© Е.Е. Химченко, А.Н. Серебряный, 2018, Океанологические исследования, 2018, Том 46, № 2, С. 69–87

УДК 534.222.2; 551.463.2 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).7

ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ НА КАВКАЗСКОМ И КРЫМСКОМ ШЕЛЬФАХ ЧЕРНОГО МОРЯ (ПО ЛЕТНЕ-ОСЕННИМ НАБЛЮДЕНИЯМ 2011–2016 гг.)

Е.Е. Химченко[1], А.Н. Серебряный[1,2]

[1] Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Россия
e-mail: ekhym@ocean.ru
[2] АО «Акустический институт им. акад. Н.Н.Андреева», 117036, Москва, Россия
e-mail: serebryany@hotmail.com

Статья поступила в редакцию 01.06.2018, одобрена к печати 18.06.2018

Анализируются и обобщаются результаты наблюдений за внутренними волнами на крымском и кавказском шельфах Черного моря, проведенных в период с 2011 по 2016 гг. Измерения велись на заякоренных станциях, оснащенных цепочками автономных датчиков температуры, а также при помощи вертикального профилирования водной толщи зондом miniSVP и доплеровским акустическим профилометром течений (ADCP). Проводится сравнение наблюдаемых внутренних волн для трех типов шельфа – полого (геленджикский шельф), приглубого (шельф ЮБК) и с резким свалом глубин (абхазский шельф). Наблюдения в течение нескольких летних сезонов в период 2011–2016 гг. на шельфе Черного моря подтверждают почти постоянное присутствие внутренних квазиинерционных колебаний термоклина, достаточно часто регистрируются короткопериодные внутренние волны с периодами от единиц до десятков минут. На черноморском шельфе преобладают внутренние волны низшей моды, но встречаются также волны 2-ой моды. На шельфе с резким свалом глубин отмечается наличие внутренних волн максимальных высот. Представлены примеры зарегистрированных инерционных и короткопериодных внутренних волн. Приводятся частотные спектры внутренних волн, а также статистика встречаемости и оценка перемежаемости инерционных и короткопериодных внутренних волн для трех районов шельфа.

Ключевые слова: инерционные внутренние волны, короткопериодные внутренние волны, внутренние волны 2-ой моды, Черное море, шельф Крыма и Кавказа

Введение

Внутренние волны широко распространены в Мировом океане, в шельфовой зоне наиболее часто основным механизмом их генерации является взаимодействие приливных течений (баротропного прилива) с неоднородностями рельефа дна, при этом возникают внутренние приливные волны высотами в несколько десятков, а в отдельных случаях и сотен метров (Морозов, 1985; Morozov, 2018). Другими интенсивными видами мезомасштабной изменчивости в океане являются инерционные движения, период которых изменяется в зависимости от географической широты места. Инерционные движения достаточно хорошо идентифицируются на частотных спектрах внутренних волн как четкий пик близкий к локальной инерционной частоте и являются наиболее энергетической частью спектра внутренних волн (Коняев, Сабинин, 1982). Черное море, будучи замкнутым бассейном, не имеет значимых приливов, что позволяет наблюдать механизмы генерации внутренних волн, отличные от приливного (Серебряный, Иванов, 2013). Следует заметить, что

в среднем приливы в Черном море составляют порядка нескольких сантиметров (Медведев, Архипкин, 2016). Однако до сих пор не сообщалось об отмеченных в наблюдениях в Черном море как самих приливных внутренних волн, так и короткопериодных, появляющихся с приливной периодичностью. В работах (Иванов, Серебряный, 1982; Серебряный, 1985) путем сравнения спектров внутренних волн Черного моря с модельным спектром Гарретта-Манка, было показано, что внутренние волны здесь менее интенсивны, чем их аналоги в океане или приливных морях. Тем не менее, внутренние волны в Черном море широко распространены и оказывают значительное влияние на динамику вод моря. Исследования внутренних волн на шельфе Черного моря проводятся более 50-ти лет. Вкратце упомянем полученные за это время наиболее значимые результаты. Первые наблюдения инерционных внутренних волн на шельфе Черного моря были опубликованы в (Ямпольский, 1960). В этой статье проанализированы данные, полученные на многосуточной якорной станции летом 1956 г на шельфе Абхазии. Первые измерения внутренних волн заякоренными термисторными цепочкам, проведенными на геленджикском шельфе, а также измереные частотные спектры представлены в работе (Иванов и др., 1969). Первые наблюдения внутренних волн распределенными датчиками температуры, а также выделение цугового характера волн были описаны в (Коняев, Сабинин, 1973). Доказательное сопоставление измеренных частотных спектров со спектром Гарретта-Манка, показавшее на относительно малый уровень энергии внутреннних волн Черного моря, было дано в работе (Иванов, Серебряный, 1982). Первые измерения пространственных спектров внутренних волн, обнаружение генерации внутренних волн проходящей интрузией распресненных вод приводится в (Иванов, Серебряный, 1983). Наблюдение механизмов генерации интенсивных солитоноподобных волн, подходящими в прибрежную зону внутренними инерционными волнами и локальными фронтами сгонно-нагонного происхождения, было описано в (Иванов, Серебряный, 1985). Обзор наблюдений внутренних волн с океанографической платформы МГИ за 30 лет приведен в (Серебряный, Иванов, 2013). В настоящее время благодаря внедрению новой океанологической техники появляются возможности более детально исследовать физические явления морской среды. В частности, наличие доплеровских акустических профилометров течений (ADCP), портативных CTD зондов, автономных управляемых аппаратов, а также доступность космических изображений поверхности моря (Лаврова и др. 2013), в том числе повышенного разрешения, позволяет продвинуться в понимании природы внутренних волн и их свойств.

Данная работа является продолжением более ранней статьи (Серебряный, Химченко, 2014), где приводилось первое сравнение наблюдаемых внутренних волн на кавказском и крымском шельфах Черного моря в 2013 г. В настоящей статье мы охватываем более широкий объем материала (наблюдения с 2011 по 2016 гг) и даем обобщение результатов этих наблюдений. Измерения велись в трех районах: на шельфе в окрестностях г. Геленджик, на шельфе Абхазии около г. Сухум и на шельфе ЮБК близ п. Кацивели. В последних двух районах проводились длительные исследования со стационарных платформ – эстакады Гидрофизического института

АН Абхазии (ГИАНА) и платформы Морского Гидрофизического Института РАН (МГИ РАН).

Методика измерений и используемое оборудование

В течение нескольких летних сезонов мы проводили наблюдения за внутренними волнами в шельфовой зоне Черного моря, используя заякоренные вертикальные гирлянды из автономных датчиков температуры DST-centi фирмы «Starr-Oddi». В качестве верхнего датчика гирлянды применялся датчик DST-centi-TD, регистрирующий помимо температуры также и глубину. В отдельных случаях дополнительный датчик давления крепился на нижнем конце гирлянды. Эти типы датчиков широко применяются для исследований внутренних волн на шельфах в различных регионах Мирового Океана. Устанавливалась дискретность измерений 30 с (точность датчиков 0,1°С, постоянная времени 20 с, погрешность измерения глубины 0,6%). В работе анализировались внутренние волны с наблюдаемой высотой не менее 0,5 м, при этом значения флуктуации температуры составляли не менее 0,5°С. Термогирлянды, установленные с платформ, крепились к ним, а также с помощью груза на дне (мертвого якоря), что исключало их выведение течением из вертикального положения. Термогирлянды, установленные на геленджикском и абхазском шельфах, в своих верхних горизонтах имели датчики температуры и глубины, что позволяло при обработке прослеживать за их заглублением и исключать периоды, когда имело место сильное отклонение гирлянды от вертикали. В анализируемых в данной статье реализациях смещения датчика глубины по вертикали были незначительными и не превышали 10 см. Продолжительность работы термогирлянд варьировалась от недели до нескольких месяцев. Также проводились измерения со стационарных оснований, где велись наблюдения за изменчивостью вертикальных профилей температуры и скорости звука путем долговременных ежечасных зондирований зондом miniSVP. Велись длительные измерения течений установленным на неподвижном основании ADCP «Rio Grande 600 kHz». Кроме того велись исследования течений и внутренних волн с малого судна, оснащенного ADCP, на пространственных разрезах в пределах шельфов всех трех вышеуказанных районов Черного моря. Работа на стационарных платформах позволяет проводить измерения непрерывно в фиксированной точке акватории вне зависимости от погодных условий. Все эксперименты были выполнены по единой методике, что позволяет сопоставлять данные, полученные в различных точках наблюдений.

Морская платформа МГИ РАН расположена на шельфе Черного моря у п. Кацивели Южного берега Крыма. Платформа находится на расстоянии 600 м от берега, где глубина моря составляет 29 м. В работе представлен материал, полученный в результате наблюдений в летние сезоны 2011, 2013 и 2014 гг.

Эстакада ГИАНА расположена у м. Сухумский (г. Сухум, Абхазия) на юго-восточном шельфе Черного моря и соединена с берегом. Глубина в районе наблюдений составляет 13 м. Измерения на шельфе Абхазии проводились в летне-осенние сезоны 2013–2016 гг. В отдельные годы на абхазском шельфе также устанавливались системы из нескольких (2–3) заякоренных цепочек мористее платформы.

На северо-восточном шельфе наблюдения велись на базе ЮО ИОРАН вблизи г. Геленджик и залива Голубая бухта в мае – июне 2013 г. На геленджикском шельфе устанавливалась заякоренная станция с цепочкой термисторов на глубине 35 м.

В наблюдаемых районах исследований морфологические особенности шельфа принадлежат разным типам геоморфологического районирования (Гончаров и др., 1972). Так, шельф ЮБК принадлежит Центральному Крымскому типу, геленджикский шельф относится к Западно-Кавказскому типу, а шельфовая зона Сухума принадлежит Восточно-Кавказскому типу. На рис. 1 представлены профили рельефа дна для каждого района наблюдений, а также типичные вертикальные профили температуры. Шельф Черного моря в районе Геленджика является преимущественно неглубоким, в месте работ увеличение глубины моря по мере отдаления от берега происходит постепенно, шельф пологий. Крымский шельф характеризуется относительно небольшим наклоном дна, составляющим всего несколько минут. Переход шельфа к материковому склону происходит постепенно. Однако, в районе платформы МГИ РАН отмечается несколько более резкое увеличение глубин, поэтому шельф этого района можно характеризовать как приглубый.

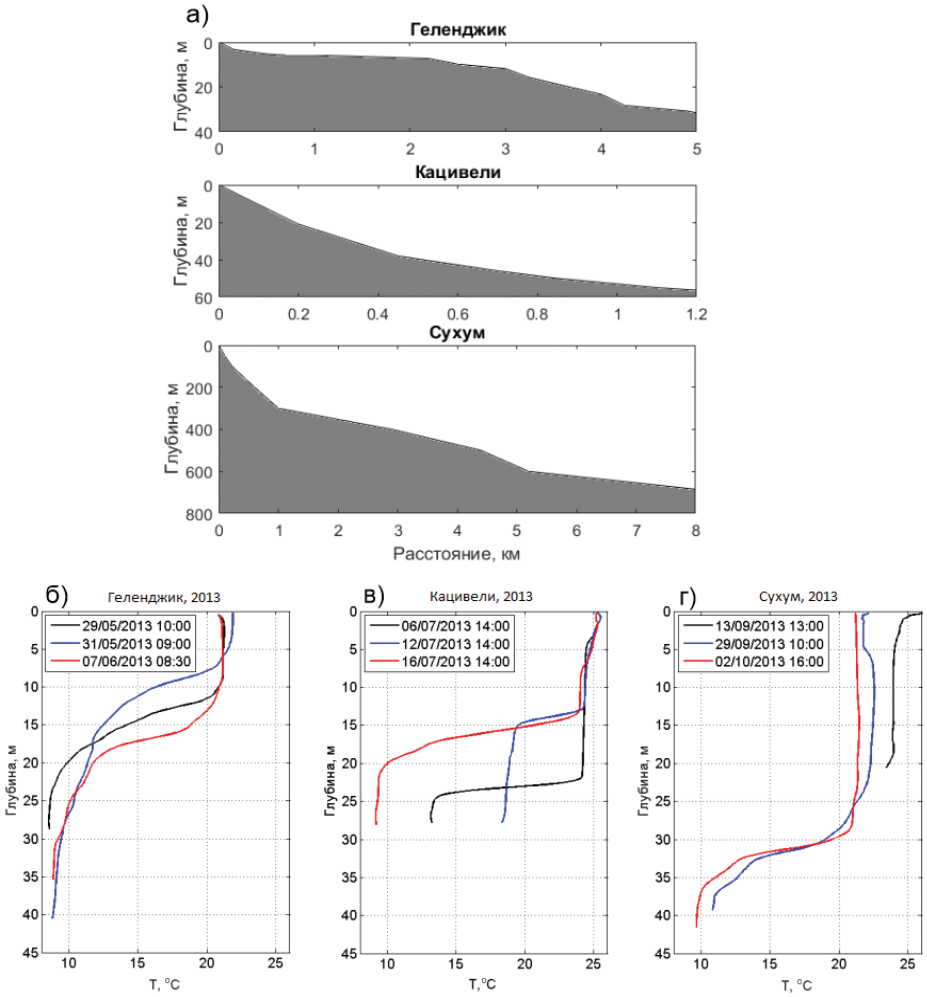

Рис. 1. Профили рельефа дна в районах исследований (1а). Вертикальные профили температуры для Геленджика (1б) Кацивели (1в) и Сухума (1г), выполненные по данным зондирований в 2013 г.

Шельф у берегов Сухума узкий и крутой с резким свалом глубин, глубины около 100 м наблюдаются там на удалении всего нескольких сотен метров.

Наблюдения квазиинерционных внутренних волн

В исследуемых районах локальный инерционный период изменяется в пределах 17,1–17,6 ч (см. табл. 1). В каждом районе наблюдений были зарегистрированы квазиинерционные внутренние волны с периодом близким к локальному инерционному.

Таблица 1. Периоды инерционных колебаний для районов наблюдений

Место наблюдений	Широта (с. ш.)	Локальный инерционный период, ч	Наблюдаемый период на частотном спектре, ч
Платформа МГИ РАН	44,39	17,15	17,07
Эстакада ГИАНА	42,98	17,60	18,21
Заякоренная станция на геленджикском шельфе	44,57	17,10	15,17

Квазиинерционные внутренние волны на геленджикском шельфе (пологий шельф)

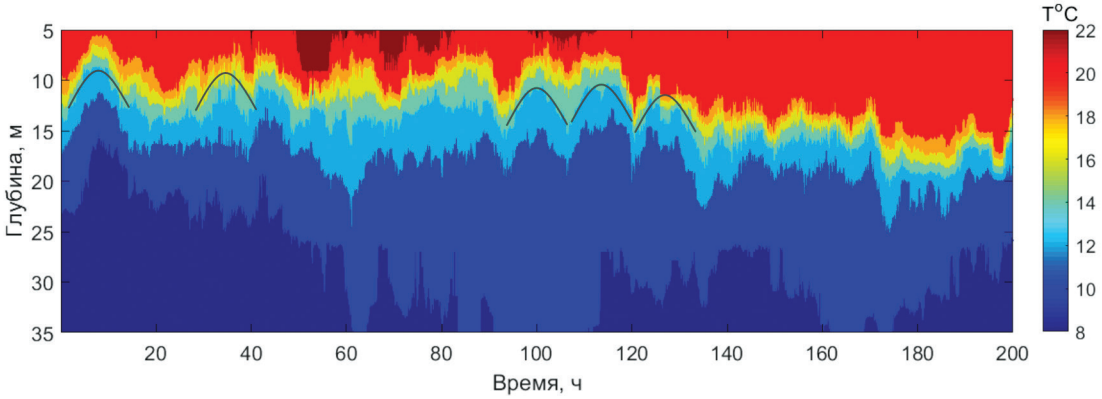

Рис. 2. Временная изменчивость температурной структуры моря на геленджикском шельфе с 29 мая (11:00) по 7 июня (9:00) 2013 г. Видны 17-часовые колебания термоклина, обусловленные инерционными волнами (выделены тонкими линиями)

На рис. 2 представлена запись изменчивости температурной структуры водной толщи по данным термисторной цепочки на геленджикском шельфе с 29 мая по 7 июня 2013 г. Отмечаются значительные колебания термоклина по глубине с максимальным размахом до 8 м. В начале измерений среднее положение термоклина находилось на горизонте 7 м, затем оно постепенно заглубилось и к концу наблюдений оказалось на глубине 15 м. В первой половине наблюдений просматриваются почти регулярные колебания с периодом близким к 17 часам, вызванные проходящими по шельфу квазиинерционными внутренними волнами с высотами 5–6 м.

Квазиинерционные внутренние волны на крымском шельфе (приглубый шельф)

В данном районе квазиинерционные внутренние волны с периодом близким к локальному инерционному присутствуют почти постоянно. Высоты наблюдаемых

волн варьируют от 5 до 10 м, иногда достигая 15 м. В качестве примера представлена временная развертка изменений температуры и вертикальные профили температуры при прохождении внутренних волн 11–12 июля 2011 г. (рис. 3 а, б).

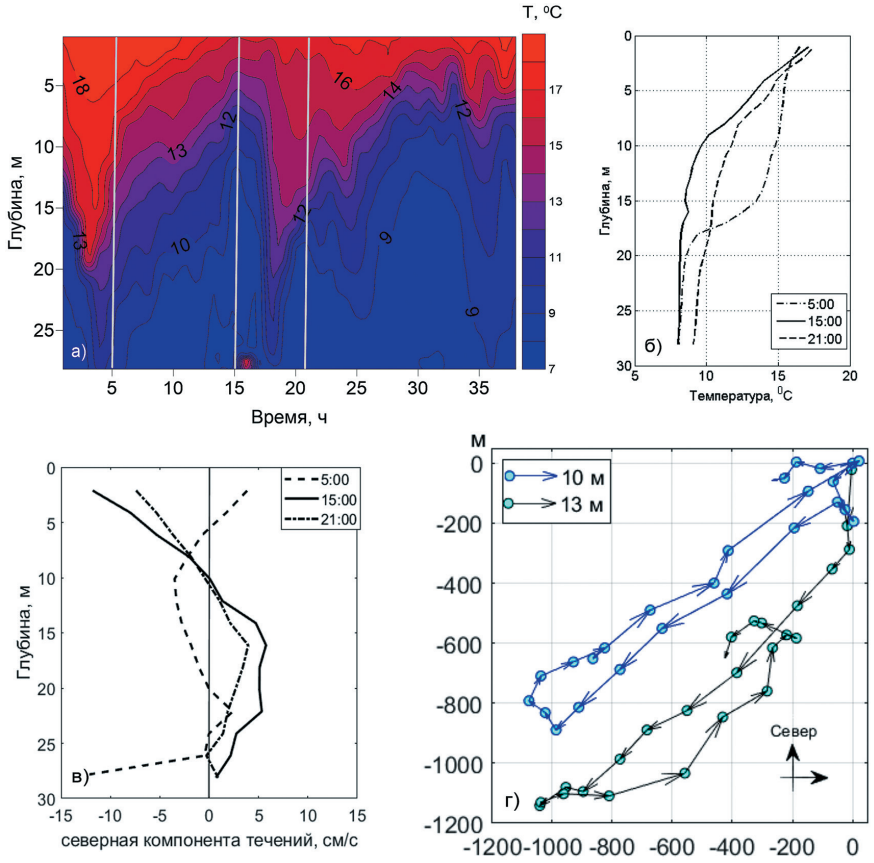

Рис. 3. Проявление внутренних волн инерционного периода 1-ой моды 11–12 июля 2011 г. Дополнительно представлены профили температуры (б), и северной компоненты скорости течений (в), выполненные в конкретные часы (отмечены вертикальными линиями на разрезе), а также прогрессивная векторная диаграмма течений (г) по измерениям ADCP за период с 00:00 ч по 21:00 ч 11 июля 2011 (показана для горизонтов 10 м и 13 м). Кружки отмечают часы, начало диаграммы в точке (0,0). По осям отложены смещения в м.

Дополнительно изображены вертикальные профили меридиональной (северной) компоненты скорости течения и прогрессивная векторная диаграмма течений за период прохождения волны (рис. 3 в, г). На записи с 2 ч 11 июля произошел резкий подъем термоклина, а после 17 ч заглубление, при этом значения температуры на горизонтах изменились в пределах 5–7°С. Подобные синхронные смещения термоклина по всей толще моря были вызваны прохождением инерционных внутренних волн 1-ой моды. На вертикальных профилях скорости течения видно, что во время прохождения внутренней волны в области слоя скачка температуры происходит смена направления течения на противоположное, что характерно для внутренних волн. На рис. 3 г показана прогрессивная векторная диаграмма течений на горизонтах 10 м и 13 м. Видно, что на горизонте 10 м за инерционный период происходит поворот по часовой стрелке, а всего через 3 м на горизонте 13 м вектор

течений снова совершает оборот против часовой стрелки, что аномально для инерционных внутренних волн, наблюдаемых в северном полушарии. Такое нетипичное поведение эллипсов инерционных течений заслуживает дополнительного внимания. Оно уже отмечалось ранее в наблюдениях на шельфе океана (Бондур и др., 2013), а также на геленджикском шельфе Черного моря (Бондур и др., 2017). В работе (Бондур и др., 2017) также отмечается смена знака вращения по глубине, которую авторы связывают с резкой временнóй изменчивостью градиентов течений вокруг измерителя. Такое нехарактерное поведение эллипсов инерционных течений объясняется суперпозицией инерционных колебаний и фонового сдвигового течения, что вместе с близостью берега привносит дополнительное искажение. Данная гипотеза была недавно проверена и подтверждена аналитически в работе (Сабинин, Коротаев, 2017), где рассматривалось взаимодействие инерционных колебаний и однородного течения однородной жидкости, скорость которой изменяется линейно. Также было найдено решение взаимодействия инерционных движений с фоновым течением одного направления и произвольным профилем скорости (Коротаев, Сабинин, 2017). Кроме того, полученное в этих работах решение показывает существование разнообразных форм годографов инерционных колебаний (от овала до полумесяца), а также дает объяснение существования аномального вращения этих годографов (Коротаев, 2018).

В последние годы активно обсуждается информация о наблюдении внутренних волн 2-ой моды в океане (Konyaev et al 1995; Yang et al, 2009; Shroyer et al, 2010; Serebryany, 2018). Большинство наблюдаемых случаев относятся к внутренним солитоноподобным волнам, происхождение которых связано с трансформацией баротропного прилива на неровном дне. В работе (Mayer, 1981) представлены данные о наблюдении внутренних инерционных волн 2-ой моды после прохождения урагана. Ряд работ посвящен наблюдениям внутренних волн 2-ой моды в лабораторных экспериментах (например, Carr et al, 2015; Deepwell et al, 2017), а также по результатам численного моделирования (например, Yang et al, 2010; Yuan et al, 2018).

Появление внутренних волн 2-ой моды отмечается вблизи подводных поднятий в океане. Отражаясь на дне и поверхности, наклонные волны образуют систему волн, стоячих по вертикали и бегущих по горизонтали (Baines, 1982). Основной источник генерации внутренних колебаний обычно расположен примерно в самой высокой точке континентального склона, на границе шельфа или вверху подводных хребтов, или подводных гор (Morozov, 2018). Интенсивность генерируемых колебаний возрастает, если глубина резких вертикальных градиентов температуры и плотности в сезонном пикноклине близка к точке резкого увеличения глубины. При интенсивной генерации должны присутствовать более высокие моды внутренних волн (Мельников, 1982). Океанографическая платформа МГИ располагается в начале резкого склона шельфа, от которого начинается граница материкового склона, что вероятно приводит к появлению в данном районе внутренних волн 2-ой моды. Другие возможные механизмы генерации волн второй моды, например обтекание

препятствий низкочастотными течениями с образованием запрепятственных волн (Иванов и др., 1977).

Во время измерений на ЮБК с платформы МГИ в июле 2011 г нами были зарегистрированы квазиинерционные внутренние волны 2-ой моды. В наблюдениях колебаний термоклина были идентифицированы волны «растяжения», когда верхние и нижние слои водной толщи направлены в противоположные стороны относительно друг друга. В первые несколько дней до появления волн 2-ой моды термоклин совершал синхронные колебания по всей толще моря с периодом близким к 17 ч, т.е. наблюдались внутренние инерционные волны 1-ой моды. Среднее положение термоклина при этом было расположено ближе к поверхности, чем ко дну. В течение нескольких суток среднее положение термоклина постепенно заглублялось. Когда 14 июля его положение оказалось ближе ко дну характер смещений термоклина с инерционным периодом кардинально изменился. Были зарегистрированы колебания слоев толщи в противофазе, что является характерным признаком внутренних волн 2-ой моды. На рис. 4 а, б представлены температурные колебания водной толщи и вертикальные профили температуры во время наблюдения инерционной внутренней волны 2-ой моды.

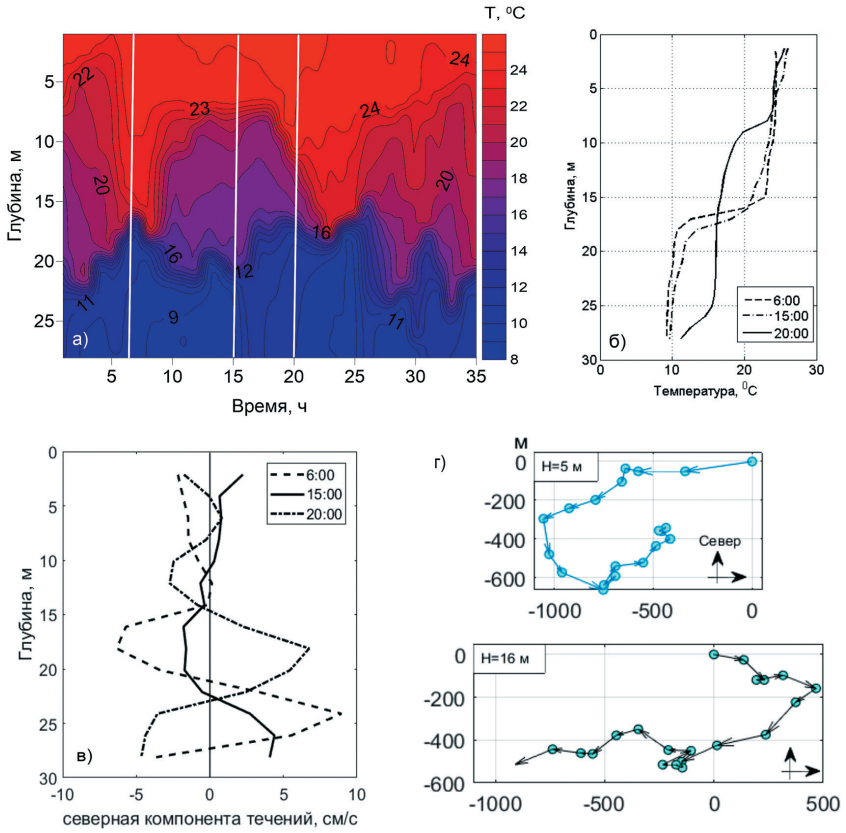

Рис. 4. Проявление внутренней волны квазиинерционного периода 2-ой моды 16–17 июля 2011 г. Дополнительно представлены профили температуры (б), северной компоненты скорости течений (в), выполненные в конкретные часы (отмечены вертикальными линиями на разрезе), а также прогрессивная векторная диаграмма течений (г) по измерениям ADCP за период с 06:00 ч 16 июля по 01:00 ч 17 июля 2011 (показана для горизонтов 5 м и 16 м). Кружки отмечают часы, начало диаграммы в точке (0,0). По осям отложены смещения в м.

Также продемонстрированы вертикальные профили меридиональной компоненты скорости течения и прогрессивная векторная диаграмма течений (рис. 4 в, г). Из рисунка видно, как за 16-часовой период верхние водные слои поднимаются с глубины 16 м на глубину 7–8 м, после чего вновь занимают исходное положение. Одновременно с этим слои нижней половины водной толщи заглубляются от 16 м на глубину до 21 м. Подобные движения относятся к внутренним волнам 2-ой моды типа «растяжения». Амплитуда этих волн достигала 7 м. На соответствующих вертикальных профилях скорости течения отмечается, что во время прохода внутренней волны 2-ой моды наблюдается дважды смена противоположной направленности течения по глубине. При этом на профилях скорости течения максимумы наблюдаются в 6 ч и 20 ч. Как и в случае с внутренними волнами 1-ой моды, вектор скорости течений претерпевает значительные изменения. В последующих измерениях в 2013 г. в районе ЮБК нам также удавалось зарегистрировать квазиинерционные внутренние волны 2-ой моды, однако, менее интенсивные (Серебряный, Химченко, 2014).

Квазиинерционные внутренние волны на абхазском шельфе (узкий шельф)

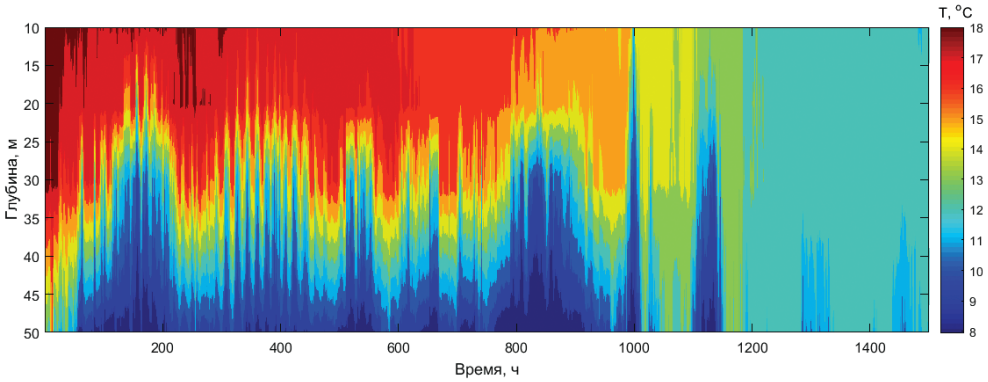

Рис. 5. Изменчивость температурной структуры моря во времени по данным термисторов на абхазском шельфе с 23 октября по 25 декабря 2013 г.

На рис. 5 представлена изменчивость температурной структуры моря во времени по данным цепочки автономных датчиков температуры, установленной на глубине 50 м за период наблюдений с 23 октября по 25 декабря 2013 г. напротив эстакады ГИАНА у м. Сухумский. Интенсивные квазиинерционные колебания наблюдались в начале измерений в октябре, когда термоклин располагался на глубине около 30–35 м. Во время прохождения инерционных внутренних волн наблюдаются вертикальные смещения термоклина размахом до 20–25 м. Характер колебаний температуры заметно изменился к концу осени – началу зимы, что связано было с охлаждением всего водного столба и заглублением термоклина. При этом инерционные движения в колебаниях температуры в декабре стали малозаметны.

Сравнение инерционных внутренних волн на трех типах шельфа

Для каждого района наблюдений характерно наличие внутренних инерционных волн, однако их высоты заметно отличаются. Так на геленджикском шельфе высоты внутренних волн составляют в среднем не более 5–7 м, на крымском шельфе

высоты волн достигают 10–12 м, а на абхазском шельфе – 15–20 м. За все время наблюдений в районе Абхазии были зарегистрированы интенсивные инерционные внутренние волны, которые по сравнению с другими шельфовыми районами Черного моря, имели максимальные высоты (до 25 м), что обусловлено узким шельфом и близостью глубокой воды. Для каждого района наблюдений была оценена временная перемежаемость внутреннего волнения как отношение времени существования инерционных колебаний к общему времени наблюдения. На примере наблюдений в 2013 г. временная перемежаемость внутренних инерционных волн на шельфе Абхазии составила 53%, на крымском шельфе – 65 %, а на геленджикском шельфе – 40%. Квазиинерционные внутренние волны 2-ой моды были зарегистрированы только на крымском шельфе. Ко 2-ой моде относятся 28% и 20% квазиинерционных внутренних волн, наблюдавшихся на крымском шельфе в 2011 и 2013 гг. соответственно.

На рис. 6 представлены частотные спектры внутренних волн для трех типов шельфа, построенные по данным проведенных измерений. Расчет частотных спектров в диапазоне низких частот велся по данным вертикальных смещений термоклина следующим образом. Предварительно перед расчетом был удален тренд.

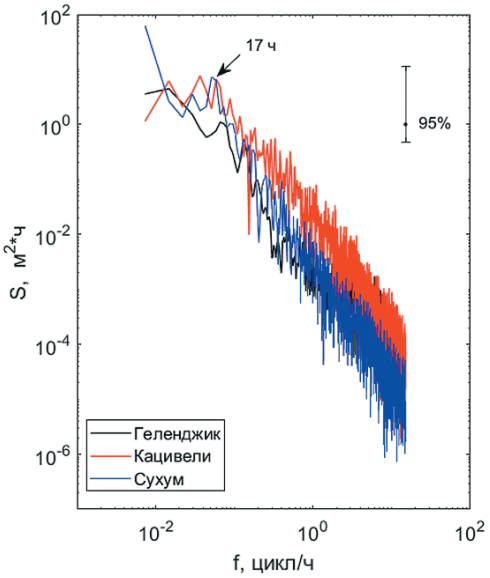

Рис. 6. Частотные спектры внутренних волн для разных типов шельфа

Дискретность измерений была усреднена до 2 мин. Выполнялся расчет по рядам длиною почти 10 суток для каждого района, расчет велся по отрезкам длиною 4096 отсчетов, со сдвигом в 2048 отсчетов. На крымском и абхазском шельфе уровень энергии наблюдаемых внутренних волн почти на порядок выше по сравнению с волнами на геленджикском шельфе. Вероятно, такая особенность обусловлена тем, что в районе Геленджика измерения велись в начале летнего сезона, в то время как на крымском и абхазском шельфах наблюдения проводились в летнее и осеннее время. Также для районов крымского и геленджикского шельфов отмечается сдвиг инерционного пика в высокочастотный диапазон, а для абхазского шельфа – в более низкочастотный. Подобное отклонение частоты наблюдаемых инерционных колебаний от локальной инерционной в прибрежной зоне встречалось ранее неоднократно

(Блатов и др., 1984; Коняев, Сабинин, 1992) и объясняется большей неоднородностью поля плотности в шельфовой зоне по сравнению с мористой частью.

Наблюдения короткопериодных внутренних волн на шельфе Черного моря

На всех типах шельфа было отмечено почти постоянное присутствие на термоклине короткопериодных внутренних волн (фоновые колебания), а также эпизодическое появление интенсивных внутренних волн. Периоды короткопериодных внутренних волн для Черного моря, как известно, составляют от нескольких минут до десятков минут, длины – от десятков до нескольких сотен метров, а амплитуды в среднем порядка нескольких метров (Иванов, Серебряный, 1985; Серебряный, Иванов, 2013).

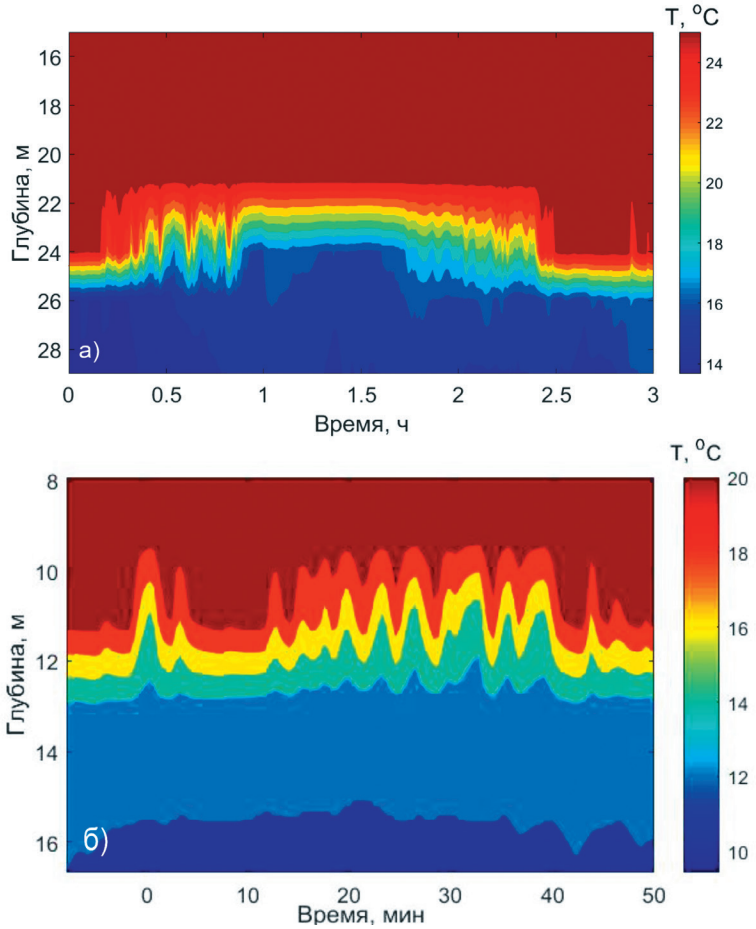

Рис. 7. Запись термисторов на крымском шельфе 22 июля 2014 г (а). Цуг внутренних волн-возвышений на геленджикском шельфе 3 июня 2013 г. (б)

Рассмотрим примеры короткопериодных волн, зарегистрированных термокосами на крымском и геленджикском шельфах. На рис. 7а изображен участок записи длиною 3 ч из наблюдений с платформы МГИ в июле 2014 г. В начале записи виден цуг из 6-ти волн (высота волн 2–3 м, период 10 мин), потом колебания прекратились, спустя еще час снова появился цуг из 5 менее интенсивных волн (высота волн 1–2 м, период 6 мин). Предположительно цуги короткопериодных волн двигались на берег. По ранее проведенным детальным измерениям пространственных

спектров короткопериодных волн данного района было установлено, что здесь береговая направленность цугов внутренних волн является преобладающей (Иванов, Серебряный, 1985).

На рис.7б приведен пример цуга короткопериодных внутренних волн, зарегистрированный в июне 2013 г. на геленджикском шельфе. На записи сначала зарегистрирована уединенная волна-предвестник высотой 2 м и с временным масштабом в 4 мин, а спустя 15 мин появился выраженный цуг из десяти короткопериодных внутренних волн-возвышений (период волн 3–5 мин, высота 1–2 м). Особенностью цуга было «обратное» ранжирование волн по высотам – цуг начинался с волн малых амплитуд с постепенным переходом на волны с возрастающими амплитудами.

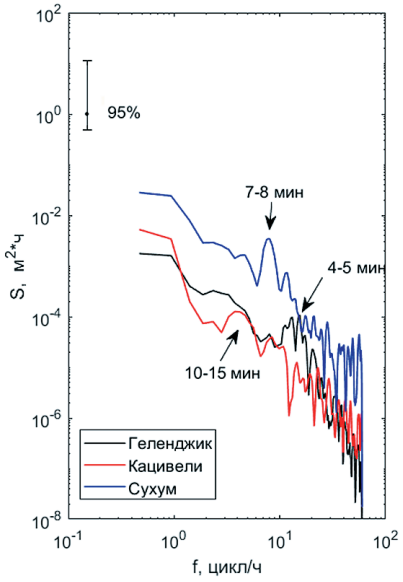

Рис. 8. Частотные спектры короткопериодных внутренних волн для разных типов шельфа

Зная глубину постановки станции и горизонт расположения каждого отдельного датчика температуры, данные термисторов путем осреднения приводились к «смоделированнному» распределенному датчику, а затем полученный результат делился на известный вертикальный градиент температуры. Таким образом данные термисторов были переведены в вертикальные смещения термоклина. Впоследствии для каждого района исследований был рассчитан частотный спектр вертикальных смещений термоклина в высокочастотном диапазоне. Для расчета спектров выбирались записи, где есть цуги волн. Дискретность измерений 30 сек. Длина каждого расчетного ряда составила 3 часа. Расчет велся по отрезкам длиною 30 мин со сдвигом в 15 мин. На рис. 8 представлены частотные спектры для описанных выше примеров короткопериодных внутренних волн. Проведенный спектральный анализ выявил пики высокочастотных колебаний, соответствующие периодам 4–5 мин на геленджикском шельфе, 7–8 мин для абхазского и 10–15 мин для крымского шельфа (см. рис. 8). Такие периоды типичны для короткопериодных внутренних волн Черного моря. Также по аналогии с инерционными колебаниями была проведена оценка временной перемежаемости короткопериодных внутренних волн для трех типов шельфа. На крымском шельфе временная перемежаемость

короткопериодных внутренних волн составила 9,35% в 2014 г., из них 2-ая мода составила 32%. Для абхазского шельфа перемежаемость составила 11%, из них 2-ая мода 6% (2016 г.). На геленджикском шельфе временная перемежаемость короткопериодных внутренних волн достигла 20%.

На шельфах океанов и морей часто встречаются внутренние боры – сильнонелинейные волны, представляющие собой последнюю стадию трансформации внутренней приливной или инерционной волны перед их разрушением (Иванов, Коняев, 1976; Иванов и др., 1981; Holloway, 1987; Серебряный, 1990; Серебряный, 1993; Noble et.al, 2009; Walter and Phelan, 2016). В бесприливном Черном море также регистрируются внутренние боры (например, Иванов и др., 2006), но здесь они образуются в основном благодаря сгонно-нагонным процессам или проходящим по шельфу инерционным волнам. При измерениях с океанографической платформы в прибрежной зоне Черного моря в июле 2013 г. был зарегистрирован внутренний бор (Серебряный, Химченко, 2014), который проявился не только в данных температуры и скорости звука, но также в резком вертикальном смещении звукорассеивающих слоев.

Во время наблюдений на абхазском шельфе у эстакады был зарегистрирован цуг короткопериодных внутренних волн, который относится к внутренним борам, но не совсем обычным (рис. 9). До подхода этого цуга термоклин был приповерхностным в прибрежной акватории. Он находился на глубинах 6–8 м при общей глубине места 13 м. Движущиеся внутренние волны с глубоких районов моря распространялись по приповерхностному термоклину и имели вид волн-углублений.

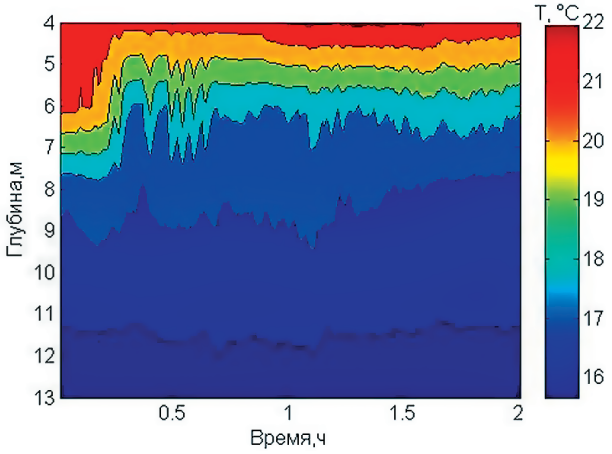

Рис. 9. Изменение температурной структуры моря во время подхода внутреннего бора по данным цепочки термисторов, Сухум 28 мая 2014 г.

При подходе цуга волн к берегу термоклин еще больше поднялся к поверхности моря из-за выхода придонных холодных вод, что вызвало необычную картину появления ступени холодной воды и волн-возвышений на приповерхностном термоклине. Высота наблюдаемого бора составила 2.5 м. Прохождение бора сопровождалось цугом из пяти короткопериодных внутренних волн с высотами 1,5–0,5 м и периодами 5–3 мин, происхождение которых связано с нелинейной трансформацией изначального волнового возмущения.

Заключение

Внутренние волны являются важным компонентом динамики вод в бесприливном Черном море. В работе сравнивались внутренние волны, наблюдаемые на пологом шельфе у побережья Геленджика, приглубом шельфе у ЮБК, а также на узком и крутом шельфе Абхазии. В каждом районе зарегистрированы внутренние волны инерционного и короткопериодного диапазона. На основании анализа данных для каждого района исследований выявлены свои особенности. Так на узком и крутом шельфе Абхазии встречаются инерционные внутренние волны с максимальными высотами (более 20 м), в то время как на пологом геленджикском шельфе высота инерционных внутренних волн редко достигает 10 м. В наблюдениях на крымском шельфе были выявлены внутренние волны 2-ой моды, как инерционного, так и короткопериодного диапазона. На абхазском и геленджикском шельфе внутренние волны 2-ой моды отмечаются только для короткопериодного диапазона. Встречаемость инерционных внутренних волн 2-ой моды составила не более 30%, а короткопериодных волн еще меньше.

Авторы выражают благодарность сотрудникам МГИ РАН академику РАН В.А Иванову и к.т.н. А.С. Кузнецову за предоставленную возможность проведения исследований с платформы МГИ, а также сотрудникам Института экологии АН Абхазии Г.В. Кенигсбергеру и В.П. Елистратову за помощь в проведении работ и сборе экспериментальных данных с эстакады ГИАНА. Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0010) и при частичной поддержке РФФИ (проекты № 16-35-00454 мол_а и № 17-52-40016 Абх_а).

Литература

Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А., Косарев А.Н., Тужилкин В.С. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 240 с.

Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В. Аномальная изменчивость инерционных колебаний океанских вод на Гавайском шельфе // Доклады Академии наук. 2013. Т. 450. № 1. С. 100–104.

Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В. Характеристики инерционных колебаний по данным экспериментальных измерений течений на Российском шельфе Черного моря // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 135–142.

Гончаров В.П., Непрочнов Ю.П., Непрочнова А.Ф. Рельеф дна и глубинное строение черноморской впадины. М.: Наука, 1972. 160 с.

Иванов В.А., Коняев К.В. Бор на термоклине // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1976. Т. 12. № 12. С. 416–423.

Иванов В.А., Коняев К.В., Серебряный А.Н. Группы интенсивных внутренних волн в шельфовой зоне моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981. Т. 17. № 12. С. 1302–1309.

Иванов В.А., Серебряный А.Н. Частотные спектры короткопериодных внутренних волн в бесприливном море // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. № 6. С. 683–685.

Иванов В.А., Серебряный А.Н. Внутренние волны на мелководном шельфе бесприливного

моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 6. С. 661–665.

Иванов В.А., Серебряный А.Н. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливного моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 6. С. 648–656.

Иванов В.А., Лисиченок А.Д., Серебряный А.Н., Тарасов Л.Л. Внутренние боры в прибрежной зоне Черного моря // Акустика океана. Докл. 11-ой школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2006. С. 330–335.

Иванов Ю.А., Мельников В.А., Новицкий А.Г. Обтекание неровностей дна стратифицированным потоком // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13. № 12. С. 1278–1286.

Иванов Ю.А., Смирнов Б.А., Тареев Б. А., Филюшкин Б.Н. Экспериментальные исследования колебаний температуры в море в диапазоне частот внутренних гравитационных волн // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1969. Т. 5. № 3. С. 416–425.

Коняев К.В., Сабинин К.Д. Новые данные о внутренних волнах в море, полученные с помощью распределенных датчиков температуры // Докл. АН СССР. 1973. Т. 209. № 1. С. 86–89.

Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. С.- П.: Гидрометеоиздат, 1992. 272 с.

Коротаев Г.К., Сабинин К.Д. Инерционные колебания на течении со сдвигом скорости произвольного профиля // Доклады Академии наук. 2017. Т. 475. № 2. С. 215–216.

Коротаев Г.К. Инерционные колебания и преобразование Галилея // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 2. С. 227-231.

Лаврова О.Ю., Серебряный А.Н., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю. Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 308–322.

Медведев И.П., Архипкин В.С. Колебания уровня моря в Голубой бухте (Геленджик) // Вестник Московского университета. 2016. Серия 5. № 3. С. 70–78.

Мельников В.А. Влияние рельефа дна на внутренние волны // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. № 7. С. 775–778.

Морозов Е.Г. Океанские внутренние волны. Наука, 1985. 151 с.

Сабинин К. Д., Коротаев Г. К. Инерционные колебания в присутствии сдвигового течения в океане // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 3. С. 399–405.

Серебряный А.Н. Внутренние волны в прибрежной зоне приливного моря // Океанология. 1985. Т. 25. № 5. С. 744–751.

Серебряный А.Н. Эффекты нелинейности во внутренних волнах на шельфе // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26. № 3. С. 285–293.

Серебряный А.Н. Проявление свойств солитонов во внутренних волнах на шельфе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. № 2. С. 244–252.

Серебряный А.Н., Иванов В.А. Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. № 3. С. 34–45.

Серебряный А.Н., Химченко Е.Е. Исследования внутренних волн на кавказском и крымском шельфах Черного моря летом 2013 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 88–104.

Ямпольский А.Д. О внутренних волнах в Черном море по наблюдениям на многосуточной якорной станции // Труды ИОАН СССР. 1960. Т. 39. С. 111–126.

Baines P.G. On internal tide generation models // Deep-Sea Res. 1982. Vol. 29. No. 3. P. 307–338.

Carr M., Davies P.A., Hoebers R.P. Experiments on the structure and stability of mode-2 internal solitary-like waves propagating on an offset pycnocline // Phys. Fluids. 2015. Vol. 27, No. 4. P. 046602.

Deepwell D., Stastna M., Carr M., Davies P.A. Interaction of a mode-2 internal solitary wave with narrow isolated topography // Physics of Fluids. 2017. Vol. 29. No. 7. P. 076601.

Holloway P. Internal hydraulic jumps and solitons at a shelf break region on the Australian North West shelf // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92. No. C5. P. 5405–5416.

Konyaev K.V., Sabinin K.D., Serebryany A.N. Large-amplitude internal waves at the Mascarene Ridge in the Indian Ocean // Deep-Sea Research. 1995. Vol. 42. No. 11/12. P. 2075-2091. DOI: 10.1016/0967-0637(95)00067-4.

Mayer D.A., Mofjeld H.O., Leaman K.D. Near-inertial internal waves observed on the outer shelf in the Middle Atlantic Bight in the wake of hurricane Belle // J. Phys. Oceanog. 1981. No. 11. P. 87–106.

Morozov E.G. Oceanic Internal Tides: Observations, Analysis and Modeling: A Global View // Springer, 2018. 304 p.

Noble M., Jones B., Hamilton P., Xu J., Robertson G., Rosenfeld L., Largier J. Cross-shelf transport into nearshore waters due to shoaling internal tides in San Pedro Bay, CA // Continental Shelf Research. P. 1768–1785.

Serebryany A.N. Mode 2 Internal Waves in the Ocean: Evidences from Observations // The Ocean in Motion. Springer, Cham, 2018. P. 211–219.

Shroyer E.L., Moum J.N., Nash J.D. Energy transformations and dissipation of nonlinear internal waves over New Jersey‘s continental shelf // Nonlinear processes in Geophysics. 2010. Vol. 17. No. 4. P. 345–360. https://doi.org/10.5194/npg-17-345-2010.

Walter R.K., Phelan P. J. Internal bore seasonality and tidal pumping of subthermocline waters at the head of the Monterey submarine canyon // Continental Shelf Research. 2016. Vol. 116. P. 42–53.

Yang Y.J., Fang Y.C., Chang M.-H., Ramp S.R., Kao C.-C., Tang T.Y. Observations of second baroclinic mode internal solitary waves on the continental slope of the northern South China Sea // J. Geophys. Res. 2009. 114. C10003.

Yang Y.J., Fang Y.C., Tang T.Y., Ramp S.R. Convex and concave types of second baroclinic mode internal solitary waves // Nonlinear Processes in Geophysics. 2010. Vol. 17. No. 6. P. 605–614.

Yuan C., Grimshaw R., Johnson E. The evolution of second mode internal solitary waves over variable topography // Journal of Fluid Mechanics. 2018. Vol. 836. P. 238–259.

INTERNAL WAVES ON THE CAUCASIAN AND CRIMEAN SHELVES OF THE BLACK SEA (ACCORDING TO SUMMER-AUTUMN OBSERVATIONS 2011-2016)

E.E. Khimchenko[1], A.N. Serebryany[1,2]

[1] Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russia
e-mail: ekhym@ocean.ru
[2]Andreyev Acoustics Institute JSC, Moscow, 117036, Russia
e-mail: serebryany@hotmail.com

Submitted 01.06.2018, accepted 18.06.2018

The results of observations of internal waves on the Crimean and Caucasian shelves of the Black Sea conducted between 2011 and 2016 are analyzed and generalized. The measurements were carried out on moored stations equipped with chains of autonomous temperature sensors, as well as by vertical profiling of the water column with the miniSVP probe and the acoustic Doppler current profiler (ADCP). The observed internal waves are compared for three types of shelf: the shallow (Gelendzhik shelf), the shallow (offshore South Coast) and the sharp descent of depths (the Abkhazian shelf). Long-term observations of the field of internal waves on the Black Sea shelf confirm the almost constant presence of internal quasi-inertial oscillations of the thermocline, short-period internal waves with periods from one to tens of minutes are often recorded. On the Black Sea shelf, internal waves of the lower mode predominate, but waves of the second mode also occur. On the shelf with a sharp descent of depths, there are internal waves of maximum heights. Examples of recorded inertial and short-period internal waves are presented. The frequency spectra of internal waves are presented, as well as the statistics of occurrence and the estimation of the intermittency of inertial and short-period internal waves for the three shelf regions.

Keywords: inertial internal waves, short-period internal waves, second-mode internal waves, the Black Sea, the shelf of the Crimea and the Caucasus

References

Baines P.G. On internal tide generation models, Deep-Sea Res, 1982, Vol. 29, No. 3, pp. 307–338.

Blatov A.S., Bulgakov N.P., Ivanov V.A., Kosarev A.N., and Tuzhilkin V.S. Izmenchivost' gidrofizicheskikh polei Chernogo morya (Variability of the hydrophysical fields of the Black Sea), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984, 240 p.

Bondur V.G., Sabinin K.D., and Grebenyuk Yu.V. Anomal'naya izmenchivost' inertsionnykh kolebanii okeanskikh vod na Gavaiskom shel'fe (Abnormal variability of inertial oscillations of ocean waters on the Hawaiian shelf), *Doklady Akademii nauk*, 2013, Vol. 450, No. 1, pp. 100–104.

Bondur V.G., Sabinin K.D., and Grebenyuk Yu.V. Kharakteristiki inertsionnykh kolebanii po dannym eksperimental'nykh izmerenii techenii na Rossiiskom shel'fe Chernogo morya (Characteristics of inertial oscillations according to experimental measurements of currents on the Russian shelf of the Black Sea), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2017, Vol. 53, No. 1, pp. 135–142.

Carr M., Davies P.A., *and Hoebers R.P.* Experiments on the structure and stability of mode-2 internal solitary-like waves propagating on an offset pycnocline, *Phys. Fluids*, 2015, Vol. 27, No. 4, pp. 046602.

Deepwell D., Stastna M., Carr M., and Davies P. A. Interaction of a mode-2 internal solitary wave with narrow isolated topography, *Physics of Fluids*, 2017, Vol. 29, No. 7, pp. 076601.

Goncharov V.P., Neprochnov Yu.P., and Neprochnova A.F. Rel'ef dna i glubinnoe stroenie chernomorskoi vpadiny (Bottom relief and deep structure of the Black Sea trough), Moscow: Nauka, 1972, 160 p.

Holloway P. Internal hydraulic jumps and solitons at a shelf break region on the Australian North West shelf, *J. Geophys. Res.*, 1987. Vol. 92. No. C5, pp. 5405–5416.

Ivanov V.A. and Konyaev K.V. Bor na termokline (Bore on thermocline), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1976, Vol. 12, No. 12, pp. 416–423.

Ivanov V.A. and Serebryanyi A.N. Chastotnye spektry korotkoperiodnykh vnutrennikh voln v besprilivnom more (Frequency spectra of short-period internal waves in the nontidal sea), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana,* 1982, Vol. 18, No. 6, pp. 683–685.

Ivanov V.A. and Serebryanyi A.N. Vnutrennie volny na melkovodnom shel'fe besprilivnogo morya

(Internal waves on the shallow shelf of the nontidal sea), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1983, Vol. 19, No. 6, pp. 661–665.

Ivanov V.A. and Serebryanyi A.N. Korotkoperiodnye vnutrennie volny v pribrezhnoi zone besprilivnogo morya (Short-period internal waves in the coastal zone of nontidal sea), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1985, Vol. 21, No. 6, pp. 648–656.

Ivanov V.A., Konyaev K.V., and Serebryanyi A.N. Gruppy intensivnykh vnutrennikh voln v shel'fovoi zone morya (Groups of intense internal waves in the shelf zone of the sea), *Izv. AN SSSR, Fizika atmosfery i okeana*, 1981, Vol. 17, No. 12, pp. 1302–1309.

Ivanov V.A., Lisichenok A.D., Serebryanyi A.N., and Tarasov L.L. Vnutrennie bory v pribrezhnoi zone Chernogo morya (Internal bores in the coastal zone of the Black Sea), Akustika okeana. Dokl. 11-oi shkoly-seminara akad. L.M. Brekhovskikh, M.: GEOS, 2006, pp. 330–335.

Ivanov Yu.A., Mel'nikov V.A., and Novitskii A.G. Obtekanie nerovnostei dna stratifitsirovannym potokom (Circumvention over the unevenness of the bottom by a stratified flow), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1977, Vol. 13, No. 12, pp. 1278–1286.

Ivanov Yu.A., Smirnov B.A., Tareev B.A., and Filyushkin B.N. Eksperimental'nye issledovaniya kolebanii temperatury v more v diapazone chastot vnutrennikh gravitatsionnykh voln (Experimental studies of temperature variations in the sea in the frequency range of internal gravity waves), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1969, Vol. 5, No. 3, pp. 416–425.

Konyaev K.V. and Sabinin K.D. Novye dannye o vnutrennikh volnakh v more, poluchennye s pomoshch'yu raspredelennykh datchikov temperatury (New data of internal waves in the sea, obtained with the help of distributed temperature sensors), *Dokl. AN SSSR*, 1973, Vol. 209, No. 1. pp. 86–89.

Konyaev K.V. and Sabinin K.D. Volny vnutri okeana (Waves inside the ocean), St.-Peterburg: Gidrometeoizdat, 1992, 272 p.

Korotaev G.K. Inertsionnye kolebaniya i preobrazovanie Galileya. (Inertial oscillations and Galilean transformation), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2018, Vol. 54, No. 2, pp. 227-231.

Konyaev K.V., Sabinin K.D., and Serebryany A.N. Large-amplitude internal waves at the Mascarene Ridge in the Indian Ocean, *Deep Sea Res.*, 1995, Vol. I 42, pp. 20–75.

Korotaev G.K., Sabinin K.D. Inertsionnye kolebaniya na techenii so sdvigom skorosti proizvol''nogo profilya (Inertial oscillations on the flow with speed shift of an arbitrary profile), *Doklady Akademii nauk*, 2017, Vol. 475, No. 2, pp. 215-216.

Lavrova O.Yu., Serebryanyi A.N., Mityagina M.I., and Bocharova T.Yu. Podsputnikovye nablyudeniya melkomasshtabnykh gidrodinamicheskikh protsessov v severo-vostochnoi chasti Chernogo morya (Sub-satellite observations of small-scale hydrodynamic processes in the northeastern part of the Black Sea), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 308–322.

Mayer D.A., Mofjeld H.O., and Leaman K.D. Near-inertial internal waves observed on the outer shelf in the Middle Atlantic Bight in the wake of hurricane Belle, *J. Phys. Oceanog*, 1981, No. 11, pp. 87–106.

Medvedev I.P. and Arkhipkin V.S. Kolebaniya urovnya morya v Goluboi bukhte (Gelendzhik) (Sea-level fluctuations in the Blue Bay (Gelendzhik)), *Vestnik Moskovskogo universiteta*, 2016, Seriya 5, No. 3, pp. 70–78.

Mel'nikov V.A. Vliyanie rel'efa dna na vnutrennie volny (Influence of the bottom relief on internal waves), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1982, Vol. 18, No. 7, pp. 775–778.

Morozov E.G. Oceanic Internal Tides: Observations, Analysis and Modeling: A Global View, Springer, 2018, 304 p.

Morozov E.G. Okeanskie vnutrennie volny. Moskva: Nauka, 1985, 151 p.

Noble M., Jones B., Hamilton P., Xu J., Robertson G., Rosenfeld L., and Largier J. Cross-shelf transport into nearshore waters due to shoaling internal tides in San Pedro Bay, CA, *Continental Shelf Research,* 2009, Vol. 29, No. 15, pp. 1768-1785, *https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.04.008.*

Sabinin K. D. and Korotaev G. K. Inertsionnye kolebaniya v prisutstvii sdvigovogo techeniya v okeane (Inertial oscillations in the presence of a shear flow in the ocean), *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2017, Vol. 53, No. 3, pp. 399–405.

Serebryanyi A.N. and Ivanov V.A. Issledovaniya vnutrennikh voln v Chernom more s okeanograficheskoi platformy MGI (Internal waves observations in the Black Sea from the stationary platform of MHI), *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2013, No. 3, pp. 34–45.

Serebryanyi A.N. and Khimchenko E.E., Issledovaniya vnutrennikh voln na kavkazskom i krymskom shel'fakh letom 2013 g (Observations of internal waves at Caucasian and Crimean shelves of the Black Sea in summer 2013), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 88–104.

Serebryanyi A.N. Effekty nelineinosti vo vnutrennikh volnakh na shel'fe (Nonlinear effects in the internal waves at the shelf), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1990, Vol. 26, No. 3, pp. 285–293.

Serebryany A.N. Mode 2 Internal Waves in the Ocean: Evidences from Observations, The Ocean in Motion, Springer, Cham, 2018, pp. 211–219.

Serebryanyi A.N. Proyavlenie svoistv solitonov vo vnutrennikh volnakh na shel'fe (Manifestation of soliton properties on internal waves on a shelf), *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 1993, Vol. 29, No. 2, pp. 244–252.

Serebryanyi A.N. Vnutrennie volny v pribrezhnoi zone prilivnogo morya (Internal waves in the coastal zone of the tidal sea), *Okeanologiya*, 1985, Vol. 25, No. 5, pp. 744–751.

Shroyer E.L., Moum J.N., and Nash J.D. Energy transformations and dissipation of nonlinear internal waves over New Jersey's continental shelf, *Nonlinear processes in Geophysics*, 2010, Vol. 17, No. 4, pp. 345.

Walter R.K. and Phelan P.J. Internal bore seasonality and tidal pumping of subthermocline waters at the head of the Monterey submarine canyon, *Continental Shelf Research*, 2016, Vol. 116, pp. 42–53.

Yampol'skii A.D. O vnutrennikh volnakh v Chernom more po nablyudeniyam na mnogosutochnoi yakornoi stantsii (On internal waves in the Black Sea from observations at a long-term anchor station), *Trudy IOAN SSSR*, 1960, Vol. 39, pp. 111–126.

Yang Y.J., Fang Y.C., Chang M.-H., Ramp S.R., Kao C.-C., and Tang T.Y. Observations of second baroclinic mode internal solitary waves on the continental slope of the northern South China Sea, *J. Geophys. Res.*, 2009, Vol. 114, C10003.

Yang Y. J., Fang Y.C., Tang T.Y., and Ramp S.R. Convex and concave types of second baroclinic mode internal solitary waves, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2010, Vol. 17, No. 6. pp. 605.

Yuan C., Grimshaw R., and Johnson E. The evolution of second mode internal solitary waves over variable topography, *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, Vol. 836, pp. 238–259.