало, а размах антенны буев также мал, то определения длины волны будут неточными. В силу малого числа датчиков, спектр получается не дельтообразный, а пик спектра, соответствующий волновому числу, оказывается размытым. Поэтому обычно пространственно-временные спектры для определенной частоты представляют в виде изолиний от максимума спектра в процентах.

Расчет пространственно временного спектра производился по формуле:

$$E(k_x, k_y, f_0) = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [P_{ij}(f_0) \cos 2\pi(k_x x_{ij} + k_y y_{ij}) - Q_{ij}(f_0) \sin 2\pi(k_x x_{ij} + k_y y_{ij})],$$

где  $k_x^2 + k_y^2 = k^2$  пространственное волновое число, а длина волны  $L$  равна:  $L = 1/k$ ;  $i, j$  – номера датчиков,  $n$  – общее число датчиков;  $P_{ij}$  и  $Q_{ij}$  – реальная и мнимая части взаимного спектра между датчиками с номерами  $i$  и  $j$ ;  $x_{ij} = X_i - X_j$  а  $y_{ij} = Y_i - Y_j$  – проекции расстояний между датчиками на горизонтальные оси  $x$  и  $y$ .

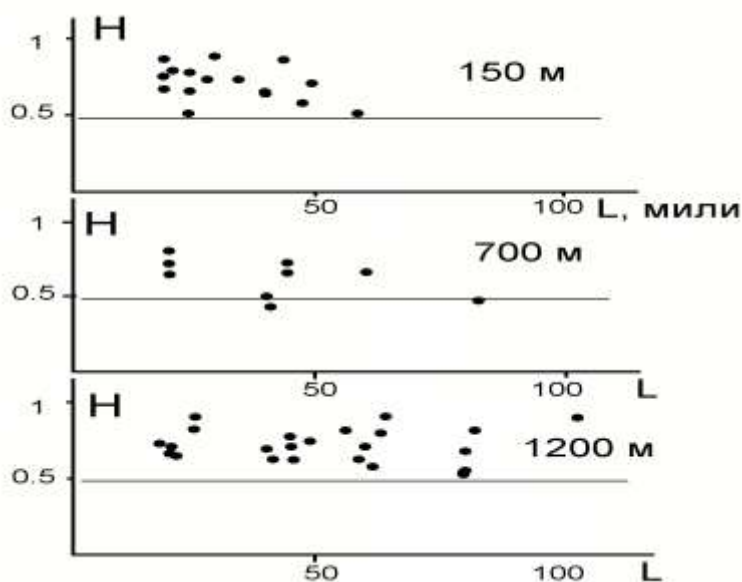
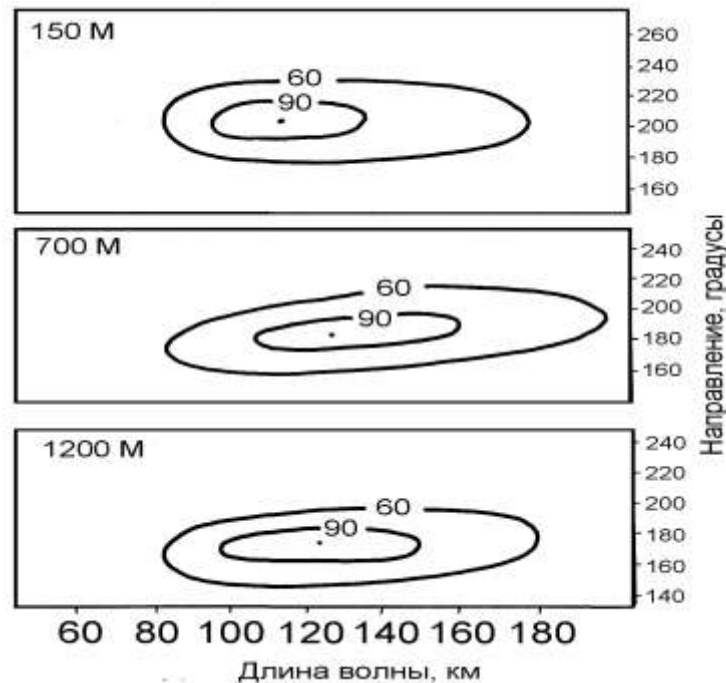


Рис. 2. Зависимость когерентности от расстояния на разных горизонтах (150, 700 и 1200 м). Тонкой линией показан 95%-ный доверительный уровень (0.48)

По измерениям температуры были рассчитаны пространственно-временные спектры для полусуточной частоты для всех горизонтов измерений. Спектры показаны на рис. 3.

Спектральные плотности даны в процентах от максимума пика. Все спектры характеризуются наличием одного доминирующего пика, соответствующего внутренней волне, распространяющейся на юг. Пик, который бы соответствовал волне, распространяющейся на запад от континентального склона Американского континента (побережье Калифорнии), либо отсутствует, либо его доверительная вероятность мала. Длина волны, распространяющейся на юг, около 120-130 км. Распространение волны на юг говорит о том, что ее генерация произошла в районе подводного хребта Мендосино.



**Рис. 3. Пространственно временные спектры для полусуточных колебаний температуры на горизонтах 150, 700 и 1200 м. Показаны изолинии сечения спектра вокруг максимальной точки. Изолинии даны в процентах от максимума (90% и 60%)**

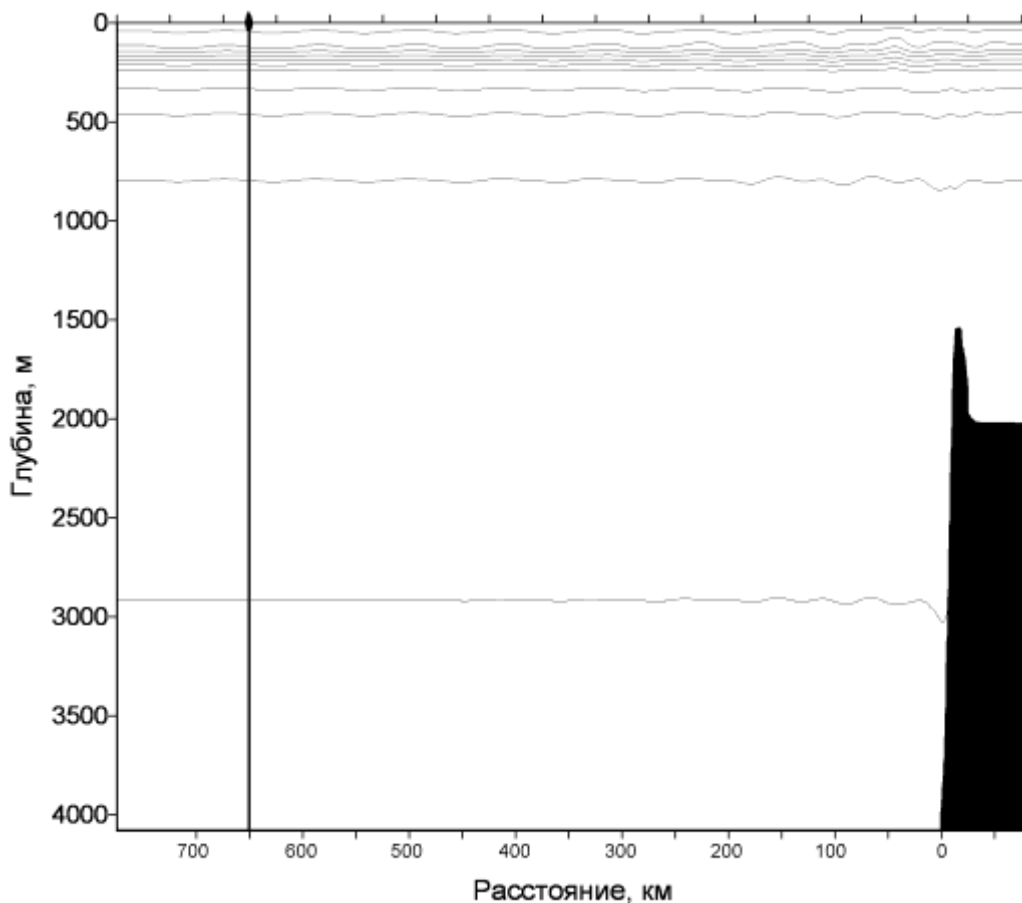
Расчет спектров по двум последовательным временным интервалам показал, что вид пространственно-временных спектров практически не изменился, что свидетельствует в пользу устойчивости направленности волн во времени.

### Модельные расчеты

Исследование генерации и распространения внутренних приливных волн на уклонах дна океана было произведено также на основе численного моделирования с использованием характерных гидрологических параметров для ввода данных в модель. Использована двумерная модель генерации и распространения внутренних волн в шельфовой зоне и над подводным хребтом в координатах, направленных перпендикулярно к береговой черте (либо к гребню подводного хребта) и по глубине. Внутренние волны считаются плоскими, распространяющимися перпендикулярно берегу. Оригинальная модель была разработана В.И. Власенко [6] и многократно апробирована в разных гидрологических условиях [4, 5].

Задается невозмущенное внутренними волнами поле плотности, которому соответствует распределение частоты Вьяйсяля-Брента  $N(z)$ , взятое из данных измерений. Течения баротропного прилива наиболее интенсивны в проливах между островами. Это соответствует следующему физическому явлению. Из открытой части океана, приблизительно перпендику-

лярно подводному хребту Мендосино, набегают длинная приливная баротропная волна. Приливные течения этой волны, встречая на своем пути препятствие в виде подводного хребта, получают вертикальные составляющие. Периодически изменяемые вертикальные составляющие течений вызывают вертикальные колебания изопикнических поверхностей и за счет этого механизма возбуждаются внутренние волны приливного периода. Таким образом, по заданным параметрам возбуждающей волны, стратификации и рельефа решается задача расчета параметров бароклинных волновых возмущений.



**Рис. 4.** Поле плотности на разрезе от подводного хребта Мендосино в сторону полигона буев после проведения расчетов в течение 40 приливных периодов M2 от начала вычислений.

Положение полигона буев обозначено вертикальной чертой.

Профиль дна показан черным цветом

Расход воды в течениях баротропного прилива задавался на основании пересчета скоростей течений баротропного прилива в функцию тока. Течения баротропного прилива оценивались по измерениям на буях. Для проведения расчетов по модели было выбрано рабочее поле протяженностью 800 км с шагом по горизонтали, равным 1 км, и 34 уровнями по вертикали. Шаг по времени равнялся 6 сек. Коэффициенты горизонтальной вихревой вязкости и диффузии плотности на крутых склонах задавались равными  $250 \text{ м}^2/\text{с}$ , а над ровным дном эти коэффициенты уменьшались до  $200 \text{ м}^2/\text{с}$ , тогда как соответствующие коэффициенты по вертикали равнялись  $0.0001 \text{ м}^2/\text{с}$ .

Результаты расчетов по модели после 40 приливных периодов расчета представлены на рис. 4. Такой длительный расчет потребовался, поскольку нас интересовали внутренние волны на большом расстоянии от источника (порядка шести-семи длин волн). Согласно расчетам, амплитуда волн (вертикальных смещений изопикнических поверхностей) в районе полигона равняется около 20 м, а длина волны равна 120-130 км. По мере распространения

внутренняя волна затухает и ее амплитуда уменьшается. В районе генерации у подводного хребта Мендосино амплитуда волн равняется около 50 м.

Близкая оценка длины волны (120 км) получена также при интегрировании уравнения для вертикальных скоростей, вызываемых внутренними волнами:

$$\frac{d^2 w}{dz^2} + \frac{N^2(z)}{g} \frac{dw}{dz} + \frac{N^2(z) - \omega^2}{\omega^2 - f^2} k^2 w = 0,$$

где  $k$  – волновое число,  $N(z)$  – реальное распределение частоты Вэйсяля-Брента по вертикали, рассчитанное по данным зондирования.

Аналогичный расчет был проделан для волн, генерированных около западного побережья США на континентальном склоне. Расчеты показали значительно меньшие амплитуды волн. Колебания изопикнических поверхностей, вызванные внутренними приливами показаны на рис. 5. Амплитуды волн не превышают 10 м. На фоне глубин более 4000 м вертикальные колебания с амплитудой около 10 м не выглядят наглядно в масштабе всей глубины, поэтому на рис. 5 показан расчет только для верхнего 400-метрового слоя.

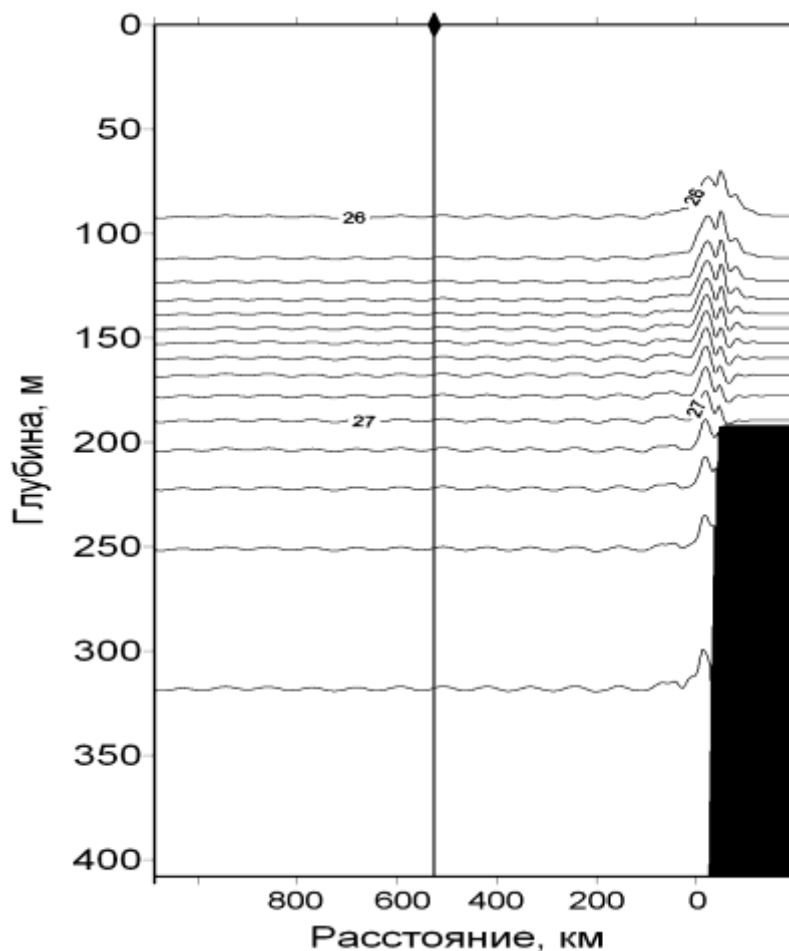


Рис. 5. Поле плотности на разрезе от континентального склона в сторону полигона буев после проведения расчетов в течение 40 приливных периодов M2 от начала вычислений. Полигон буев обозначен вертикальной чертой. Показан только верхний слой 400 м. Профиль дна показан черным цветом

### Заключение

В районе подводного хребта Мендосино баротропный прилив генерирует внутренний прилив. Амплитуды полусуточных внутренних волн над склоном равняются 50 м. Внутренняя приливная волна распространяется на юг и достигает полигона буев, расположенного на

расстоянии около 700 км к югу. При этом амплитуда волн уменьшается до 20 м. На континентальном склоне США также происходит генерация приливных волн, но значительно более слабая. Эти волны практически не регистрируются на полигоне и согласно численным расчетам амплитуда волн невелика. Длина волны, оцененная по измерениям на буюх и по расчетам с помощью численной модели, равняется около 125 км.

#### Библиографический список

1. **Baines, P.G.** On internal tide generation models / P.G. Baines // Deep-Sea Res. 1982. V. 29. № 3. P. 307-338.
2. **Barber, N.F.** The directional resolving power of an array of wave detectors / N.F. Barber // In: Ocean wave spectra, N.Y.: Engelwood Cliffs, Prentice Hall. 1963. P. 137-150.
3. **Morozov, E.G.** Semidiurnal internal wave global field / E.G. Morozov // Deep Sea Res. 1995. V. 42. № 1. P. 135-148.
4. Internal tides in the Strait of Gibraltar / E.G. Morozov [at all.] // J. Phys. Oceanogr. 2002. V. 32. P. 3193-3206.
5. **Vlasenko, V.I.** Nonlinear model for the generation of internal tides / V.I. Vlasenko // Phys. Oceanogr. 1992. V. 3. P. 417-424.
6. **Vlasenko, V.I.** Numerical experiments on the breaking of solitary internal waves over a slope-shelf topography / V.I. Vlasenko, K. Hutter // J. Phys. Oceanogr. 2002. V. 32. P. 1779-1793.

*Дата поступления  
в редакцию 15.07.2010*

**E.G. Morozov, T.A. Demidova, L.V. Nechvolodov**

#### **INTERNAL WAVES GENERATED NEAR THE MENDOCINO RIDGE (WESTERN COAST OF USA)**

The data from moorings deployed south of the Mendocino Ridge (western coast of the USA) in 1986 and a numerical model were used to study the generation and propagation of internal tides. The waves generated at the ridge and at the continental slope of the USA are studied. Estimates of wavelengths, amplitudes, and direction of semidiurnal internal tides were obtained. The dominating generation of internal tides occurs at the Mendocino Ridge. The generation of internal tides at the continental slope is weak.

*Key words:* internal tide, submarine ridge, moored current meters, numerical model.