Исследования внутренних волн на кавказском и крымском шельфах Черного моря летом 2013 г

А.Н. Серебряный ^{1,2}, Е.Е. Химченко ^{3,4}

¹Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева, Москва ²Институт космических исследований РАН, Москва ³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва ⁴Морской гидрофизический институт, Севастополь E-mail: serebryany@hotmail.com

Дан обзор результатов исследований внутренних волн, проведенных в летний сезон 2013 г в трех районах черноморского шельфа, значительно различающихся по форме рельефа дна – у Геленджика, Сухума и Кацивели. Измерения велись с помощью заякоренных многосуточных станций, оснащенных автономными датчиками температуры (вертикальные термисторные цепочки), а также с помощью съемок на разрезах, проводимых с судов малого тоннажа, оснащенными акустическим допплеровским профилометром течений (ADCP "Rio Grande 600 kHz"). Для слежения за положением термоклина применялся минизонд скорости звука и температуры (miniSVP). Часть наблюдений проводилась со стационарных платформ (Кацивели и Сухум). Во всех районах были зарегистрированы колебания термоклина с инерционной частотой, а также короткопериодные внутренние волны. Внутренние инерционные волны максимальных амплитуд отмечены на узком абхазском шельфе. Выявлены отдельные случаи колебаний второй моды, причем как среди короткопериодных, так и длиннопериодных внутренних волн. Наиболее часто случаи появления внутренних волн внутренние внутренних волн. Проведено сравнение основных черт внутриволнового поля для трех районов исследований. Обсуждаются особенности поверхностных проявлений внутренних волн наблюденных типов.

Ключевые слова: внутренние волны, фронты, внутренние боры, инерционные волны, волны второй моды, течения, шельф, ADCP.

Введение

Актуальность исследований внутренних волн, проводимых традиционными и акустическими методами на Черном море, возросла в последние годы вследствие появившихся возможностей регистрации спутниковых радиолокационных изображений морской поверхности с недостижимым ранее разрешением в единицы метров. Проводимые подспутниковые эксперименты имеют своей целью продвижение в понимании вопросов генерации внутренних волн, лучшего знания их параметров (в частности, пространственного строения поля волн) и динамики. Особенный интерес представляет связь внутренних волн с их поверхностными проявлениями, которая определяет возможности спутникового мониторинга внутренних волн (Серебряный, 2012; Митягина, Лаврова, 2009; 2010; Лаврова и др., 2009). Для решения всех вышеперечисленных задач необходим сбор данных о внутренних волнах одновременно с проведением спутниковых съемок районов. Первые удачные результаты подспутниковых наблюдений внутренних волн и других мелкомасштабных гидродинамических процессов на геленджикском шельфе Черного моря недавно получены и продемонстрированы в (Лаврова и др., 2013). В связи со спецификой природы и сложностью строения внутренних волн для понимания их особенностей в бесприливном море требуется проводить сбор информации о них как можно более длительное время и охватывать большие районы и акватории. В течение летне-осеннего сезона 2013 г. нами были проведены обширные исследования внутренних волн на черноморском шельфе, охватившие три района моря. Измерения были проведены: 1) на северо-восточном шельфе вблизи Геленджика и Голубой бухты в мае июне; 2) на крымском шельфе у п. Кацивели – в июле; 3) на шельфе Абхазии, район Сухума – в сентябре-октябре.

Различие рельефа дна районов наблюдения внутренних волн

В настоящей работе представлены наблюдения внутренних волн, проведенные в трех географически разнесенных шельфовых районах Черного моря, существенно отличающихся друг от друга по геоморфологическим характеристикам. Обсуждаемые в данной работе наблюдения были проведены за один летний сезон 2013 г. Район шельфа у Геленджика, относящийся к Западно-Кавказскому геоморфологическому району дна Черного моря характеризуется тем, что ширина прибрежной отмели здесь уменьшается до нескольких километров (Гончаров и др., 1972). Конкретно в месте наших работ ширина шельфа составляет 6 км, причем увеличение глубины моря по мере отдаления от берега происходит постепенно.

На крымском шельфе у Кацивели, как и по всему Крымскому геоморфологическому району дна Черного моря, отмель расширяется до 25-30 км, а ее внешний край проходит на глубине 140-160 м. Но отмель состоит как бы из двух ступеней: на глубине 100-110 м отмечается уступ, разделяющий две поверхности выравнивания (Гончаров и др., 1972). Обе террасы имеют слабый наклон, однако в прибрежной части часто встречаются значительные наклоны. У побережья Кацивели, как раз отмечается несколько более резкое увеличение глубин, поэтому шельф этого района можно характеризовать как приглубый.

Что касается района у Сухума, то здесь шельф очень узкий (несколько сотен метров), а спад дна у берега у мыса Сухумского достигает 5 м на 10 м по горизонтали. Профили рельефа дна и характерные вертикальные профили температуры для трех районов наших исследований представлены на *рис.* 1. Таким образом, подытоживая вышесказанное, подчеркнем, что измерения внутренних волн проводились на трех разновидностях шельфов: на шельфе с ровным пологим дном (у Геленджика); на приглубом шельфе (у Кацивели); на узком шельфе с крутым наклоном дна (у Сухума).



Рис. 1. Профили дна трех районов исследований (разрезы ADCP выполнены по нормали к берегу): Геленджик, Кацивели, Сухум (сверху вниз)

Методика проведения измерений

Исследования внутренних волн на шельфах Черного моря велись с помощью заякоренных многосуточных станций оснащенных автономными датчиками температуры (гирлянда датчиков температуры "Star-Oddi" типа DST centi, Исландия), а также с помощью съемок на разрезах, проводимых с судов малого тоннажа, оснащенными акустическим допплеровским профилометром течений (ADCP "Rio Grande 600 kHz") производства фирмы TRDInstruments (США). Для слежения за положением термоклина применялся минизонд скорости звука и температуры (зонд miniSVP фирмы «Valeport Limited», Великобритания). Часть наблюдений за внутренними волнами проводилась со стационарных платформ (Кацивели и Сухум).

Методика измерений с платформы МГИ в Кацивели включала ежечасные зондирования от поверхности до дна минизондом, что позволяло регистрировать вертикальные профили температуры и скорости звука. Во всех районах нами были установлены заякоренные станции с гирляндами из 10 термисторов, которые размещены были в водной толще таким образом, чтобы максимально охватить термоклин. Дискретность измерений датчиков по времени составляла 30 с. Заякоренные станции располагались на глубине около 35 м на геленджикском шельфе, 30 м – на крымском шельфе. Во время измерений у Сухума было установлено три подобных станции в линию на глубинах 35 м, 50 м и 80 м. Во время работ на кавказском шельфе проводились съемки с буксировками ADCP. На платформе МГИ ADCP был установлен стационарно, смотрящим вниз, что позволяло вести многосуточную регистрацию течений по всей водной толще.

Измерения в каждом из районов проводились по методике подспутниковых измерений. Это значит, что при возможности получать спутниковые снимки можно было бы сравнить данные о реальном поле внутренних волн с их поверхностными проявлениями на снимках и далее делать более общие выводы о структуре и параметрах внутренних волн. В отсутствие данных со спутников, тем не менее, важно выделить на основании наших измерений основные внутриволновые явления на черноморских шельфах, которые могут быть реальными объектами изучения инструментами дистанционного зондирования.

В замкнутом Черном море практически отсутствует прилив, который в открытом океане и на шельфе является основным источником для подпитки энергией внутриволнового поля. В Черном море, как и в океане, внутренние волны также располагаются в частотном диапазоне от инерционной частоты (низкочастотный предел) до частоты плавучести (высокочастотный предел) (Коняев, Сабинин, 1992). В отличие от спектров океанских внутренних волн и спектров приливных морей спектры внутренних волн Черного моря не имеют пиков на приливной частоте и в среднем обладают более низким уровнем энергии во всем диапазоне частот (Иванов, Серебряный, 1982). Таким образом, в Черном море инерционные колебания термоклина занимают нишу длиннопериодных внутренних волн и оказываются основным источником подпитки здесь внутриволнового поля.

Другой важный диапазон – это диапазон короткопериодных внутренних волн. Частоты этих волн близки к частоте плавучести. Их периоды для Черного моря сотавляют от нескольких минут до десятков минут. Длины – от десятков до нескольких сотен метров. Короткопериодные внутренние волны, как правило, распространяются в виде цугов.

Наблюдения инерционных внутренних волн

Особенности полей внутренних волн в шельфовой зоне моря наряду с другими факторами определяются характером гидрологической структуры района наблюдений. Измерения в 2013 г. охватывают различные периоды лета и осени, что проявилось на существенных различиях глубин залегания пикноклина в районах исследований. Приведем краткое описание изменений гидрологической структуры водной толщи за весь период наблюдений отдельно для каждого района. Временные разрезы полей температуры для этих районов, построенные по данным записей гирлянд термисторов, представлены на *рис. 2*.



Рис. 2. Временные разрезы температуры по данным термисторов: Геленджик 29 мая– 9 июня, Кацивели 10–16 июля, Абхазия 16-25 сентября 2013 г. (сверху вниз)

Геленджик. Измерения на геленждикском шельфе в районе Голубой бухты проводились с 23 мая по 9 июня. Ситуация в этом районе характеризовалась приповерхностным термоклином, который в начале и середине наблюдений находился на глубинах 7–12 м, а в конце, после перемены погодных условий, заглубился до 15 м. 1 июня отмечалось усиление ветра и выпадение осадков в виде дождя. Колебания термоклина с периодом близким к локальному инерционному (около 17 ч) зарегистрированы в периоды до сильного ветра и после него. Наблюдавшиеся квазиинерционные внутренние волны имели высоты 3-5 м.

Кацивели. Исследования поля внутренних волн на крымском шельфе уже более 30 лет проводится со стационарной платформы МГИ (Серебряный, Иванов, 2013; Иванов, Серебряный, 1985). В 2013 г. измерения с платформы проводились с 6 по 16 июля. Гидрометеорологическая обстановка в период исследований характеризовалась жаркими днями (температура воздуха днем варьировала от 27 до 34° С), преимущественно со слабыми ветрами, однако в отдельные дни наблюдалось усиление ветра до 11 м/с. Температура поверхности воды изменялась в пределах $23-25^{\circ}$ С. Нами был проведен анализ временных записей колебаний температуры как по данным термисторов, так и ежечасных зондирований. В начале измерений термоклин находился на глубине 15 м, затем в течение почти суток произошло внедрение теплой воды, при этом слой скачка заглубился до 26 м. В результате в конце наблюдений термоклин вновь поднялся до глубины 12 м. За весь период измерений было отмечено пять хорошо выраженных квазиинерционных волн с высотами 5–9 м. Во время наблюдений на крымском шельфе также были неоднократно зарегистрированы особенности во внутриволновом поле - волны второй моды и внутренние боры, информация о чем будет представлена ниже.

Сухум. В отличие от первых двух районов наблюдений, измерения в Абхазии пришлись на осеннюю пору – они проходили с 16 сентября по 4 октября. Работы велись как со стационарной эстакады Гидрофизического института Академии наук Абхазии, где глубина моря составляет 13 м, так и в более глубоких акваториях во время выходов на малотоннажном судне. Как уже говорилось выше также были установлены заякоренные станции на глубине 35 м, 50 м и 80 м с гирляндами температурных датчиков. Для удобства сравнения с данными наблюдений из предыдущих районов ограничимся рассмотрением только записи термисторной цепочки, расположенной на глубине 35 м. Термоклин в начале измерений был расположен на глубине 15–20 м, затем отмечалось его заглубление до 33 м, что было связано с прохождением шторма. После шторма слой скачка температуры вновь поднялся на прежнюю глубину 15 м. Впоследствии термоклин снова заглубился до 35 м. Анализ записей термисторных цепочек показал, что в данном районе отмечается

частое проявление квазииинерционных волн с периодом 16–17 ч и высотами 10–20 м. Всего таких событий зарегистрировано более десяти. Район Абхазии отличается узким шельфом и близостью глубокой воды, что возможно является благоприятным условием для развития здесь внутренних волн максимальных амплитуд.

Короткопериодные внутренние волны

Короткопериодные внутренние волны – характерное явление, присущее шельфовой зоне Черного моря. Измерения в 2013 году не стали исключением, в каждом районе часто наблюдались колебания термоклина коротких (минутных) периодов. Для каждого из трех районов были рассчитаны спектры колебаний температуры высокочастотного диапазона. Расчет частотных спектров проводился на выбранных рядах длиною в одни сутки (*puc. 3*). Для расчета спектра из гирлянды термисторов формировались как бы искусственные распределенные датчики температуры путем осреднения данных термисторов на горизонтах 13 м, 15 м и 18 м. Для района Геленджика и Сухума на спектрах отмечается наличие пиков в диапазоне частот 4–10 цикл/ч, что соответствует периодам волн диапазона 6–15 мин. Для района Кацивели диапазон частот спектральных пиков варьирует от 10 до 20 цикл/ч, т.е. здесь преобладают более высокочастотные короткопериодные волны с периодом в 3–6 мин.



Рис. 3. Спектры колебаний температуры в высокочастотном диапазоне, 2013 г.

При определенных обстоятельствах цуги короткопериодных внутренних волн хорошо регистрируются с помощью ADCP (Серебряный, 2012; Сабинин, Серебряный, 2012). Пример цуга интенсивных внутренних волн на записи сигнала обратного рассеяния, полученного ADCP "Rio Grande 600 kHz", который мы наблюдали на галсе поперек шельфа вблизи Геленджика, представлен на *рис. 4*.



Рис. 4. Цуг короткопериодных внутренних волн на поперечном разрезе шельфа вблизи Геленджика 9 июня 2013 г. (запись сигнала обратного рассеяния)

Внутренние волны второй моды

В последнее время внутренние волны второй моды стали объектом пристального изучения исследователей вследствие их достаточно частого обнаружения в интенсивных наблюдениях, проводимых в Южно-Китайском море (Yang et al., 2009). В бесприливном Черном море также встречаются внутренние волны второй моды. Это явление впервые для Черного моря было зарегистрировано нами на крымском шельфе при измерениях с платформы МГИ в 2011 г. (Серебряный, Химченко, 2013). Летом 2013 г. здесь же мы также отмечали появление второй моды во внутренних волнах. Это явление имело место, несмотря на отличие метеорологической ситуации лета 2013 г. от 2011 г. На *рис. 5* представлены временные разрезы по данным ежечасных зондирований для 13-14 июля, отчетливо видно как на горизонте 20 м в течение 17 часов происходит поднятие изотерм до глубины 15 м, при этом температура с 14°C повышается до 19°C, одновременно с этим, изотермы заглубляются с 20 м до 25 м, а температура понижается с 14°C до 9°C. Такое длиннопериодное колебание термоклина можно трактовать как квазиинерционную волну второй моды.



Рис. 5. Временной разрез температуры по данным ежечасных зондирований: Кацивели 13-14 июля 2013 г.



Рис. 6. Временной разрез температуры по данным ежечасных зондирований: Кацивели 15-16 июля 2013 г.

На этом же *рисунке* также можно наблюдать короткопериодную волну второй моды типа «волны растяжения», так после 23 ч на глубине 18 м изотермы поднимаются до 12 м, при этом температура повышается с 18°C до 23°C, одновременно с этим происходит заглубление изотерм с 18 м до 25 м, а значения температуры изменяются с 18°C до 10°C. Продолжительность данного явления составила около 2 часов. Похожие проявления инерционной и короткопериодной внутренних волн зарегистрированы также 15-16 июля (*рис. 6*). Следует отметить, что в длиннопериодной волне колебания

всех слоев водной толщи уже приобретают синхронный характер, в то время как короткопериодная волна выражена колебаниями в противофазе с периодом около 2 часов. Это событие было зарегистрировано и термисторными датчиками (*puc. 7*). В конце заметим, что короткопериодные колебания второй моды, идентифицированные в 2013 г. отличаются увеличенным периодом по сравнению с подобными волнами, наблюдавшимися в 2011 г.



Рис. 7. Временной разрез записи термисторов во время наблюдения короткопериодной волны второй моды, Кацивели 15-16 июля 2013 г.

Внутренний бор на крымском шельфе

Другое интересное явление было зарегистрировано также в районе Кацивели - это внутренний бор. Во время наблюдений 10 июля около 22:00 на записи ADCP было отмечено ярко выраженное усиление сигнала обратного рассеяния в окрестности термоклина (продолжалось примерно до 3:00 11 июля). Оно имело место одновременно с характерным ступенеобразным смещением горизонта максимального рассеяния вверх (*puc. 8*). Это явление было зарегистрировано на записях термисторов и в данных зондирований как поднявшаяся вверх ступень холодной воды (*puc. 9*). На фоне резкого смещения термоклина вверх произошла резкая смена направлений течений в районе платформы с восточного на западное (*puc. 10*), появление последнего в придонной области и вызвало подход холодных вод в виде внутреннего бора. При проходе бора за несколько минут положение термоклина переместилось вверх на 10-12 м.



Рис. 8. Запись сигнала обратного рассеяния по данным ADCP во время наблюдения бора, 10 -11июля 2013 г.



Рис. 9. Ход изотерм по данным записи гирлянды термисторов во время прохождения бора 10-11 июля 2013 г.

Вышеописанный бор был не единичным в наблюдениях 2013 г на крымском шельфе. На *рис. 11* показан пример внутреннего бора меньшего масштаба, зафиксированного 9 июля (запись термисторной цепочки). Температура до 19 ч на термисторах, расположенных на глубинах 14 м, 16 м, 19 м, 22 м и 24 м, была одинаковой - 22 °C. После 19 ч (1 ч в обозначениях на графике) на этих термисторах происходит резкое падение температуры до 20 °C. Явление внутреннего бора ранее наблюдалось на шельфах, в Каспийском (Иванов и др., 1981) и Черном морях (Иванов и др., 2006), и в этом районе исследований (Серебряный, 2012), однако подробно проследить за изменением структуры течений и влиянии его на звукорассеивающие слои ранее не представлялось возможным.



Рис. 10. Амплитуда и направление течений по данным ADCP во время бора, 10-11 июля 2013 г.



Рис. 11. Запись цепочки термисторов для участка внутреннего бора, 9 июля 2013 г. (с 17:59 до 20:59). Различным цветом отмечены следующие горизонты глубины (сверху вниз): 3 м, 8 м, 14 м, 16 м, 19 м, 22 м и 24 м

Особенности поверхностных проявлений внутриволновых явлений

Мы сделали обзор наблюдений внутренних волн, проведенных летом 2013 г. на трех черноморских шельфах, рассмотрев наиболее значимые внутриволновые явления. Эти явления типичны для шельфовой зоны морей, играют важную роль в динамике морской среды, а также оказывают достаточно сильное воздействие на приповерхностные слои моря, чтобы быть видимыми средствами дистанционного зондирования, в том числе с искусственных спутников Земли. Остановимся на особенностях поверхностных проявлений каждой из отмеченных разновидностей внутриволновых явлений.

Инерционные внутренние волны, столь распространенные в шельфовой зоне, трудны для наблюдений из космоса, как и приливные внутренние волны в океане. Это объясняется тем, что для создания видимых контрастов на радиолокационных изображениях необходимы изменения шероховатости водной поверхности, а орбитальные течения длинных внутренних волн обычно не создают ярко выраженных зон конвергенции и дивергенции в приповерхностных течениях, которые воздействуют на шероховатость поверхности, делая эти зоны видимыми из космоса. Однако часто передние фронты длинных внутренних волн, выходящих на шельф или распространяющихся по нему, укручиваются и распадаются на цуги солитноподобных внутренних волн. В этих случаях внутренние волны (уже короткопериодные) хорошо видны на радиолокационных изображениях в виде характерных полосчатых структур. При этом зоне дивергенции течений соответствует на поверхности моря зона ослабленного поверхностного волнения или слик, а зоне конвергенции, наоборот – область более интенсивного поверхностного волнения или сулой. Таким образом, при генерации внутренних короткопериодных волн выходящей на шельф внутренней инерционной волной можно с помощью дистанционных методов хорошо видеть ее передний фронт.

Короткопериодные внутренние волны обычно хорошо видны на радиолокационных снимках, как правило, в виде полосчатых структур. Основным условием для их видимости является отсутствие сильного ветрового волнения (условия при ветре не более 5-7 м/с обеспечивают наилучшее проявление внутренних волн на поверхности), а также достаточные высоты внутренних волн, чтобы им сопутствующие орбитальные течения были порядка 0,1 м/с и более. Пакеты интенсивных короткопериодных внутренних волн генерируются не только внутренними инерционными волнами, но и другими механизмами. Для Черного моря распространенным механизмом является генерация пакетов внутренних волн проходящими локальными фронтами сгонно-нагонного происхождения, а также поверхностными интрузиями распресненных вод в прибрежной зоне. Во всех случаях генерации пакетов волн этими механизмами, как правило, возникают поверхностные проявления, хорошо регистрируемые дистанционными методами, дающими возможность оценить параметры внутренних волн и направление их распространения.

Поверхностные проявления внутренних волн 2-ой моды также возможны, но отличаются от проявлений своих аналогов 1-ой моды. Здесь мы имеем в виду волны коротких периодов. Отличие заключается в последовательности следования зон конвергенции и дивергенции течений, создаваемых внутренней волной, и соответственно, что на поверхности моря движется первым – сликовая или сулойная полоса. Внутренняя волна 1-ой моды обычно проявляется на поверхности сначала сулойной полосой, а затем сликовой (по мере прихода в точку наблюдения). В то же время, волна 2-ой моды (типа «волны сжатия») создает на поверхности сначала сликовую полосу, за которой следует сулойная. В радиолокационных изображениях, таким образом, передний фронт волны 1-ой моды выглядит светлой полосой, а 2-ой моды – полосой темной. Кстати сказать, радарные изображения внутренних волн 2-ой моды редки. Мы можем сослаться на работу (Konyaev et al., 1995), где приведены снимки морской поверхности, сделанные судовым радаром, при прохождении исследовательского судна над уединенной внутренней волной 2-ой моды у подводного хребта в Индийском океане. Опубликованных спутниковых снимков внутренних волн 2-ой моды, по нашим данным пока нет, но можно предположить их скорое появление.

Что касается возможности наблюдений внутренних боров со спутников, то здесь присутствует следующее соображение. Классический внутренний бор на шельфе, представляющий собой ступень холодной воды, движущейся в придонном слое в прибрежную зону, не создает на морской поверхности условий для его распознавания дистанционными методами. Пример такого бора мы рассмотрели в данной статье. Однако, помимо придонного внутреннего бора наблюдаются боры в приповерхностном слое моря (Серебряный, 2012). Этот тип внутреннего бора появляется в виде сильного струйного течения, граница которого от остальных вод шельфа отделяется зоной «вергентных» течений, создающей сильные контрасты шероховатости морской поверхности.

Заключение

На основе изложенного материала сформулируем следующие выводы. Во всех исследуемых районах было отмечено частое появление интенсивных квазиинерционных внутренних волн (период около 17 ч), а также цугов короткопериодных внутренних волн. Внутренние волны инерционного периода максимальных амплитуд отмечены на узком абхазском шельфе. В поле внутренних волн преобладают волны первой моды, однако встречаются и волны второй моды. Наиболее часто случаи появления внутренних волн второй моды относятся к крымскому шельфу, где вторая мода отмечается как для инерционных, так и короткопериодных волн. Получены уникальные, недоступные ранее в наблюдениях, данные о ярком явлении прибрежной гидродинамики - внутреннем боре. Применение методов космического дистанционного зондирования для всех описанных внутриволновых явлений позволит лучше разобраться в структуре и динамике поля внутренних волн на морском шельфе.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 13-05-01106_a, 13-02-90301 Абх_a, 14-05-00520_a).

Литература

- 1. *Гончаров В.П., Непрочнов Ю.П., Непрочнова А.Ф.* Рельеф дна и глубинное строение черноморской впадины. М.: Наука, 1972. 160 с.
- 2. 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.
- 3. *Иванов В.А., Лисиченок А.Д., Серебряный А.Н., Тарасов Л.Л.* Внутренние боры в прибрежной зоне Черного моря // Акустика океана. Доклады 11-ой школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2006. С. 330-335.
- 4. *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.
- 5. 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.
- 6. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. С-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. 272 с.
- 7. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д.* Проявление внутренних волн на морской поверхности в северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. № 6. С. 49–55.
- 8. 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.
- 9. *Митягина М.И., Лаврова О.Ю.* Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72–79.
- 10. *Митягина М.И., Лаврова О.Ю*. Спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн в морях без приливов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 260–272.
- 11. *Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Применение акустических допплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // Акустический журнал. 2012. Т.58. №5. С.639-648.
- 12. Серебряный А.Н. Слико и сулоеобразующие явления в море. Внутренние волны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №2. С.275-286.
- 13. Серебряный А.Н. Слико и сулоеобразующие явления в море. Фронты различного происхождения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №5. С. 231-240.
- 14. Серебряный А.Н., Иванов В.А. Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. № 3. 2013. С. 34-45.
- Серебряный А.Н. АDCP как мощный инструмент акустической океанологии: опыт десяти лет исследований на шельфе российских морей // Акустика океана. Доклады 14-ой школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2013. С. 231-236.
- 16. *Серебряный А.Н., Химченко Е.Е.* Наблюдение сильной изменчивости поля скорости звука в шельфовой зоне Черного моря, вызванной внутренними инерционными волнами // Акустика океана. Доклады 14-ой школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2013. С. 244-247.
- 17. *Konyaev K.V., Sabinin K.D., Serebryany A.N.* Large-amplitude internal waves near Mascarene Ridge in the Indian Ocean// Deep-Sea Research I. 1995. V. 42. N 11/12. P. 2075-2091.
- Yang Y.J., Feng 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 northen South China Sea // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. C 10003, doi: 10.1029/2009JC005305.

Observations of internal waves at Caucasus and Crimean shelves of the Black Sea in summer 2013

A. N. Serebryany ^{1,2}, I. E. Khymchenko ^{3,4}

¹N.N. Andreyev Acoustics Institute, Moscow ²Space Research Institute RAS, Moscow ³P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow ⁴Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol E-mail: serebryany@hotmail.com

Review of results of internal waves investigations carried out during summer season in the three regions of the Black Sea is presented. Observations were made in Gelendgik, Sukhum and Katsively regions having significant differences in shelf relief. The measurements were carried out by long-time moorings with vertical thermistor chains, as well as by surveys on cross sections from small vessels equipped with acoustic Doppler current profiler (ADCP "Rio Grande 600 kHz"). Miniprobe of sound velocity and temperature (miniSVP) was used for thermocline position observation. Some part of observations was made from stationary platforms (in Katsiveli and Sukhum). Inertial and short-period internal waves were registered in all regions. There were revealed internal inertial waves of biggest amplitude on the narrow Abkhazian shelf. Separated cases of second-mode oscillations identified both in inertial and short-period internal waves. The most often occasions of 2-mode waves were met on the Crimean shelf. Detailed measurements of internal bore were made at Crimean shelf. The main features of internal wave fields for each of the three regions are compared. The features of surface manifestations of observed internal wave phenomena are discussed.

Keywords: internal waves, fronts, internal bores, inertial waves, second-mode waves, currents, shelf, ADCP.

References

- 1. Goncharov V.P., Neprochnov Yu.P., 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.
- Ivanov V.A., Konyaev K.V., Serebryanyi A.N., Gruppy intensivnykh vnutrennikh voln v shel'fovoi zone morya (Groups of intense internal waves in a 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., Tarasov L.L. Vnutrennie bory v pribrezhnoi zone Chernogo morya (Internal bores in the coastal zone of the Black Sea), *Akustika okeana* (Ocean Acoustics), Proceedings of 11-th L.M. Brekhovskikh's Conference, Moscow: GEOS, 2006, pp. 330-335.
- 4. Ivanov V.A., Serebryanyi A.N., Chastotnye spektry korotkoperiodnykh vnutrennikh voln v besprilivnom more (Frequency spectra of short-period internal waves in a non-tidal sea), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1982, Vol. 18, No. 6, pp. 683-685.
- 5. Ivanov V.A., Serebryanyi A.N., Korotkoperiodnye vnutrennie volny v pribrezhnoi zone besprilivnogo morya (Short-period internal waves in a coastal zone of a non-tidal sea), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1985, Vol. 21, No. 6, pp. 648-656.
- 6. Konyaev K.V., Sabinin K.D., Volny vnutri okeana (Waves inside the ocean), St-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 272 p.
- Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Sabinin K.D., Proyavlenie vnutrennikh voln na morskoi poverkhnosti v severo-vostochnoi chasti Chernogo morya (Surface manifestation of internal waves in the north-eastern part of the Black Sea), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 6, pp. 49–55.
- Lavrova O.Yu., Serebryanyi A.N., Mityagina M.I., Bocharova T.Yu., Podsputnikovye nablyudeniya melkomasshtabnykh gidrodinamicheskikh protsessov v severo-vostochnoi chasti Chernogo morya (Subsatellite observations of fine-scale hydrodynamical processes in the north-eastern Black Sea), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 308-322.
- 9. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu., Sputnikovye nablyudeniya vikhrevykh i volnovykh protsessov v pribrezhnoi zone severo-vostochnoi chasti Chernogo morya (Satellite observations of eddy and wave processes in the north-eastern Black Sea), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 5, pp. 72–79.
- 10. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu., Sputnikovye nablyudeniya poverkhnostnykh proyavlenii vnutrennikh voln v moryakh bez prilivov (Satellite observations of internal wave surface manifestations in non-tidal seas), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 1, pp. 260–272.

- 11. Sabinin K.D., Serebryanyi A.N., Primenenie akusticheskikh dopplerovskikh profilometrov techenii dlya izucheniya prostranstvennoi struktury morskoi sredy (Results of using acoustic doppler current profilers for studying the spatial structure of the marine environment), *Akusticheskii zhurnal*, 2012, Vol. 58, No. 5, pp. 639-648.
- 12. Serebryanyi A.N., Sliko i suloeobrazuyushchie yavleniya v more. Vnutrennie volny (Slick- and suloy generating processes in the sea. Internal waves), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 275-286.
- 13. Serebryanyi A.N., Sliko i suloeobrazuyushchie yavleniya v more. Fronty razlichnogo proiskhozhdeniya (Slick- and suloy generating processes in the sea. Fronts of different origin), *Sovremennye problemy distant-sionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 231-240.
- 14. Serebryanyi A.N., Ivanov V.A., Issledovaniya vnutrennikh voln v Chernom more s okeanograficheskoi platformy MGI (Study of internal waves in the Black Sea from MGI oceanographic platform), *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2013, No. 3, pp. 34-45.
- 15. Serebryanyi A.N., ADCP kak moshchnyi instrument akusticheskoi okeanologii: opyt desyati let issledovanii na shel'fe rossiiskikh morei (ADCP as powful tool of acoustical oceanography: an experience of tenth-year investigations on shelves of the Russian seas), *Akustika okeana (Ocean Acoustics)*, Proceedings of 14-th L.M. Brekhovskikh's Conference, Moscow: GEOS, 2013, pp. 231-236.
- 16. Serebryanyi A.N., Khimchenko E.E., Nablyudenie sil'noi izmenchivosti polya skorosti zvuka v shel'fovoi zone Chernogo morya, vyzvannoi vnutrennimi inertsionnymi volnami (Observation of strong variability of sound velocity field in shelf zone of the Black Sea caused by internal inertial waves), *Akustika okeana* (Ocean Acoustics), Proceedings of 14-th L.M. Brekhovskikh's Conference, Moscow: GEOS, 2013, pp. 244-247.
- 17. Konyaev K.V., Sabinin K.D., Serebryany A.N., Large-amplitude internal waves near Mascarene Ridge in the Indian Ocean, *Deep-Sea Research I*, 1995, Vol. 42, No. 11/12, pp. 2075-2091.
- Yang Y.J., Feng 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 northen South China Sea, J. Geophys. Res., 2009, Vol. 114, C 10003, doi: 10.1029/2009JC005305.