

УДК 551.465

© Е. Г. Морозов

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН

egmorozov@mail.ru

Внутренние приливы и течения в Гибралтарском и Баб-эль-Мандебском проливах

Сравниваются измерения течений и температуры на буйках в Гибралтарском и Баб-эль-Мандебском проливах. В обоих проливах вертикальные смещения, вызванные полусуточными внутренними волнами, исключительно велики и в значительной степени подобны. Оба пролива характеризуются сильными двухслойными постоянными течениями противоположных направлений. Гидрологические режимы Гибралтарского и Баб-эль-Мандебского проливов весьма схожи. Каждый пролив соединяет внутреннее море с океаном. В обоих морях происходит сильное испарение, и оба моря получают мало пресной воды за счет стока рек. Испарение компенсируется притоком воды из океанов. За счет испарения в морях более соленая и плотная вода опускается в глубоководную часть и затем встречным течением вытекает через проливы в океан. На эту систему течений накладывается волна баротропного прилива, который генерирует внутреннюю приливную волну при обтекании течениями седловин поперечных хребтов в проливах. Внутренние приливы вблизи поперечных хребтов в проливах характеризуются амплитудами вертикальных смещений до 160—200 м. Внутренние приливы распространяются в обе стороны от хребтов, резко теряя свою энергию. Внутренний прилив возникает на фоне двухслойного течения, что усиливает амплитуду внутренних волн. Амплитуды внутренних приливов, распространяющихся против среднего потока усиливаются за счет сокращения длины волны.

Ключевые слова: внутренний прилив, течения, разнонаправленные потоки.

E. G. Morozov

P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia

egmorozov@mail.ru

Internal Tides and Currents in the Gibraltar and Bab-el-Mandeb Straits

We compare moored measurements of currents and temperature in the Gibraltar and Bab-el-Mandeb straits. In both straits the vertical displacements caused by semidiurnal internal waves are extremely high. Both straits are characterized by permanent strong two-layer currents of opposing directions. The hydrological regimes of the Gibraltar and Bab-el-Mandeb straits are very similar. Each strait connects an inland sea with the ocean. Strong evaporation exists in both seas and the runoff of fresh water by rivers is small in both seas. Evaporation is compensated by the surface flow of water from the ocean. Due to evaporation in the seas the saltier and dense water descends to the deep layers of the seas and then flows to the ocean as a bottom current of the opposite direction to the surface flow. A barotropic tidal wave is superimposed on this current system and generates a tidal internal wave during the flow of the currents over the sills in the straits. Internal tides near the sills are characterized by the amplitudes of vertical displacements that reach 160—200 m. Internal tides propagate to both sides of the sills rapidly losing their energy. Internal tide is generated over the background of two-layer shear current, which intensifies the amplitude of internal waves. The amplitudes of internal tides propagating opposite to the mean flow intensify due to the decrease in the wave length.

Key words: internal tide, currents, oppositely directed flows.

Гидрологические режимы Гибралтарского и Баб-эль-Мандебского проливов имеют много общего. Каждый из них соединяет внутреннее море с океаном. Гибралтарский пролив соединяет Средиземное море с Атлантическим океаном, а Баб-эль-Мандебский соединяет Красное море

с Индийским океаном. В обоих морях происходит сильное испарение, и оба моря получают мало пресной воды за счет стока рек. Испарение компенсируется притоком воды из океанов. За счет испарения в морях более соленая и плотная вода опускается в глубоководную часть и затем встречным течением вытекает через проливы в океан [1, 2].

На эту систему течений накладывается волна баротропного прилива, который генерирует внутреннюю приливную волну при обтекании течениями неровностей топографии, в особенности над подводными хребтами, которые пересекают проливы [3]. В Гибралтарском проливе это хребет Камаринал, а в Красном море седловина хребта Ханиш около острова Перим [1, 4, 5].

Длина Гибралтарского пролива 65 км, его минимальная ширина 14 км, минимальная глубина над хребтом Камаринал 340 м [6]. Минимальная ширина Баб-эль-Мандебского пролива 26 км. Пролив разделен островом Перим на две части. Восточная часть пролива шириной 3 км мелководная. Минимальная глубина в районе седловины Ханиш около 180 м [7].

В 1985 и 1986 гг. в Гибралтарском проливе был проведен эксперимент по измерению течений на буйах. Было установлено более 10 буйев, на каждом из которых имелись измерители течений, давления и температуры Aandera [4, 8]. В 1994—1995 гг. в проливе был проведен эксперимент World Ocean Circulation Experiment (WOCE) полигон АСМ9 с измерениями течений на буйковых станциях, а на дне устанавливались акустические доплеровские измерители скорости ADCP, смотрящие вверх.

В 1994—1996 гг. в Баб-эль-Мандебском проливе был проведен эксперимент WOCE по измерению течений на буйах. Измерители течений давления и температуры Aandera и Seacat устанавливались на притопленных буйковых станциях, а на дне устанавливались акустические доплеровские измерители скорости ADCP, смотрящие вверх [9, 10]. Данные измерений взяты из базы данных эксперимента WOCE свободного доступа. Дискретность данных 1 ч.

Карты проливов и точки установки буйев показаны на рис. 1.

Течения. После обработки данных измерителей течений ADCP в Гибралтарском проливе получены скорости в слоях толщиной 10 м по всей глубине. Поток из океана в Средиземное море в верхнем слое пролива, который компенсирует испарение, характеризуется скоростями до 40 см/с. Поток обращается в ноль на глубине около 130 м. Нижнее течение из моря в океан характеризуется еще большими скоростями до 85 см/с. Максимум скорости находится около дна. Вертикальный профиль горизонтальной скорости показан на рис. 2, а.

В Баб-эль-Мандебском проливе по данным ADCP получены скорости в слоях толщиной 10 м. Поток из океана в Красное море в верхнем слое пролива, который компенсирует испарение, характеризуется скоростями до 40 см/с. Поток обращается в ноль на глубине около 100 м. Нижнее течение из моря в океан характеризуется скоростями до 80 см/с и занимает весь слой от глубины 100 м до дна. Максимум скорости находится на глубине 150—160 м. Максимальная глубина пролива в районе седловины близка к 220 м. Надо иметь в виду, что в глубинных слоях ширина пролива уменьшается и на глубине 150 м равна 8 км. В связи с этим скорость потока в глубинной части пролива выше, чем

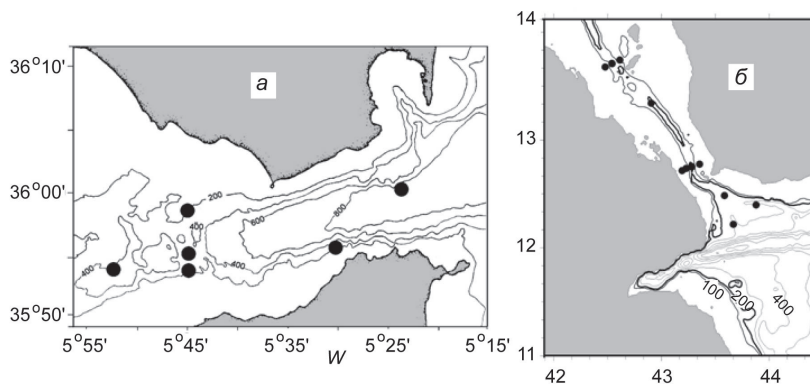


Рис. 1. Карты проливов Гибралтарского (а) (изобаты 200, 400, 600 и 800 м) и Баб-эль-Мандебского (б) (изобаты 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 м). Черные точки показывают положения буйев.

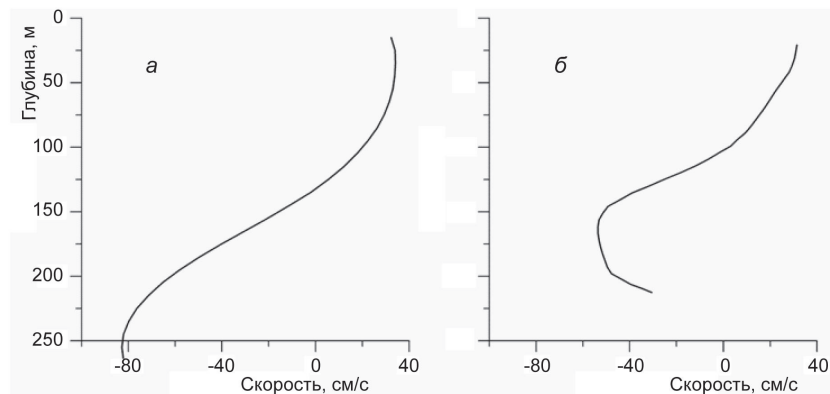


Рис. 2. Вертикальные профили горизонтальных течений в Гибралтарском (а) и Баб-эль-Мандебском (б) проливах. Положительные значения — течения на восток в Гибралтарском проливе и юго-восток (азимут 150°) в Баб-эль-Мандебском проливе.

в верхней. Около дна скорость опять уменьшается. Вертикальный профиль горизонтальной скорости показан на рис. 2, б.

В работах [4, 11] были опубликованы ранее полученные результаты о течениях и волнах в Баб-эль-Мандебском и Гибралтарском проливах.

Спектры и вертикальные смещения. Спектральные плотности флуктуаций температуры и вертикальных смещений рассчитывались по измерениям температуры с дискретностью 1 ч. В Гибралтарском проливе (рис. 3, а) доминирует полусуточный прилив. Амплитуды (отклонения от среднего) вертикальных смещений на частоте внутреннего прилива M2 составляют около 69 м, а амплитуды других компонент внутреннего прилива (S2, K1, O1) в два-три раза меньше. Суммарные вертикальные отклонения превышают в максимуме 100 м. Эти колебания связаны с внутренними волнами, генерированными около хребта Камаринал, пересекающего Гибралтарский пролив. Амплитуды волн уменьшаются с расстоянием от хребта Камаринал и на расстоянии около 50 км от хребта становятся в три раза меньше, чем над хребтом. Энергия внутренних приливов передается внутреннему бору и перемешиванию. Сдвиг скорости, образованный двумя противоположно направленными течениями, усиливает внутренний бор и внутренние волны в верхнем слое.

В Баб-эль-Мандебском проливе присутствуют и суточный, и полусуточный приливы (рис. 3, б) [12]. На спектрах колебаний течений и температуры имеются пики с высокой достоверностью на периодах 24.0 и 12.4 ч. Преобладают суточные внутренние приливные волны. На спектрах температуры появляются обертоны на периодах 8.2 и 6.2 ч. Амплитуда волн полусуточного периода (вертикальное смещение частиц воды) на седловине Ханиш около острова Перим (широта $12^\circ 30'$) оценена как 80 м, а на северной группе буев (широта $13^\circ 30'$) как 20 м. Затухание волн аналогично

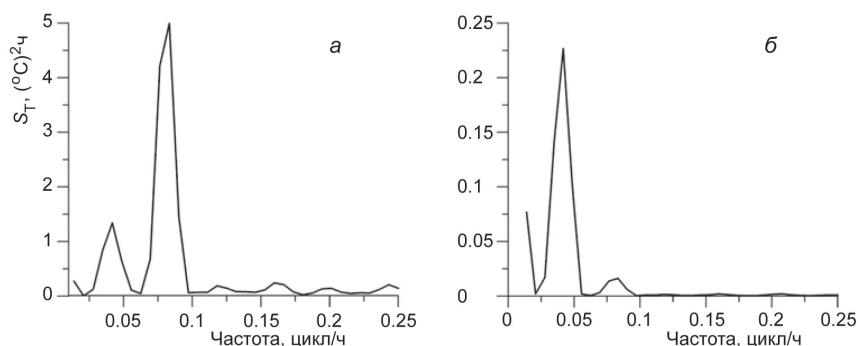


Рис. 3. Спектры флуктуаций температуры в Гибралтарском (а) (буй на хребте Камаринал, горизонт измерений 153 м, глубина 321 м) и Баб-эль-Мандебском (б) (буй над хребтом Ханиш, горизонт измерений 117 м при глубине 162 м) проливах.

затуханию в Гибралтарском проливе, где на расстоянии около 50 км от хребта их амплитуда уменьшается в три раза.

Пространственно-временной спектр для полусуточных волн. Мы применили антенный метод, чтобы вычислить длину волны и направление полусуточных внутренних волн. Этот сейсмологический метод был применен Барбером к океанским волнам [13]. Допускается произвольное расположение датчиков. Сначала производится расчет взаимных спектров для каждой пары возможных комбинаций датчиков с последующей сверткой на частоте изучаемой волны (период 12.4 ч). Затем, амплитуды и фазы ко-спектра и квадратурного спектра используются для расчета пространственно-временного спектра на частоте изучаемой волны, чтобы оценить горизонтальное волновое число. Используется статистическая разность фаз между каждыми двумя парами датчиков. Мы использовали датчики температуры, которые отражают вертикальные движения, связанные с внутренними волнами. При расчете важно, чтобы расстояния между датчиками были сравнимы с длиной изучаемых волн, но расстояния между соседними датчиками не превышали 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. Обычно число датчиков мало и спектр получается не дельтообразный, а пик спектра, соответствующий волновому числу, оказывается размытым. Пространственно-временные спектры для определенной частоты представляют в виде изолиний от максимума спектра в процентах.

Расчет пространственно-временного спектра для полусуточной частоты выполнялся по следующей формуле:

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

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

Поскольку считалось, что основная генерация внутреннего прилива происходит над хребтом Камаринал, буйковые станции в Гибралтарском проливе были разделены на восточную и западную группы. Длина волны, рассчитанная на основе 10 различных комбинаций реализаций на буях западной группы (с учетом выборки в разные периоды времени) изменяется от 45 до 60 км, тогда как направление меняется от 210 до 280°. Длина волны, оцененная по 16 различным комбинациям пространственного расположения буев и временных интервалов в восточной группе буев, изменяется от 90 до 140 км (среднее 110 км), а генеральное направление распространения на восток меняется от 90 до 120°.

Длина волны внутреннего прилива, оцененная по дисперсионному соотношению, к востоку от хребта равна 94 км (фазовая скорость 2.1 м/с), а к западу от хребта длина волны равна 59 км (фазовая скорость 1.3 м/с). Мы приняли, что средняя глубина к востоку от хребта равна 800 м, а к западу от хребта равна 500 м.

В Баб-эль-Мандебском проливе расчет производился для треугольника буев в южной части пролива на горизонте измерений около 400 м при глубине океана более 500 м, увеличивающейся на юго-восток. По данным расчета направление волн 150°, длина волны 80 км. Эти волны можно интерпретировать как внутренние полусуточные волны, генерированные на седловине подводного хребта между Азией и Африкой в проливе около острова Перим.

Обсуждение. Анализ данных измерений течений и температуры на буях в Гибралтарском и Баб-эль-Мандебском проливах показывает, что амплитуды полусуточных внутренних волн в этих районах очень велики. Вертикальные смещения частиц воды, вызванные совместным действием различных внутренних приливных волн над поперечными хребтами, достигают 200 м в Гибралтарском проливе. В Баб-эль-Мандебском проливе они несколько меньше (160 м), но все равно очень большие. Внутренние приливы в обоих проливах генерируются одним и тем же физическим механизмом: обтеканием течений баротропного прилива седловины поперечных хребтов. Волны

распространяются вдоль проливов в стратифицированном потоке, который изменяет свойства волн. Интенсивные средние течения — это другая общая характерная черта обоих проливов.

Внутренний прилив захватывает всю толщу вод. В Гибралтарском проливе максимум первой моды располагается в нижнем течении, вытекающем из Средиземного моря. Внутренний прилив интенсифицируется при распространении в восточном направлении, поскольку он распространяется против течения из моря. Взаимодействие с течением сокращает длину волны и концентрирует волновую энергию на меньшем пространственном масштабе, вследствие чего амплитуда волн возрастает. Это приводит к нелинейным трансформациям и обрушению внутреннего прилива и формированию внутреннего бора на пикноклине, проявления которого видны на поверхности океана [4, 6]. В восточной части пролива пикноклин располагается ближе к поверхности, чем в западной части пролива. В западной части пролива волна распространяется в том же направлении, что и поток из Средиземного моря. Поэтому длина волны увеличивается, а амплитуда уменьшается. Пикноклин расположен глубже, чем на востоке, и поверхностные проявления внутренних волн слабее.

Аналогичные процессы происходят и в Баб-эль-Мандебском проливе. За счет сильного испарения с поверхности уровень моря поддерживается поверхностным течением из Индийского океана. Более плотная соленая вода вытекает нижним течением из Красного моря в океан. Приливные течения возбуждают интенсивные внутренние приливы суточного и полусуточного периода в районе поперечного хребта Ханиш около острова Перим.

В заключение заметим, что пролив Карские Ворота характеризуется гидрологическим режимом, похожим на проливы, рассмотренные выше [14].

Выводы. Интенсивные внутренние волны, наблюдаемые в Гибралтарском и Баб-эль-Мандебском проливах, генерируются при обтекании течениями баротропного прилива седловин поперечных хребтов в проливах.

Анализ данных показывает, что внутренние приливы вблизи поперечных хребтов в проливах характеризуются амплитудами вертикальных смещений до 160—200 м, что лишь немногим меньше, чем глубина пролива. Внутренние приливы распространяются в обе стороны от хребтов, резко теряя свою энергию. Внутренний прилив возникает на фоне двухслойного течения, что усиливает амплитуду внутренних волн. Амплитуды внутренних приливов, распространяющихся против среднего потока, усиливаются за счет сокращения длины волны.

Литература

1. Bower A. S., Hunt H. D., Price J. F. Character and dynamics of the Red Sea and Persian Gulf outflows // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N. C3. P. 6387—6414.
2. Bryden H. L., Candela J., Kinder T. H. Exchange through the Strait of Gibraltar // *Prog. Oceanogr.* 1994. V. 33. P. 201—248.
3. Hibiya T. Generation mechanism of internal waves by a vertically sheared tidal flow over a sill // *J. Geophys. Res.* 1990. C, 95. P. 1757—1764.
4. Morozov E. G., Trulsen K., Velarde M. G., Vlasenko V. I. Internal tides in the Strait of Gibraltar // *J. Phys. Oceanogr.* 2002. V. 32. P. 3193—3206.
5. Watson G. Internal waves in a stratified shear flow: The Strait of Gibraltar // *J. Phys. Oceanogr.* 1994. V. 24. P. 509—517.
6. Lacombe H., Richez C. The regime of the Strait of Gibraltar // *Hydrodynamics of Semi-Enclosed Seas* / Ed. J.C.J. Nihoul. Amsterdam: Elsevier, 1982. P. 13—74.
7. Murray S. P., Johns W. Direct observations of seasonal exchange through the Bab el Mandab Strait // *Geophysical Research Letters*. 1997. V. 24(21). P. 2557—2560.
8. Kinder T. H., Bryden H. L. The 1985-1986 Gibraltar experiment: Data Collection and preliminary results // *EOS Trans. AGU*. 1987. V. 68. P. 786—787, 793—795.
9. Smeed D. A. Seasonal variation of the flow in the Strait of Bab el Mandeb // *Oceanologica Acta*. 1997. V. 20. P. 773—781.
10. Smeed D. A. Exchange through the Bab el Mandab // *Deep-Sea Research II*. 2004. V. 51. P. 455—474.
11. Морозов Е. Г. Внутренние приливы в Баб-эль-Мандебском проливе // *Труды Нижегородского государственного университета*. 2013. № 3. С. 32—36.
12. Jarosz E., Blain C. A., Murray S. P., Inoue M. Barotropic tides in the Bab el Mandab Strait, numerical simulations // *Continental Shelf Research*. 2005. V. 25. P. 1225—1247.
13. Barber N. F. The directional resolving power of an array of wave detectors // *Ocean Wave Spectra*, Prentice Hall. 1963. P. 137—150.
14. Morozov E. G., Parrilla-Barrera G., Velarde M. G., Scherbinin A. D. The Straits of Gibraltar and Kara Gates: A Comparison of Internal Tides // *Oceanologica Acta*. 2003. V. 26(3). P. 231—241.

Статья поступила в редакцию 10.02.2015 г.