

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ШЕЛЬФОВЫЕ ВОЛНЫ В БОЛЬШОМ АВСТРАЛИЙСКОМ ЗАЛИВЕ  
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

© 2020 г. Н. В. Сандалюк<sup>а</sup>, \*, Т. В. Белоненко<sup>а</sup>, А. В. Колдунов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: nikitasantaliuk@gmail.com

Поступила в редакцию 15.01.2020 г.

Анализируются шельфовые волны в Большом Австралийском заливе по данным спутниковой альтиметрии. Показано, что фазовая скорость первой моды топографических волн для средней ширины шельфа 200 км равна 1.8 м/с, а для максимальной ширины шельфа 300 км – 2.7 м/с. Полученные оценки фазовой скорости хорошо согласуются с оценками, рассчитанными по пространственно-временным спектрам. По графикам двумерных FFT-спектров выделяются волны с периодами 22, 30, 38 сут. Длина волн выделенных периодов изменяется в широком диапазоне от 1500 до 2500 км. Теоретические дисперсионные кривые соответствуют эмпирическим параметрам топографических волн для периода 38 сут. Метод максимальной кросс-корреляции (осреднение за период 1993–2018 гг.) разделяет акваторию Большого Австралийского залива на две части: на шельфе волны направлены на восток со средней скоростью 20 см/с (осреднение за 26 лет), на остальной части акватории волны Росбси распространяются в западном направлении со скоростью, достигающей 15 см/с. Метод разложения временных рядов на колебания определенного периода подтвердил результаты анализа двумерных спектров. Установлено, что интенсивность колебаний существенно изменяется во времени и в пространстве. Пространственно-временные диаграммы колебаний уровня с периодами 22, 30, 38 сут вдоль контуров 50, 100 и 200 м фиксируют существенную изменчивость скорости волн как во времени, так и на различных отрезках контура. Для всех трех контуров отмечается увеличение скорости волн в восточной части Большого Австралийского залива по сравнению с другими частями шельфа.

*Ключевые слова:* альтиметрия, аномалии уровня моря, шельфовые волны, дисперсионные кривые, Большой Австралийский залив

DOI: 10.31857/S0205961420050085

ВВЕДЕНИЕ

Береговые захваченные волны (coastal-trapped waves) вносят существенный вклад в изменчивость уровня океана в прибрежных областях океана. Возмущения атмосферного давления и ветер создают в океане градиенты в поле уровня, в результате чего релаксация этих возмущений в береговой области происходит в виде шельфовых волн, а при наличии определенной морфометрии береговой линии и стратификации – в виде внутренних волн Кельвина (Гилл, 1986).

Принадлежность низкочастотных береговых захваченных волн к тому или иному классу приближенно можно определить по, так называемому, параметру стратификации  $\epsilon = R_1/D$ , где  $R_1$  – бароклинный радиус деформации Росбси, а  $D$  – ширина шельфа. Если  $\epsilon > 1$ , то наблюдающиеся волновые движения можно отнести к внутренним волнам Кельвина, если же  $\epsilon \ll 1$ , то к шельфовым волнам (Kajiura, 1974; Wang, Mooers, 1976). Шельф играет роль волновода, по которому вол-

ны распространяются с минимальными потерями кинетической энергии.

Береговые захваченные волны могут рассматриваться независимо от волновых движений прилегающих глубоководных районов. Робинсон (Robinson, 1964) был первым, кто показал, что линейаризованные уравнения мелкой воды могут быть использованы для описания распространения низкочастотных береговых захваченных волн вдоль наклонного континентального шельфа. С тех пор разрабатывались различные теории и множество моделей для описания распространения береговых захваченных волн вдоль реалистичных континентальных шельфов. Однако классическая теория и простой подход, предложенный Робинсоном для описания шельфовых волн несколько десятков лет назад, и сегодня остаются актуальными. В настоящей работе мы также используем ее для анализа шельфовых волн южного побережья Австралии.

Известно, что в районе южного побережья Австралийского континента доминируют субинерционные береговые захваченные волны. Интерес

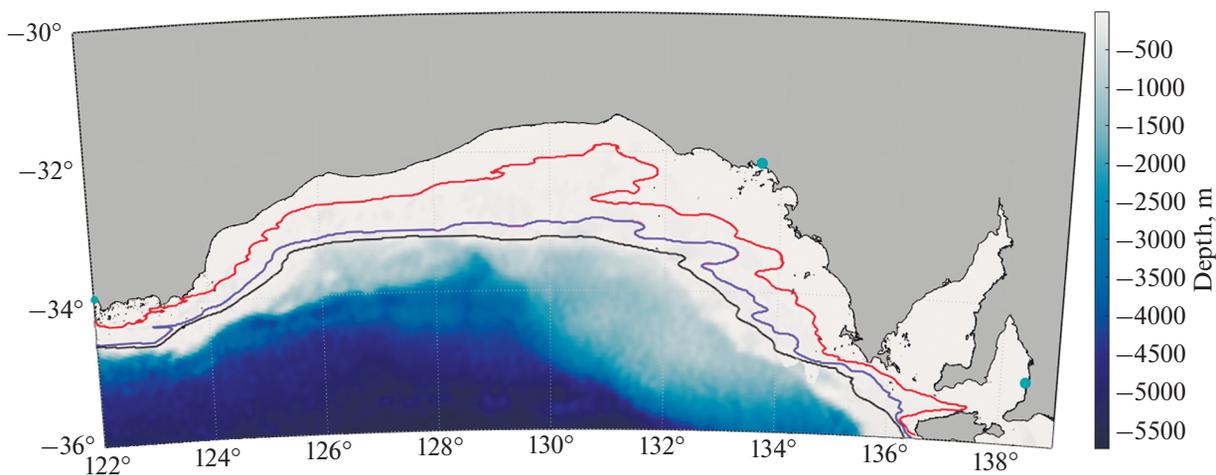


Рис. 1. Донная топография (м) в районе исследования. Красной линией отмечен контур изобаты 50 м, синей – 100 м, черной – 200 м.

исследователей к данному региону во многом обусловлен тем, что именно здесь были получены первые экспериментальные данные и разработаны первые методы исследования этих волн. Остановимся кратко на некоторых из них. Намон (1962, 1963), проанализировав данные по уровню моря с береговых мареографных постов на юго-восточном побережье Австралии, выявил значительную корреляцию сигнала между двумя уровнями постами и установил, что зарегистрированный сигнал распространяется вдоль восточного побережья в северном направлении (оставляя берег слева). Для теоретического объяснения данного явления Робинсон (1964) предложил теорию континентальных шельфовых волн, которые существуют в виде низкочастотных колебаний, распространяющиеся в нестратифицированном океане. В продолжении своей работы Намон (1966) интерпретировал обнаруженные им низкочастотные колебания на восточном побережье Австралии, как континентальные шельфовые волны, а название “береговые захваченные волны”, объединяющие все типы волновых движений в прибрежной области, было дано позднее в работе (Gill, Clarke, 1974).

Отметим, что ширина шельфовой зоны южного побережья Австралии (по изобате 500 м) варьирует от 100 до 300 км (рис. 1), а бароклинный радиус деформации в этой области не превышает 25 км (см., Global Atlas...; Chelton et al., 1998), следовательно, параметр стратификации  $\epsilon \ll 1$ , поэтому можно уверенно утверждать, что в низкочастотном диапазоне частот именно шельфовые волны доминируют в береговой зоне южной Австралии. Их характеристики многократно изучались с использованием различных подходов, включая гидродинамическое моделирование (см.,

например, Freeland et al., 1986; Church et al., 1986a, b; Merrifield, Middleton, 1994; Maiwa et al., 2010; Woodham et al., 2013). В частности, анализируя данные Австралийского прибрежного эксперимента (Australian Coastal Experiment, ACE), Freeland et al. (1986) показали, что в низкочастотной изменчивости уровня моря в восточной части прибрежной зоны Австралии доминируют шельфовые волны с фазовой скоростью около 2–4 м/с, периодом около 10 сут, амплитудой 5–10 см и длиной волны около 2500 км. В дальнейшем Holland и Webster (1994), исследуя прогнозируемые фазовые скорости для четырех теоретических моделей и сравнивая их с данными ACE, показали, что шельфовые волны могут взаимодействовать с прибрежными течениями, в частности, с меандрами Восточно-Австралийского течения, и это значительно влияет на скорость распространения волн.

Weijer (2010), анализируя альтиметрические данные в Австрало-Антарктическом бассейне, обнаружил высокую пространственную когерентность колебаний уровня моря с колебаниями напряжений ветра на сдвигах один месяц  $\pm 2$  дня. Этот вывод позволил ему утверждать резонансную природу свободных топографических волн в регионе исследования. В то же время автор признает, что выявленная статистическая связь не отражает физику рассматриваемого явления, и рассматриваемые топографические волны на самом деле могут быть вызваны другими причинами. Отметим, что это исследование в основном фокусируется на крупномасштабных топографических неоднородностях в акватории, простирающейся до  $65^\circ$  ю.ш., и собственно шельфовой области южнее Австралии в этой работе уделяется небольшое внимание.

De-Leon и Paldor (2017), анализируя по альтиметрическим данным меридиональную изменчивость уровня в акватории Большого Австралийского залива, вообще исключают шельфовые волны из рассмотрения. Основанием для такого решения является применение авторами низкочастотного фильтра (35 дней), который, по их мнению, исключает из рассмотрения как волны Кельвина, так и шельфовые волны.

Подробное исследование пространственной структуры и характеристик шельфовых волн, распространяющихся вдоль южного и западного побережий Австралии, проведено в исследовании Maiwa et al. (2010). Используя данные с береговых мареографных постов, а также результаты численного моделирования, авторы получили оценки фазовой скорости волн более 4.5 м/с и характерный период 1–2 нед. В этой работе выделены два основных региона генерации шельфовых волн: восточная оконечность западно-австралийского побережья и юго-восточная часть континента (Бассов пролив). При этом авторы отмечают ярко выраженную сезонность, которая характеризуется значительным увеличением амплитуды волн в течение летнего периода (для южного полушария).

В дальнейшем Woodham et al. (2013), на основе анализа данных с береговых уровенных постов и данных численного моделирования, установили, что для южного побережья Австралии доминирующий период шельфовых волн составляет порядка 10 дней, а фазовая скорость равна 8.8 м/с (между уровенными постами Esperance и Portland). Была выявлена связь между стандартным отклонением уровня моря (а также соответствующими амплитудой и фазовой скоростью волн) и шириной континентального шельфа. Это означает, что на величину амплитуды волн существенное влияние оказывают топографические особенности шельфовой зоны. Как и в исследовании Maiwa et al. (2010), в работе Woodham et al. (2013) утверждается, что шельфовые волны могут перемещаться на восток через Бассов пролив и далее на север вдоль восточного побережья.

В работе (Liao, Wang, 2018) анализируются вынужденные береговые захваченные волны, вызванные ветром, на восточном шельфе Австралии и выделяются волны с периодами 14.2, 10.2 и 7.8 дней. Авторы также устанавливают влияние ширины шельфа на амплитуду волн и подтверждают распространение шельфовых волн из района южного побережья к восточному через Бассов пролив. В то же время в работе (Clarke, 1987), где рассматриваются две аналитические модели, показано, что береговые захваченные волны на восточном шельфе Австралии не распространяются через Бассов пролив из южного австралийского волновода, а в значительной степени генериру-

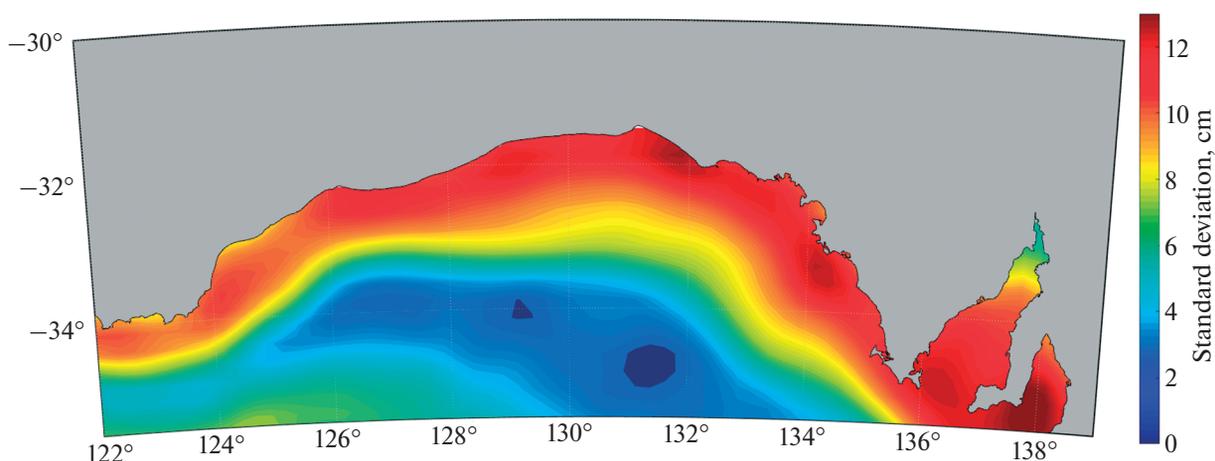
ются очень сильными низкочастотными ветрами непосредственно в проливе Басса.

Отметим, что во всех перечисленных работах установленные характеристики шельфовых волн варьируются в широком диапазоне. В частности, фазовая скорость волн в районе Большого Австралийского залива по данным различных исследований варьируется в диапазоне 4.5–22.6 м/с (Maiwa et al., 2010; Woodham et al., 2013). Такому разбросу в значениях характеристик волн способствуют несколько причин. Среди них можно выделить низкое пространственное разрешение данных с уровенных постов на южном побережье Австралии в сравнении с пространственными масштабами волн. С другой стороны, существенное влияние на оцениваемые характеристики волн оказывает неоднородность донной топографии в районе исследования, которая, наоборот, изменяется в гораздо меньших пространственных масштабах, чем пространственные масштабы волн. Донная топография в исследуемом регионе обусловлена изменением ширины шельфа и шельфового склона, а также наличием большого количества заливов, бухт и островов (Woodham et al., 2013). В свою очередь, гидродинамическое моделирование далеко не всегда позволяет учесть многие топографические факторы и реалистично описать шельфовые волны (см., Maiwa et al., 2010). Все это означает, что в исследовании шельфовых волн в данном регионе еще рано ставить окончательную точку.

В нашей работе мы анализируем шельфовые волны в Большом Австралийском заливе на основе данных спутниковой альтиметрии, опираясь на классические модели шельфовых волн. Среди очевидных преимуществ альтиметрических данных следует выделить их высокое пространственное разрешение по сравнению с данными береговых мареографных постов, что позволяет для исследуемого региона получить характеристики шельфовых волн на основе альтиметрии. При всем разнообразии предыдущих исследований, подобного рода изучение шельфовых волн для Большого Австралийского залива ранее не проводилось.

## ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе использовались данные аномалий уровня моря (Sea Level Anomalies, SLA), доступного на портале Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) CMEMS (<http://marine.copernicus.eu/>). Представленный массив является результатом объединения данных со всех альтиметрических миссий, начиная с за период 1993–2018 гг. Пространственное разрешение данных составляет  $0.25^\circ$ , временная дискретность 7 сут. Последнее обновление массива включает в себя новые сенсорные и атмосферные поправки,



**Рис. 2.** Среднеквадратическое отклонение аномалий уровня (см) за период 1993–2018 гг. вдоль южного побережья Австралии.

включая поправку на закон обратного барометра, и новую модель приливов (Pujol et al., 2016). Аномалии уровня рассчитывались относительно данных среднего уровня моря (Mean Sea Surface, MSS), доступных на портале Aviso+ (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/mss.html>).

Для получения характеристик волн из исходных данных были удалены сезонная и трендовая компонента при помощи метода STL (Cleveland et al., 1990). Под трендовой компонентой в данном методе подразумеваются долгопериодные изменения уровня, например, долгосрочное повышение (или понижение) уровня под действием климатических факторов. В результате мы получили остаточный сигнал, который содержит себе информацию о волновых колебаниях в исследуемом регионе.

Отметим, что для района южного шельфа Австралии наблюдается отличное соответствие между данными береговых станций и соответствующими данными альтиметрии. Сравнение альтиметрических измерений и данных мареографных станций представлено на сайте Aviso+ (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/calval/in-situ/in-situ-global-statistics.html>). Это позволяет рассматривать данные альтиметрии как репрезентативные и подходящие для исследования низкочастотных колебаний в районе Большого Австралийского залива.

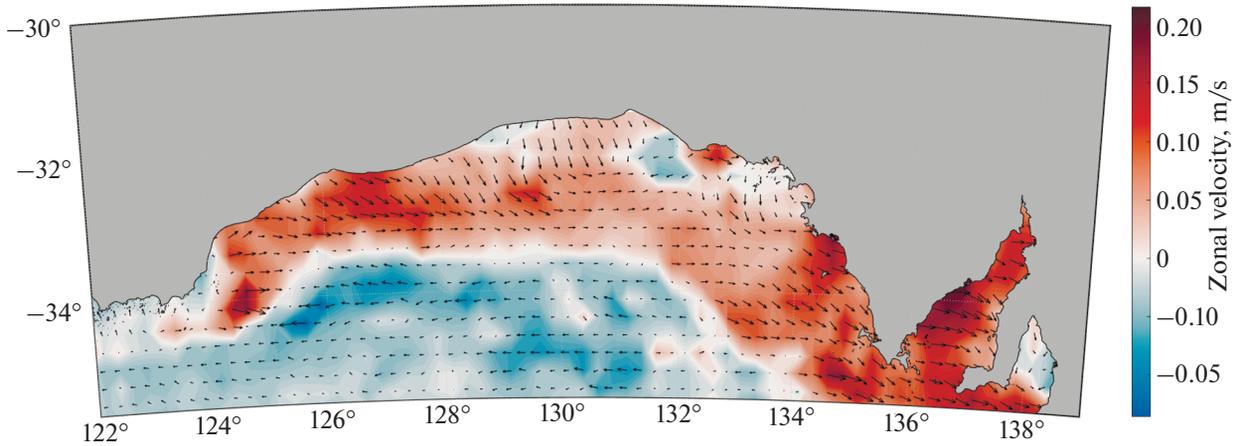
## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для расчета характеристик шельфовых волн рассматривались временные ряды SLA в пунктах координатной сетки вдоль изобат 50, 100 и 200 м (рис. 1). Для каждого топографического контура имеется 60 пунктов с соответствующими рядами альтиметрических данных. Среднее расстояние

между пунктами составляет 21 км, что соответствует пространственному разрешению альтиметрических данных ( $0.25^\circ$ ).

На рис. 2 видно, что среднеквадратическое отклонение аномалий уровня в прибрежной области значительно превышает значения в других частях акватории. Область повышенных значений аномалий уровня приблизительно совпадает с областью шельфа и фиксирует увеличение амплитуд колебаний уровня.

Для оценки пространственного распределения скорости и направления распространения шельфовых волн применялся метод максимальной кросс-корреляции (Fu, 2009). Суть данного метода заключается в расчете корреляций между значениями аномалий уровня при заданном пространственном окне и сдвиге на различных временных интервалах. Расчеты проводились для ширины окна  $1.0^\circ$  долготы, что в 4 раза больше пространственного разрешения альтиметрических данных. Так как мы фокусировались на синоптической изменчивости, сдвиг по времени был ограничен 12 нед. (Volkov et al., 2013). Результаты расчетов скорости по методу максимальной кросс-корреляции представлены на рис. 3. Видно, что максимальные значения скоростей достигаются в области шельфа, при этом вектора на шельфе направлены преимущественно на восток. На цветовой шкале отчетливо выделяются две области с положительными и отрицательными зональными скоростями. Если на шельфе вектора скорости направлены на восток, то вне области шельфа скорости направлены на запад. Области с отрицательными значениями соответствуют распространяющимся на запад волнам Россби, скорости которых достигают 15 см/с. Области с положительными значениями — шельфовым волнам, которые распространяются на восток. Средние за



**Рис. 3.** Скорости шельфовых волн (стрелки) в районе Большого Австралийского залива, рассчитанные методом максимальной кросс-корреляции. Цветом показаны значения зональной составляющей скорости (м/с). Период осреднения 1993–2018 гг.

период 1993–2018 гг. скорости шельфовых волн составляют 20 см/с.

Сравним полученные эмпирические оценки скоростей волн с теоретическими. Согласно модели баротропных шельфовых волн Робинсона (Robinson, 1964), оценки фазовой скорости шельфовых волн можно получить по формуле:

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{fD}{\gamma_j^2}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – частота,  $k$  – зональное волновое число,  $f = 2\Omega \sin \varphi$  – параметр Кориолиса,  $\Omega$  – скорость вращения Земли,  $\varphi$  – широта, а значения  $\gamma_j$  определялись как корни функции Бесселя нулевого порядка  $J_0(2\gamma_j)$ . Для шельфовых волн формула (1) верна, когда  $\omega^2 \ll f^2$ , что соответствует волнам с периодами, превышающими инерционный период, который для этих широт около 20 ч. При выполнении данного условия первая мода шельфовых волн вычисляется по формуле

$$c_1 = \frac{fD}{2\pi \times 1.44}.$$

Таким образом, для средней ширины шельфа  $D = 200$  км теоретическая оценка фазовой скорости составляет 1.8 м/с, для максимальной ширины шельфа 300 км, фазовая скорость составляет 2.7 м/с.

Теория береговых захваченных волн исключительно сложна. ЛеБлон и Майсек (1981) указывают, что в случае непрерывно стратифицированной жидкости переменной глубины невозможно разделить горизонтальную и вертикальную зависимости. Дело в том, что граничное условие на дне  $\vec{u} \cdot \vec{n} = 0$  включает в себя горизонтальную и вертикальную компоненты скорости. Именно

этим можно объяснить особый интерес к береговому захвату баротропных волн.

Теоретические исследования шельфовых волн, как правило, основываются на уравнениях мелкой воды для вращающейся жидкости: см., например, ЛеБлон, Майсек (1981, глава 4), где изложена соответствующая теория, к которой мы отсылаем заинтересованного читателя. Если решение соответствующего уравнения для уровня  $\eta$ , полученного из системы уравнений мелкой воды, искать в виде

$$\eta = F(y)e^{i(kx - \omega t)}, \quad (2)$$

где  $F(y)$  – амплитуда волн, распространяющихся вдоль береговой черты, направленной вдоль оси  $x$ , а  $t$  – время, то уравнение для амплитуды имеет вид:

$$(HF')' + \left( \frac{\omega^2 - f^2}{g} - k^2 H - \frac{fk}{\omega} H' \right) F(y) = 0, \quad (3)$$

$$0 \leq y \leq \infty,$$

где  $H$  – глубина, а  $g$  – ускорение свободного падения.

Граничными условиями для  $F$  будут

$$F \rightarrow 0, \quad y \rightarrow \infty, \quad (4)$$

$$H(-\omega F' + fkF) = 0, \quad y = 0.$$

Первое условие гарантирует, что при всех профилях глубины происходит захват энергии берегом. Второе условие означает отсутствие потока массы через береговую границу.

Решение уравнения (3) с граничными условиями (4) в общем случае возможно только численно. В частных случаях (например, экспоненциальный, степенной или ступенчатый профиль

рельефа) решения могут быть получены аналитически, что позволяет рассмотреть модовую структуру волн. В целом, существует весьма ограниченный набор функций, которыми можно успешно аппроксимировать шельф и получить аналитические решения в виде мод (см. обзор, например, в монографии Ефимов и др., 1985). Однако для шельфа Южной Австралии единый аналитический профиль отсутствует в связи с большой изменчивостью параметров шельфа, при которой изменяется не только форма профиля шельфа, но и ширина (см. рис. 1). В связи с этим в дальнейшем исследовании мы оперируем со средними параметрами шельфа, и полученные результаты являются средними оценками, которые локально в отдельных частях шельфа могут отличаться. Забегая вперед, отметим, что полученные нами общие оценки пространственно-временных масштабов изменчивости на основе спутниковых альтиметрических измерений весьма неплохо согласуются с оценками других авторов, полученными независимыми методами, включая численное моделирование (Kajiura, 1974; Freeland et al., 1986; Church et al., 1986a, b; Clarke, 1987; Merrifield, Middleton, 1994; Holland, Webster, 1994; Maiwa et al., 2010; Liao, Wang, 2018). Это означает, что альтиметрические данные могут применяться для решения таких задач, а учитывая их неоспоримые преимущества, к главным из которых относятся: пространственная репрезентативность и оперативность получения информации, это дает дополнительные конкурентные преимущества для использования альтиметрических измерений в прибрежной зоне.

Другой аспект, на который мы бы хотели обратить внимание читателя. ЛеБлон и Майсек (1981, глава 3), показали, что волновое уравнение для зонально распространяющихся планетарных волн дает дисперсионное уравнение вида:

$$\omega = -\frac{(\beta + f/l)}{k}, \quad (5)$$

где  $\beta = \frac{df}{dy} = 2\pi\Omega \frac{\cos\varphi}{R}$ ,  $R$  – радиус Земли,  $l$  определяется из условия  $H_y/H = -l/y$  (глубина уменьшается к северу). Это означает, что в северном полушарии ( $f > 0$ ) волны в шельфовой области с мелеющей к северу водой распространяются с более высокой частотой, чем в случае обычной планетарной волны. В южном полушарии ( $f < 0$ ) мелеющей к северу воды  $\beta$ -эффекту противопоставляется топография. В предельном случае при  $\beta \rightarrow -f/l$  значение  $\omega \rightarrow 0$  и движение сводится к картине стационарных течений. Оценки  $(f/l)$  при ширине шельфа 150–300 км:  $1.2 \times 10^{-11} < -f/l < 2.5 \times 10^{-11}$  перекрываются с

диапазоном изменения параметра  $\beta$  для рассматриваемых широт:  $2.0 \times 10^{-11} < \beta < 2.1 \times 10^{-11}$ . Это означает, что шельфовые волны этого региона могут быть либо очень больших периодов, либо очень больших длин (малые волновые числа).

Для получения характеристик волн, распространяющихся на шельфе Большого Австралийского залива, построены 2D-FFT-спектры по альтиметрическим данным вдоль изобат 50, 100 и 200 м, на которые нанесены дисперсионные кривые для шельфовых волн, рассчитанные по формуле (6), являющейся модификацией формулы (5) (ЛеБлон и Майсек, 1981) (рис. 4–6):

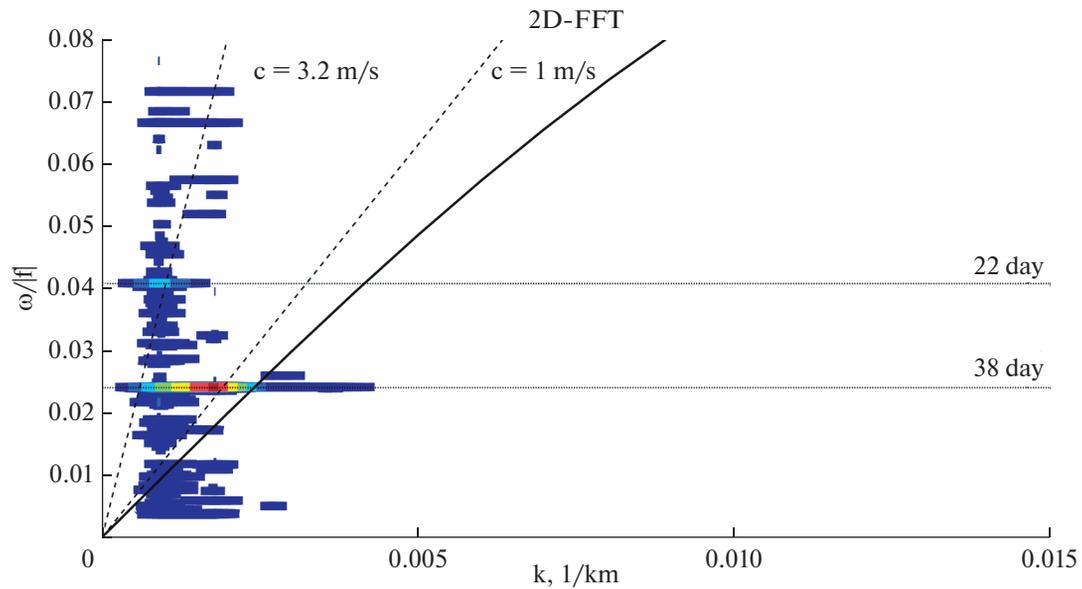
$$\omega = -\frac{(\beta + \frac{f}{l})k}{k^2 + m^2 + \frac{1}{4l^2}}, \quad (6)$$

где  $k$  и  $m$  – зональное и меридиональное волновые числа.

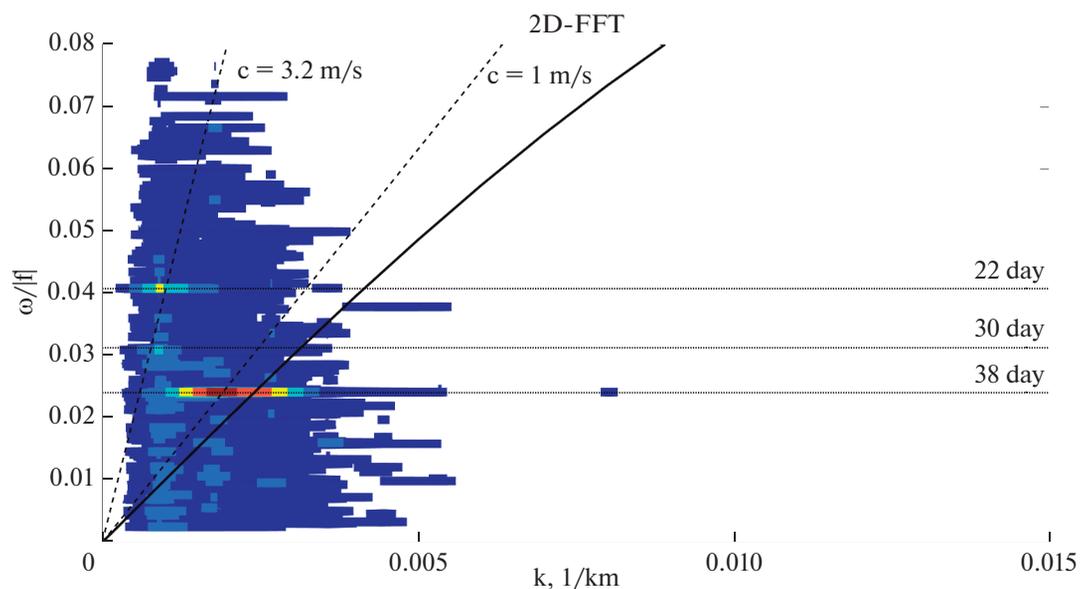
На рис. 4–6 видно, что на графиках двумерных спектров выделяются длинные волны в широком диапазоне волновых чисел: соответствующие длины волн изменяются в диапазоне 1500–2500 км. Выделяются волны периодами с 22, 30, 38 сут. Для периода 22 сут фазовая скорость составляет 3.2 м/с, для периода 30 сут – 2.9 м/с, для периода 38 сут – 1.0 м/с. На рис. 4–6 также видно, что дисперсионные кривые, рассчитанные по формуле (6), пересекают области максимальных значений спектра для волн с периодом 38 сут и фазовой скоростью 1.0 м/с. На графиках спектров также отмечаются максимумы, соответствующие меньшим периодам: 22 и 30 сут и, соответственно, большим фазовым скоростям.

Отметим, что полученные оценки скоростей волн несколько ниже оценок, полученных в работах (Maiwa et al., 2010; Woodham et al., 2013). Это объясняется тем, что в нашем исследовании мы рассматривали контуры, построенные по изобатам для всего южно-австралийского шельфа, в то время как в предшествующих исследованиях скорости волн оценивались для отдельных районов шельфовой зоны.

Для дальнейшего анализа волн определенных периодов мы применили оригинальный метод разложения колебаний уровня на колебания определенного периода в (см. Белоненко и др., 2018). Суть этого метода заключается в следующем. Для каждого из 60 пунктов топографического контура к соответствующим рядам альтиметрических данных мы применили непрерывное вейвлет-преобразование. Мы рассматривали контуры, расположенные вдоль изобат 50, 100 и 200 м, а в качестве базисных функций использовали вейвлеты Морле, которые хорошо себя зарекомендовали для исследования синоптической



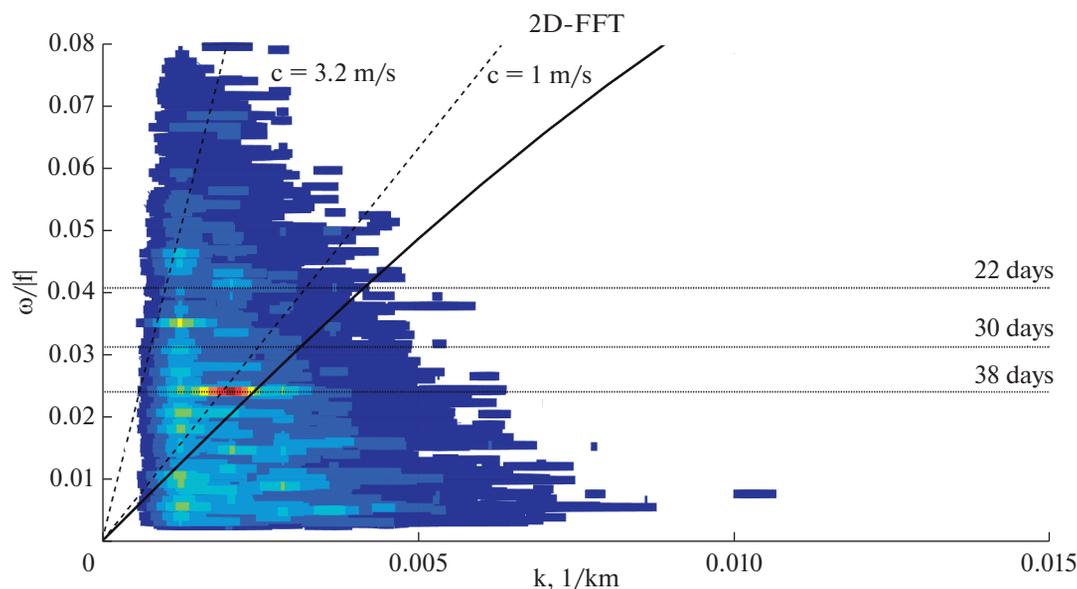
**Рис. 4.** Двухмерный спектр и дисперсионная кривая (сплошная черная линия) для шельфовых волн, соответствующие изобате 50 м. Пунктиром показана скорость волн (м/с), соответствующая максимальному значению спектра. Периоды 22 и 38 сут показаны параллельными прямыми).



**Рис. 5.** Двухмерный спектр и дисперсионная кривая (сплошная черная линия) для шельфовых волн, соответствующие изобате 100 м. Пунктиром показаны скорости волн (м/с), соответствующие максимальным значениям спектра. Периоды 22, 30, 38 сут показаны параллельными прямыми.

изменчивости. Далее, для каждого из исследуемых 180 рядов на вейвлет-диаграммах мы выбрали масштабы, соответствующие периодам 22, 30, 38 сут, и только для этих масштабов составили новые временные ряды, состоящие уже из коэффициентов вейвлет-преобразования, которые отражали изменчивость во времени колебаний конкретного масштаба. На рис. 7, *a* показана вейвлет-

диаграмма колебаний уровня для контура вдоль изобаты 100 м, а на рис. 7, *b* – графики вейвлет-коэффициентов в каждом из 60 пунктов, на которых отчетливее всего видны максимумы на масштабе 38 сут, которые также видны и на графиках двумерных спектров). В дальнейшем к новым рядам мы применяли обратное вейвлет-преобразование. В результате для каждого из рассматриваемых



**Рис. 6.** Двухмерный спектр и дисперсионная кривая (сплошная черная линия) для шельфовых волн, соответствующие изобате 200 м. Пунктиром показаны скорости волн (м/с), соответствующие максимальным значениям спектра. Периоды 22, 30, 38 сут показаны параллельными прямыми.

пунктов мы получили новые временные ряды, отражающие временную изменчивость колебаний уровня моря определенного периода. Подобная процедура была проведена для всех пунктов, расположенных вдоль изобат 50, 100 и 200 м.

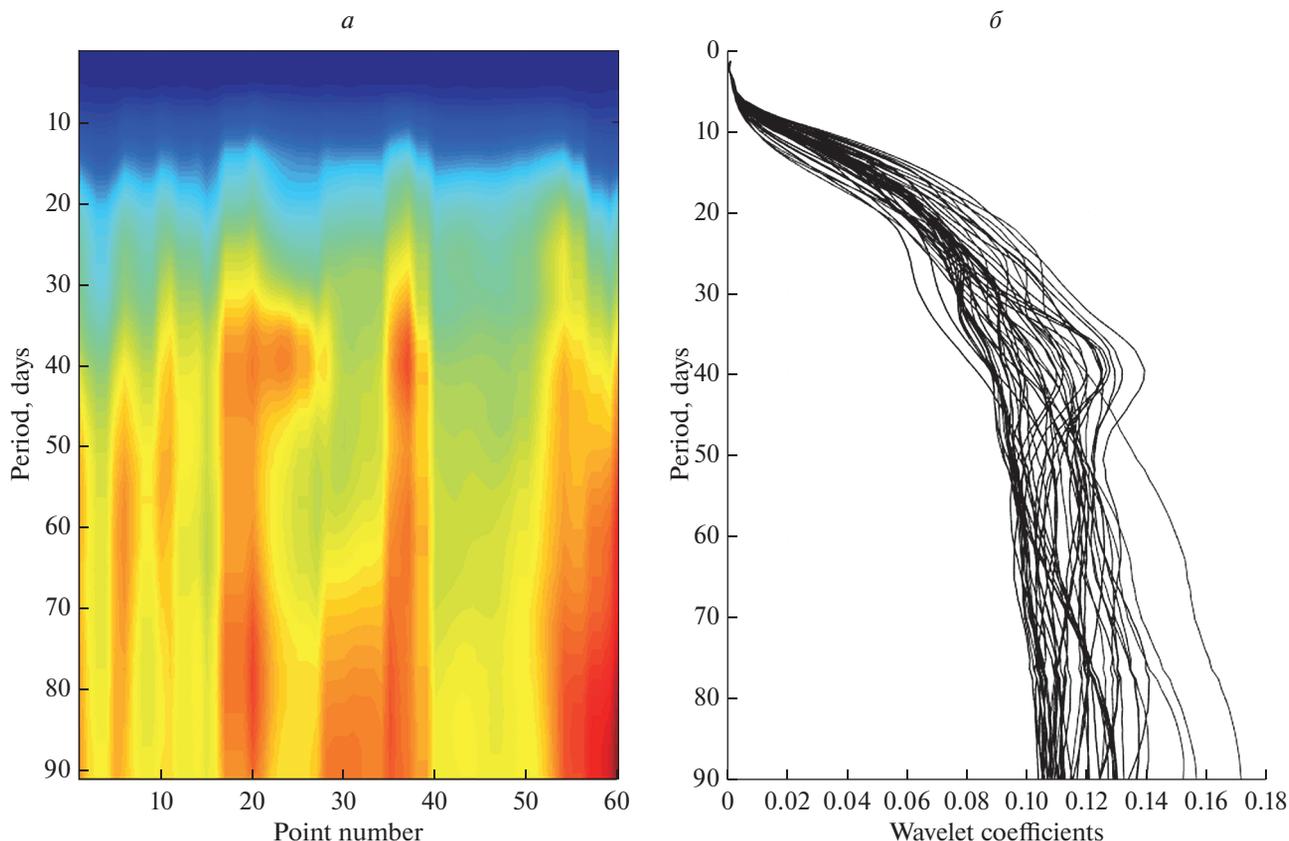
Далее, для исследования пространственной изменчивости колебаний фиксированных периодов 22, 30, 38 сут, полученных обратным вейвлет-преобразованием, мы построили пространственно-временные диаграммы (Hovmöller diagram) для изобаты 100 м (не показаны) и определили, что для большинства пунктов колебания уровня с периодом 38 сут наиболее интенсивны в период март–июль 2014 г. и в 2015 г., начиная с марта и до конца года. Наклон изофаз характеризует направление волн на восток, при этом их скорости не являются постоянными на всех участках контура. Увеличенные значения скоростей зафиксированы, в особенности, в восточной части акватории и, возможно, связаны с изменчивостью фонового течения, которое, несомненно, взаимодействует с наблюдаемыми по альтиметрии волнами (Белоненко, Фролова, 2018).

Основным элементом циркуляции Большого Австралийского залива является течение Льювина (Leeuwin Current). Оно протекает вдоль западного побережья Австралии, огибая одноименный мыс и распространяет свое влияние вплоть до берегов Тасмании. Течение Льювина обладает ярко выраженной сезонной изменчивостью, при этом максимальная интенсивность потока приходится на период май–июль, минимальная — на январь (Ridgway, Godfrey, 2015; Furue et al., 2017). Не-

смотря на то, что из исходных данных, которые анализировались в нашей работе, удалялась сезонная и межгодовая изменчивость, полностью исключить эффекты, связанные с течением Льювина, удалить и нельзя. Возможное влияние течения Льювина могло сказаться на изменчивости волн синоптического диапазона, в частности, в восточной его части, где отмечается максимальное его меандрирование (Ridgway, Godfrey, 2015; Furue et al., 2017). Кроме того, течение Льювина может служить волноводом низкочастотных волн (Белоненко, Фролова, 2018). Указанные эффекты могут также быть обусловлены нелинейным взаимодействием, которое в длинноволновом приближении в точности компенсирует доплеровский сдвиг (Гневнышев и др., 2019).

В качестве критики отметим, что, по нашему мнению, меридиональные профили амплитуд изменения уровня в акватории Большого Австралийского залива, предложенные в работе De-Leon, Paldor (2017) и полученные в рамках негармонической теории, не отражают реальные физические процессы. Период шельфовых волн 38 дней превышает ширину низкочастотного фильтра окна (5 недель), который использовались авторы при обработке данных. Авторы, рассматривая только амплитуды, вообще исключили из рассмотрения шельфовые волны и не учли изменения направления: на шельфе на восток (шельфовые волны), а южнее, в остальной части акватории — на запад (планетарные волны Россби).

В заключение отметим, что предложенный арсенал методов позволяет на основе альтиметри-



**Рис. 7.** Пространственно-временная диаграмма вейвлет-коэффициентов аномалий уровня моря вдоль топографического контура, соответствующего изобате 100 м на шельфе Большого Австралийского залива (а); зависимость значений вейвлет-коэффициентов от масштабов колебаний уровня для шельфа Большого Австралийского залива (б).

ческих данных получить оценки характеристик шельфовых волн в указанном регионе и исследовать их пространственно-временную изменчивость.

## ВЫВОДЫ

1. Анализ спутниковых альтиметрических данных за период 1993–2018 гг. показал, что в прибрежной области Большого Австралийского залива существуют низкочастотные шельфовые волны, которые распространяются в восточном направлении, оставляя берег слева. Так как в южном полушарии  $\beta$ -эффекту противопоставляется топография шельфа, если его глубина уменьшается в направлении к северу, можно ожидать, что при совпадении определенных параметров наблюдаемые волны могут приобретать черты стационарных течений.

2. Мы показали, что шельфовых волн Большого Австралийского залива очень длинные: по графикам двумерных спектров выделяются волны с периодами 22, 30, 38 сут с длинами, изменяющимися в широком диапазоне от 1500 до 2500 км.

Эмпирические параметры лучше всего соответствуют теоретической дисперсионной кривой для периода 38 сут.

3. Полученные оценки фазовой скорости хорошо согласуются с оценками, рассчитанными по пространственно-временным спектрам. 2D-FFT спектры, построенные для контуров, расположенных на шельфе вдоль изобат 50, 100 и 200 м, выделяют максимумы, соответствующие скоростям шельфовых волн 1.0, 2.9 и 3.2 м/с. Эти оценки в целом неплохо согласуются с оценками, полученными по литературным источникам, где скорости оценивались по отдельным участкам шельфа.

4. Показано, что классическая теория Робинсона (Robinson, 1964), несмотря на ее простоту, работает и позволяет получить оценки скорости баротропных шельфовых волн в Большом Австралийском заливе по данным спутниковой альтиметрии. По этим оценкам фазовая скорость шельфовых волн для средней ширины шельфа 200 км равна 1.8 м/с, а для максимальной ширины шельфа 300 км – 2.7 м/с.

5. Метод максимальной кросс-корреляции (осреднение за период 1993–2018 гг.) отделяет шельфовую область от остальной части акватории. На шельфе Большого Австралийского залива шельфовые волны направлены на восток с осредненными за весь период скоростями 20 см/с. Для остальной части акватории, расположенной южнее шельфа, волны направлены на запад, как планетарные волны Россби, со средними скоростями, достигающими 15 см/с.

6. Метод разложения временных рядов на колебания определенного периода подтвердил результаты анализа двумерных спектров. Установлено, что интенсивность колебаний существенно изменяется во времени и в пространстве. Пространственно-временные диаграммы колебаний уровня с периодами 22, 30, 38 сут вдоль контуров 50, 100 и 200 м фиксируют существенную неоднородность изменения скорости волн как во времени, так и на различных отрезках контура. Для всех трех контуров отмечается увеличение скорости волн в восточной части Большого Австралийского залива по сравнению с другими частями шельфа.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-05-00066).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоненко Т.В., Захарчук Е.А., Фукс В.П. Градиентно-вихревые волны в океане. СПб: Изд-во С.-Петербургского университета, 2004. 215 с.
- Белоненко Т.В., Волков Д.Л., Колдунов А.В. Шельфовые волны в море Бофорта по данным гидродинамической модели MITgcm // *Океанология*. 2018. Т. 58. С. 854–863. <https://doi.org/10.1134/S0030157418060023>
- Белоненко Т.В., Фролова А.В. Антарктическое циркумполярное течение как волновод для волн Россби и мезомасштабных вихрей // *Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 1. С. 181–190. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-181-190>
- Гилл А. Динамика атмосферы и океана. Том 1, 2. М.: Мир, 1986.
- Гневыхов В.Г., Фролова А.В., Кубряков А.А., Собко Ю.В., Белоненко Т.В. Взаимодействие волн Россби со струйным потоком: основные уравнения и их верификация для Антарктического циркумполярного течения // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55. № 5. С. 39–50.
- Ефимов В.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В. Волны в пограничных областях океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1985.
- ЛеБлон П., Майсек Л. Волны в океане. Т. 1, 2. М.: Мир, 1981.
- Chelton D.B., De Szoeke R.A., Schlax M.G., El Naggar K., Siwertz N. Geographical variability of the first-baroclinic Rossby radius of deformation // *J. Phys. Oceanogr.* 1998. V. 28. P. 433–460.
- Church A.J., Freeland H.J., Smith R.L. Coastal trapped waves on the east Australian continental shelf Part I: Propagation of modes // *J. Phys. Oceanogr.* 1986a. V. 16. P. 1929–1943.
- Church A.J., White N.J., Clarke A.J., Freeland H.J., Smith R.L. Coastal-trapped waves on the east Australian continental shelf Part II: Modal verification // *J. Phys. Oceanogr.* 1986b. V. 16. P. 1945–1957.
- Clarke A.J. Origin of the Coastally Trapped Waves Observed during the Australian Coastal Experiment // *J. Physical Oceanography*. 1987. V. 17. P. 1847–1859. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1987\)017<1847:ootctw>](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1987)017<1847:ootctw>)
- Cleveland R.B., Cleveland W.S., McRae J.E., Terpenning I.J. STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess // *J. Official Statistics*. 1990. V. 6. № 1. P. 3–33.
- De-Leon Y., Paldor N. Trapped planetary (Rossby) waves observed in the Indian Ocean by satellite borne altimeters // *Ocean Sci.* 2017. V.13 P. 483–494. <https://doi.org/10.5194/os-13-483-2017>
- Freeland H.J., Boland F.M., Church J.A., Clarke A., Forbes A.M.G., Huyer A., Smith R.L., Thompson R.O.R.Y., White N.J. The Australian Coastal Experiment: A search for coastal-trapped waves // *J. Phys. Oceanogr.* 1986. V. 16. P. 1230–1249. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1986\)016<1230:TA-CEAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1986)016<1230:TA-CEAS>2.0.CO;2)
- Fu L.-L. Pattern and velocity of propagation of the global ocean eddy variability // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № C11017. <https://doi.org/10.1029/2009JC005349>
- Furue R., Guerreiro K., Phillips H.E., Mc Creary J.P., Bindoff N.L. On the Leeuwin Current System and Its Linkage to Zonal Flows in the South Indian Ocean as Inferred from a Gridded Hydrography. *J. Phys. Oceanogr.* 2017. V. 47. P. 583–602. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0170.1>
- Gill A.E., Clarke A.J. Wind-induced upwelling, coastal currents and sea-level changes // *Deep-Sea Res.* 1974. V. 21. P. 325–345.
- Hamon B.V. Continental shelf waves and the effects of atmospheric pressure and wind stress on sea level // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. P. 2883–2893.
- Hamon B.V., Hannan E.J. Estimating relations between time series // *J. Geophys. Res.* 1963. V. 68. P. 6033–6041.
- Holland D.M., Webster I.T. The effects of stratification and alongshore currents on the propagation of coastal-trapped waves // *Continental Shelf Research*. 1994. V. 14. P. 57–77. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0278-4343(94)90005-1)
- Kajiura K. Effect of stratification on long period trapped waves on the shelf // *J. Oceanogr. Soc. Japan*. 1974. V. 30. P. 271–281.
- Liao F., Wang X.H. A Study of Low-Frequency, Wind-Driven, Coastal-Trapped Waves along the Southeast Coast of Australia // *J. Phys. Oceanogr.* 2018. V. 48. P. 301–316. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0046.1>
- Maiwa, K., Masumoto Y., Yamagata T. Characteristics of coastal trapped waves along the southern and eastern coasts of Australia // *J. Oceanogr.* 2010. V. 66. P. 243–258. <https://doi.org/10.1007/s10872-010-0022-z>

- Merrifield A.M., Middleton J.H.* The influence of strongly varying topography on coastal-trapped waves at the southern Great Barrier Reef // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 10193–10205.
- Pujol M.-I., Faugère Y., Taburet G., Dupuy S., Pelloquin C., Ablain M., Picot N.* DUACS DT2014: The new multi-mission altimeter dataset reprocessed over 20 years // *Ocean Science*. 2016. V. 12. P. 1067–1090. <https://doi.org/10.5194/os-12-1067-2016>
- Ridgway K.R., Godfrey J.S.* The source of the Leeuwin Current seasonality // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2015. V. 120. P. 6843–6864. <https://doi.org/10.1002/2015JC011049>
- Robinson A.R.* Continental shelf waves and response of sea level to weather systems // *J. Geophys. Res.* 1964. V. 69. P. 367–368.
- Volkov D.L., Belonenko T.V., Foux V.R.* Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin – a sub-Arctic hot spot of ocean variability // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 738–743. <https://doi.org/10.1002/grl.50126>
- Wang D.-P., Mooers C.N.K.* Coastal-trapped waves in a continuously stratified ocean // *J. Phys. Oceanogr.* V. 6. P. 853–863.
- Weijer W.* An almost-free barotropic mode in the Australian-Antarctic Basin // *Geophys. Res. Lett.* V. 37. № L10602. <https://doi.org/10.1029/2010GL042657>
- Woodham R., Brassington G.B., Robertson R., Alves O.* Propagation characteristics of coastally trapped waves on the Australian continental shelf // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2013. V. 118. P. 4461–4473. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20317>

## Shelf Waves in the Great Australian Bight Based on Altimetry Data

N. V. Sandalyuk<sup>1</sup>, T. V. Belonenko<sup>1</sup>, and A. V. Koldunov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

In this study, we analyze shelf waves in the Great Australian Bight based on the satellite altimetry data. The results reveal that first-mode phase speed of the shelf waves is 1,8 m/s for the average shelf width of 200 km and 2.7 m/s for the maximum shelf width of 300 km. Obtained estimates of the phase speeds are in good agreement with estimates from the two-dimensional Fourier transform analysis (2DFTT). From the 2DFTT spectrum, we identify waves with periods of 22, 30, 38 days. The wavelength of the shelf waves varies widely from 1500 km to 2500 km. Theoretical dispersion curves are consistent with the empirical parameters of shelf waves for a period of 38 days. Based on the results of the space-time lagged correlation analysis we can divide the area of the Great Australian Bight into two regions. For the waves in the shelf region, the propagation direction is eastward with an average speed of 0.2 m/s (the averaging period is 26 years), for the rest of the study area, the Rossby waves propagate westward with a maximum speed of 0.15 m/s. The results of the inverse continuous wavelet transform are in good accordance with the results of the 2DFTT analysis. The intensity of oscillations significantly varies in time and space. The Hovmöller diagrams for the wave periods of 22, 30, 38 days along the 50, 100 and 200 m contours show significant variability of the phase speed of waves in time and on the different parts of the contours. There is an increase of the wave phase speed in the eastern part of the Great Australian Bight which observed for all three contours compared with the other areas of the shelf.

*Keywords:* altimetry, sea level anomalies, shelf waves, Great Australian Bight, Australian shelf

### REFERENCES

- Belonenko T.V., Zakharchuk E.A., Fuks V.R.* Gradientno-vihrevye volny v okeane [Gradient-Vorticity Waves in the Ocean]. SPb: Izd-vo S.-Peterburgskogo universiteta. 2004. 215 p. (In Russian).
- Belonenko T.V., Volkov D.L., Koldunov A.V.* Shelf Waves in the Beaufort Sea in a High-Resolution Ocean Model [Shel'fovye volny v more Boforta po dannym gidrodinamicheskoy modeli MITgcm] // *Oceanology*. 2018. V. 58. № 6. P. 778–785. DOI: 10.1134/S0001437018060024 (In Russian).
- Belonenko T.V., Frolova A.V.* Antarkticheskoe cirkumpolyarnoe techenie kak volnovod dlya voln Rossbi i mezomasshtabnykh vihrej [Antarctic Circumpolar Current as a waveguide for Rossby waves and mesoscale eddies] // *Sovrem. probl. dist. zond. Zemli kosmosa*. 2019. V. 16. № 1. P. 181–190 (In Russian).
- Gill A.* Dinamika atmosfery i okeana [Atmosphere-Ocean Dynamics]. Tom 1, 2. M.: Mir, 1986. (In Russian).
- Gnevyshev V.G., Frolova A.V., Kubryakov A.A., Sobko Y.V., Belonenko T.V.* Vzaimodejstvie voln Rossbi so strujnym potokom: osnovnye uravneniya i ih verifikaciya dlya Antarkticheskogo cirkumpolyarnogo techeniya [Interaction between Rossby waves and jet flow: basic equations and verification for the Antarctic Circumpolar Current] // *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*. 2019. V. 55. № 5. P. 39–50 (In Russian).
- Efimov V.V., Kulikov E.A., Rabinovich A.B., Fajn I.V.* Volny v pogranichnykh oblastyah okeana (Waves in the border zones of the World Ocean) // L.: Gidrometeoizdat, 1985.
- LeBlon P., Maiseck L.* Volny' v okeane [Waves in the Ocean]. T. 1, 2. M.: Mir, 1981. (In Russian).
- Chelton D.B., De Szoeke R.A., Schlax M.G., El Naggar K., Siwertz N.* Geographical variability of the first-baroclinic Rossby radius of deformation // *J. Phys. Oceanogr.* 1998. V. 28. P. 433–460.
- Church A.J., Freeland H.J., Smith R.L.* Coastal trapped waves on the east Australian continental shelf Part I: Propagation

- gation of modes // *J. Phys. Oceanogr.* 1986a. V. 16. P. 1929–1943.
- Church A.J., White N.J., Clarke A.J., Freeland H.J., Smith R.L.* Coastal-trapped waves on the east Australian continental shelf Part II: Modal verification // *J. Phys. Oceanogr.* 1986b. V. 16. P. 1945–1957.
- Clarke A. J.* Origin of the Coastally Trapped Waves Observed during the Australian Coastal Experiment // *J. Phys. Oceanogr.* 1987. V. 17. P. 1847–1859. DOI: 10.1175/1520-0485(1987)017<1847:ootctw>
- Cleveland R.B., Cleveland W.S., McRae J.E., Terpenning I.J.* STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess // *J. Official Statistics.* 1990. V. 6. № 1. P. 3–33.
- De-Leon Y., Paldor N.* Trapped planetary (Rossby) waves observed in the Indian Ocean by satellite borne altimeters // *Ocean Sci.* 2017. V. 13 P. 483–494. <https://doi.org/10.5194/os-13-483-2017>
- Freeland H.J., Boland F.M., Church J.A., Clarke A.J., Forbes A.M.G., Huyer A., Smith R.L., Thompson R.O.R.Y., White N.J.* The Australian Coastal Experiment: A search for coastal-trapped waves // *J. Phys. Oceanogr.* 1986. V. 16. P. 1230–1249. DOI: 10.1175/1520-0485(1986)016<1230:TA-CEAS>2.0.CO;2
- Fu L.-L.* Pattern and velocity of propagation of the global ocean eddy variability // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № C11017. DOI: 10.1029/2009JC005349
- Furue R., Guerreiro K., Phillips H.E., Mc Creary J.P., Bindoff N.L.* On the Leeuwin Current System and Its Linkage to Zonal Flows in the South Indian Ocean as Inferred from a Gridded Hydrography. *J. Phys. Oceanogr.* 2017. V. 47. P. 583–602. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0170.1>
- Gill A.E., Clarke A.J.* Wind-induced upwelling, coastal currents and sea-level changes // *Deep-Sea Res.* 1974. V. 21. P. 325–345.
- Hamon B.V.* Continental shelf waves and the effects of atmospheric pressure and wind stress on sea level // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. P. 2883–2893.
- Hamon B.V., Hannan E.J.* Estimating relations between time series // *J. Geophys. Res.* 1963. V. 68. P. 6033–6041.
- Holland D.M., Webster I.T.* The effects of stratification and alongshore currents on the propagation of coastal-trapped waves // *Continental Shelf Research.* 1994. V. 14. P. 57–77. DOI: 10.1016/0278-4343(94)90005-1
- Kajiura K.* Effect of stratification on long period trapped waves on the shelf // *J. Oceanogr. Soc. Japan.* 1974. V. 30. P. 271–281.
- Liao F., Wang X.H.* A Study of Low-Frequency, Wind-Driven, Coastal-Trapped Waves along the Southeast Coast of Australia // *J. Phys. Oceanogr.* 2018. V. 48. P. 301–316. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0046.1>
- Maiwa K., Masumoto Y., Yamagata T.* Characteristics of coastal trapped waves along the southern and eastern coasts of Australia // *J. Oceanogr.* 2010. V. 66. P. 243–258. DOI: 10.1007/s10872-010-0022-z
- Merrifield A.M., Middleton J.H.* The influence of strongly varying topography on coastal-trapped waves at the southern Great Barrier Reef // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 10193–10205.
- Pujol M.-I., Faugère Y., Taburet G., Dupuy S., Pelloquin C., Ablain M., Picot N.* DUACS DT2014: The new multi-mission altimeter dataset reprocessed over 20 years // *Ocean Science.* 2016. V. 12. P. 1067–1090. DOI: 10.5194/os-12-1067-2016
- Ridgway K.R., Godfrey J.S.* The source of the Leeuwin Current seasonality // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2015. V. 120. P. 6843–6864. DOI: 10.1002/2015JC011049
- Robinson A.R.* Continental shelf waves and response of sea level to weather systems // *J. Geophys. Res.* 1964. V. 69. P. 367–368.
- Volkov D.L., Belonenko T.V., Foux V.R.* Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin - a sub-Arctic hot spot of ocean variability // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 738–743. DOI: 10.1002/grl.50126
- Wang D.-P., Mooers C.N.K.* Coastal-trapped waves in a continuously stratified ocean // *J. Phys. Oceanogr.* V. 6. P. 853–863.
- Weijer W.* An almost-free barotropic mode in the Australian-Antarctic Basin // *Geophys. Res. Lett.* V. 37. № L10602. DOI: 10.1029/2010GL042657
- Woodham R., Brassington G.B., Robertson R., Alves O.* Propagation characteristics of coastally trapped waves on the Australian continental shelf // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2013. V. 118. P. 4461–4473. [doi.org/10.1002/jgrc.20317](https://doi.org/10.1002/jgrc.20317)