Фронт в прибрежной зоне моря с узким шельфом: поверхностные проявления и внутренняя динамика

А. Н. Серебряный^{1,2}, О. Е. Попов³, Г. В. Кенигсбергер⁴, В. П. Елистратов⁴, Е. Е. Химченко¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия ² АО «Акустический институт им. акад. Н. Н. Андреева», Москва, 117036, Россия ³ Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия ⁴ Институт экологии АН Абхазии, Сухум, 384900, Абхазия E-mail: serebryany@hotmail.com

Обсуждаются данные наблюдений подхода в прибрежную зону локального гидрологического фронта, проявляющегося на поверхности моря в виде полосы пены, быстро приближающейся к берегу. Появление полосы пены в прибрежной зоне Абхазии 18 сентября 2016 г. было предвестником усиления северо-западного вдольберегового течения, которое, в свою очередь, произошло из-за приближения Основного черноморского течения к береговой черте. Дано детальное описание процессов в толще моря, сопровождающих прохождение резкой границы фронта, на основе измерений, сделанных с помощью гирлянды термисторов, закреплённого на неподвижной платформе ADCP Rio Grande 600 kHz, а также видео- и фотосъёмки. Движущаяся поверхностная интрузия холодных вод сгенерировала на нижележащем термоклине цуг интенсивных внутренних волн второй моды с амплитудами до 7 м, который трансформировался в первую моду и достиг берега. Перед подходом резкой границы фронта в поверхностных слоях прибрежной зоны появлялись порции холодной солёной воды в виде конусообразных включений — проявление филаментов, порождённых фронтом. Наблюдения были сделаны в дневное время при тихой погоде на черноморском шельфе у мыса Сухумский со стационарной платформы Гидрофизического института Академии наук Абхазии. Проанализировано спутниковое изображение видимого диапазона высокого пространственного разрешения MSI Sentinel 2-А абхазского побережья от 10 сентября 2017 г., на котором ясно отображены шлейфы распреснённых вод, исходящие от р. Кодор и распространяющиеся вплоть до мыса Сухумский. На границе шлейфа вод выделены фронтальные зоны и пакеты внутренних волн.

Ключевые слова: фронт, полоса пены, вихри, внутренние волны, инерционные волны, волны второй моды, течения, шельф, ADCP, обратное акустическое рассеяние, изображение видимого диапазона, MSI Sentinel 2-A, Чёрное море

Одобрена к печати: 21.05.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-167-183

Введение

Основная задача дистанционного зондирования океанов и морей — исследование процессов в океанах через их поверхностные проявления — не может быть решена без изучения того, как отпечатываются на поверхности различные океанские гидрофизические явления. Изучая их в морских экспериментах, когда можно точно установить связь поверхностных проявлений с порождающим их явлением, мы создаём необходимую базу для возможности расшифровки спутниковых данных. Первые удачные результаты подспутниковых экспериментов с целью наблюдения внутренних волн, субмезомасштабных вихрей и других гидродинамических процессов в морской толще недавно были получены и продемонстрированы в работах на геленджикском шельфе Чёрного моря (Лаврова и др., 2013, 2015; Серебряный, Лаврова, 2008). Однако связь поверхностных проявлений с гидродинамическими процессами в толще воды не всегда однозначна. Как показывает опыт, схожие поверхностные проявления могут быть вызваны различными причинами.



Рис. 1. Профиль рельефа дна в прибрежной зоне; положение вертикальной термогирлянды и ADCP

Например, уединённые сликовые полосы на поверхности моря в прибрежной зоне, ориентированные параллельно береговой черте, могут быть вызваны как уединёнными внутренними волнами, так и встречными вдольбереговыми течениями (Серебряный, 2012а, б). Поэтому детальные наблюдения процессов в толще воды, сопровождающиеся характерными проявлениями на морской поверхности, имеют особенно большое значение для спутниковой океанологии, даже если они не были обеспечены одновременными спутниковыми съёмками.

В сентябре 2016 г. нами проводились экспериментальные исследования в прибрежной зоне Чёрного моря на акватории Сухума вблизи морской платформы Гидрофизического института АН Абхазии (ГИАНА). Целью исследований было изучение динамики прибрежных вод шельфа с крутым склоном в условиях осенней стратификации. Особое внимание при этом уделялось видимым поверхностным проявлениям, сопровождающим происходящие в прибрежной зоне гидродинамические явления. 18 сентября в дневное время при ясной и тихой погоде со стороны открытого моря к берегу подошла узкая полоса пены, простирающаяся с востока на запад в пределах видимости и разделяющая по цвету области воды: зеленоватую — у берега и голубую — в открытом море. В это время велись измерения течений и временной изменчивости обратно рассеянного акустического сигнала допплеровским акустическим профилометром (ADCP) Rio Grande 600 kHz, установленным на неподвижном основании (платформа ГИАНА). Глубина моря в месте постановки — 13 м. АДСР, как было показано на опыте предыдущих работ (Сабинин, Серебряный, 2012; Serebryany, 2013), даёт возможность собирать важную информацию о многообразии гидродинамических процессов в шельфовой зоне моря. Кроме того, на расстоянии около 100 м от платформы на глубине 50,8 м была установлена вертикальная термогирлянда из восьми автономных температурных датчиков Star-Oddi типа DST centi, расположенных на горизонтах 2; 12; 25,3; 30,3; 35,3; 40,3; 45,3; 50,3 м от поверхности моря. Положение приборов на фоне рельефа дна прибрежной зоны показано на рис. 1. Также с платформы велась видео- и фотосъёмка движущейся к берегу пенной полосы до момента её достижения мелководья у самого берега.

Поверхностные проявления фронта

На *рис.* 2 (см. с. 169) представлено фото поверхности моря, сделанное с платформы при подходе со стороны больших глубин фронта холодных вод. Фронт был очерчен на морской поверхности полосой вспененной воды, простирающейся с востока на запад в пределах видимости. Полоса пены быстро приближалась к берегу. Скорость её продвижения в прибрежной зоне на участке пути от термогирлянды до точки постановки ADCP составляла 0,12 м/с. Оценка скорости движения полосы была сделана по замерам моментов времени прохождения буя термогирлянды и ADCP, сделанных с помощью фотокамеры. Схематичное положение полосы для этих двух моментов показано на фоне топографии рельефа дна прибрежной

зоны на *рис. 3*. При приближении полосы к берегу стали хорошо просматриваться вытянутые по её фронту мелкомасштабные вихри размерами в несколько метров, разнесённые друг от друга на 50-90 м (*рис. 4*). При подходе полосы к платформе стало возможным оценить её поперечный размер, который составил 1,5–2 м. Полоса прошла под платформой в 12:42, а через несколько минут была уже у берега (*рис. 5*, см. 170). Прохождение полосы сопровождалось резким уменьшением поверхностной температуры с 26 до 25 °C.



Рис. 2. Подход к берегу гидрологического фронта со стороны глубокого моря 18 сентября 2016 г. Вид в сторону Сухумского залива



Рис. 3. Топография рельефа дна прибрежной зоны и схематичное изображение положений полосы пены в моменты времени 12:25 (прохождение гирлянды термисторов) и 12:42 (прохождение ADCP)



Рис. 4. Скопления пены вдоль фронта, образованные вихрями с вертикальными осями вдоль его границы



Рис. 5. Пенная полоса прошла под платформой и вышла на мелководье к берегу



Рис. 6. Скорость (*вверху*), направление течения (*посередине*), величина среднего течения (*внизу*), измеренные АDCP в период с 11:25 до 18:30 18 сентября 2016 г.

Характеристики фонового течения во время подхода фронта

Благодаря записям акустического профилометра мы можем проследить за изменчивостью течений в прибрежной зоне как на протяжении времени, предшествующего проходу фронта, так и последующего времени. На *рис.* 6 (см. с. 170) приведены данные о средней скорости течения (усреднение по глубине), а также о скорости и направлении течения в толще моря в интервале глубин от 1,35 до 10 м при глубине моря 13 м с 11:35 по 18:56 18 сентября. Отсутствие данных течения в приповерхностном метровом слое было вызвано ограничениями работы прибора (слепая зона), а в придонном слое — отражением лучей от свай на глубине больше 10 м. Во всё время наблюдений в прибрежной зоне среднее направление течения составило 260°, т. е. течение было практически западное, а в момент подхода фронта и на протяжении часа после этого оно повернуло по часовой стрелке на 30°, и направление стало 290°. Сначала течение было средней силы (0,15 м/с), а потом, монотонно увеличиваясь, достигло 0,50 м/с. Если рассмотреть распределение скорости течения по глубине, то сначала в приповерхностном слое 0,05 м/с.

За час до подхода фронта течение со скоростью 0,25 м/с начало захватывать больший по глубине приповерхностный слой, нижняя граница которого достигла глубины 5 м к моменту подхода фронта в 12:42. Спустя один час после прохода фронта течение 0,25–0,30 м/с шло уже по всей толще прибрежной зоны, а через несколько часов его скорость достигла 0,50 м/с. Таким образом, в наблюдаемый период происходило увеличение скорости течения в прибрежной зоне, а подошедший фронт в 12:25 оказался его поверхностным индикатором.

Трансформация температурной структуры толщи моря, связанная с фронтом

Проанализируем, что происходило с температурной структурой толщи воды прибрежной зоны моря в рассматриваемый период, на основании непрерывной записи термогирлянды. На *рис.* 7 приведены вертикальные профили температуры за период с 11:00 до 15:00 18 сентября. Видно, что термоклин располагался в среднем между горизонтами 12 и 35 м, причём вертикальный градиент температуры в нём составлял 0,65 град/м.

До подхода фронта происходило постепенное похолодание вод (см. *рис.* 7). На *рис.* 8 (см. с. 172) видны особенности этого процесса. После 11:20 происходило похолодание толщи моря выше горизонта 30 м. Одновременно слои ниже горизонта 30 м становились теплее.



Рис. 7. Вертикальные профили температуры для характерных моментов времени от 11:00 до 15:00 18 сентября 2016 г.



Рис. 8. Температурный разрез водной толщи моря в период с 11:00 до 15:00 18 сентября 2016 г.

Эта характерная черта указывает на внутриволновой характер колебаний водной толщи, причём просматривается колебание второй моды с периодом около 30 мин. Аналогичные изменения в термической структуре произошли около 12:25 как раз в момент прохождения полосы пены над термогирляндой. Вместе с тем на относительно длиннопериодном движении (временной масштаб 30 мин) проявились более высокочастотные колебания второй моды, к рассмотрению которых мы переходим далее.

Генерация цуга внутренних волн движущейся границей фронтальной зоны

Итак, проход резкой границы фронта, оконтуренного на поверхности моря пенной полосой, сгенерировал на нижележащем термоклине (на горизонте 30 м) цуг интенсивных внутренних волн второй моды. Об этом свидетельствует запись термогирлянды на *рис. 9* (см. с. 173), установленной в точке с глубиной места 50,8 м и мористее ADCP на 100 м. В состав цуга входило три волны с амплитудами около 2, 7 и 5 м. Периоды волн составили примерно 5, 9 и 9 мин соответственно. Известно, что волны второй моды бывают двух типов: волны «сжатия» и «растяжения». В нашем случае наблюдались волны «растяжения». Однако распределение амплитуд волны по вертикали отличалось от симметричного классического. Именно в приповерхностной части водной толщи профиль второй по порядку следования волны «смазан», что видимо связано с частичным обрушением волны.

Пенная полоса после пересечения термогирлянды двигалась к берегу и достигла местоположения ADCP через 17 мин. Теперь обратимся к записи ADCP. На *рис. 10* (см. с. 173) показаны записи сигналов обратного рассеяния, направления течения и вертикальной компоненты течения. Из сопоставления данных по трём представленным каналам видно, что приповерхностные пузырьки (область наибольшего рассеяния показана красным) захватываются вглубь вертикальным течением скоростью около 0,10 м/с, сопровождающим границу фронта. Также явно видно, что с подходом границы фронта течение в верхней части водной толщи резко меняет направленность, подворачивая на берег с 260 до 320°. Если внимательно рассмотреть направление течений, то видно, как с глубиной оно меняется. В данных о течениях регистрируется фоновое вдольбереговое течение, на которое накладываются орбитальные течения цуга внутренних волн.

Орбитальные течения волн над и под термоклином имеют противоположные направления. Приводимые данные о направленности течений указывают нам на наличие термоклина и его положение. Горизонт смены направления течения при проходе волны соответствует глубине 6 м.



Рис. 9. Цуг внутренних волн второй моды, зарегистрированный термогирляндой



Рис. 10. Цуг внутренних волн, зарегистрированный ADCP в прибрежной зоне. Данные обратного рассеяния, направления течения и вертикальной компоненты скорости течения (сверху вниз)

Мы не располагаем данными прямых измерений температуры с глубиной в точке постановки ADCP, но вышеприведённые показатели позволяют нам говорить, что термоклин расположен на глубине около 6 м. Периодичность появления областей воды у поверхности с уменьшенным рассеянием, а также периодичность проявления интенсивной вертикальной компоненты течения дают возможность выделить периоды трёх внутренних волн, достигших ADCP (4,5; 4 и 5 мин). Исходя из данных ADCP в этом случае по высотам волн можно только сказать, что они были меньше 6 м.

Таким образом, мы располагаем данными о цуге, сгенерированном резкой границей подходящего в прибрежную зону фронта в виде поверхностной интрузии холодных и, по-видимому, более солёных вод открытого моря. Причём имеем данные о нём в двух точках, разнесённых на 100 м: одна с глубиной моря 50,8 м и другая — 13 м. Первую точку будем условно называть глубоководной, а вторую — мелководной. Фронт, подходя со стороны больших глубин, сгенерировал на термоклине, расположенном на 30-метровой глубине, цуг из трёх внутренних волн второй моды с высотами от 2 до 7 м и периодами от 5 до 9 мин. Эти параметры волн относятся к точке с глубиной 50,8 м. Двигаясь дальше со скоростью перемещения границы фронта (0,21 м/с), цуг на расстоянии около 125 м и при значительном перепаде глубин от 50,8 до 13 м (средний угол наклона дна около 21°) трансформировался в цуг волн первой моды. При этом термоклин на мелководной точке оказался на глубине 6 м, периоды волны уменьшились, а высоты волн, кроме существенного роста головной волны от 2 до 6 м, были мало подвержены изменениям.

Генерация цугов интенсивных внутренних волн проходящими локальными фронтами в прибрежной зоне (Иванов, Серебряный, 1985), а также поверхностными интрузиями распреснённых вод (Иванов, Серебряный, 1983) для Чёрного моря — явление известное, доказанное в натурном эксперименте. Численным моделированием было показано, что интрузия поверхностных распреснённых вод, движущаяся над термоклином, генерирует интенсивные внутренние волны, которые распространяются со скоростью границы фронта и по направлению движения фронта (Pao, Serebryany, 2005). В отличие от нашего случая, там генерировались волны первой моды, но источником была интрузия распреснённых и более тёплых вод, а не фронтальная зона с холодной поверхностной водой. Появление внутренних волн второй моды часто связывают со спецификой гидрологии среды их распространения, а именно с наличием в водной толще двух резких пикноклинов. В нашем распоряжении, к сожалению, нет информации о точном распределении температуры с глубиной на трассе, но очевидно, что прохождение фронта формировало дополнительный скачок плотности в приповерхностном слое. Вместе с существовавшим на 30 м пикноклином его появление создавало необходимые условия для образования колебаний второй моды.

Волны второй моды в Чёрном море — явление нечастое, но уже наблюдавшееся (Серебряный, Химченко, 2014). Остаётся вопрос о трансформации волн второй моды в волны первой моды. Эта трансформация произошла на короткой дистанции, на которой укладываются две длины наблюдавшихся волн. У внутренних волн, распространяющихся над наклонным дном, известен «эффект смены полярности амплитуд». При выходе на мелководье волны первой моды из «волн углубления» преобразуются в «волны возвышения» (см., например, (Серебряный, Пао, 2008)). В то же время при определённых условиях волны второй моды могут трансформироваться из «волн растяжения» в «волны сжатия» (Белогорцев и др., 2013). Но о трансформации внутренних волн второй моды в волны первой моды пока никто не докладывал. В связи со всем вышесказанным в качестве причины можно указать только наличие крутого шельфа, взаимодействие с которым интенсивных прибрежных течений приводит к появлению таких необычных процессов.

Наблюдение процессов в толще воды, сопровождающих фронт

Проход фронта, очерченный на поверхности моря пенной полосой, сопровождался похолоданием приповерхностных вод с 26 до 25 °C, что было зарегистрировано датчиком температуры ADCP на глубине 0,5 м. На всех рисунках, построенных по данным термогирлянды, это изменение поверхностной температуры не показано. Обратимся снова к температурному разрезу, охватывающему времена, предшествующие подходу фронта, и время прохода фронта, представленному в крупном масштабе (см. *puc. 9*), и рассмотрим его вместе с данными ADCP более детально. Поскольку ADCP располагался в 100 м от термогирлянды, то возникает вопрос, как сопоставлять данные этих приборов. Из-за того что в момент прохождения резкой границы фронта произошло резкое изменение направления течения с подворотом на берег, с этого момента записи термогирлянды и ADCP следует сопоставлять со сдвигом времени 17 мин. Это временная задержка между записью термогирлянды и ADCP, полученная из измерения времени распространения пенной полосы между этими приборами. До этого момента течение было вдольбереговым 260°. Предполагая его однородность по направлению в прибрежной зоне, для времени, предшествующего прохождению фронта, можно сопоставлять данные термогирлянды и ADCP как результаты процессов, происходящих в одно время.

Клинообразные внедрения чистой морской воды в прибрежной зоне

В течение всего наблюдаемого времени температура на горизонте 30 м практически не изменялась и была около 15 °C, в то время как температурные изменения над и под этим горизонтом выявили расширения термоклина продолжительностью около 30 мин. Появление двух последующих друг за другом периодов расширения термоклина (которые, кстати, можно трактовать как 30-минутные колебания второй моды) сопровождалось на записях ADCP совершенно отличными друг от друга процессами.



Рис. 11. Запись АДСР обратно рассеянного сигнала с 11:47 по 13:45 18 сентября 2016 г.



Рис. 12. Клинообразные включения (области аномально пониженного рассеяния) на записи обратно рассеянного сигнала ADCP

Во время прохода первой волны на сигнале обратного рассеяния было отмечено появление в водной толще областей пониженного рассеяния клинообразной формы (см. *puc. 10, 11*). Эти клинообразные образования появлялись у поверхности и сначала распространялись вниз до половины глубины моря, а последующие увеличивались в размере и приближались ко дну. При этом течение сохраняло свой характер, а поверхностных проявлений не было. Появление второго периода расширения термоклина совпало с проходом границы фронта, при этом на обратном рассеянии сигнала ADCP появилась узкая зона сильного рассеяния сигнала, простирающаяся от поверхности моря до дна (см. *puc. 10*).

Области аномально пониженного рассеяния имели значения коэффициента обратного рассеяния, измеряемого ADCP, в пределах 52–55 дБ (представлены голубым цветом на *рис. 12*, см. с. 175), в то время как фоновая окружающая среда характеризовалась коэффициентом 70 дБ. Первые конусообразные образования появились в 11:35 и наблюдались до 12:09. Наиболее значимых по размеру было около пяти образований. Зная время прохождения ADCP и среднюю скорость течения, легко сделать оценки их размеров. Наибольшее образование имело размер у поверхности моря около 20 м и монотонно сужалось с глубиной, достигая у дна величины в 2 м. Была замечена следующая особенность: чем глубже образование и тоньше диаметр конуса, тем меньше коэффициент рассеяния. У соседнего конуса, не достигшего дна, основание вверху имело размер около 10 м, нижняя точка была шириной 2 м. Наблюдаемая у этих узких образований тенденция двигаться ко дну указывает на то, что они сформированы водой более холодной и солёной, чем окружающие их воды. Мы предполагаем, что наблюдаемые конусы относительно чистой воды на данных ADCP есть проявление филаментов вод открытого моря, источником которых является находящаяся поблизости фронтальная зона.

Основные черты фронтальных зон абхазского побережья на основе анализа спутникового изображения видимого диапазона MSI Sentinel 2-А от 10 сентября 2017 г.

Как уже упоминалось в начале статьи, не всегда удаётся совместить спутниковые изображения с удачно проведёнными подспутниковыми измерениями. В нашем случае мы не можем дополнить полученные данные о наблюдавшемся гидрологическом фронте анализом синхронного спутникового снимка. Однако, исходя из того, что рассмотренная ситуация с появлением в прибрежной зоне фронтальной зоны в моменты приближения к берегу Основного черноморского течения (ОЧТ) — часто повторяемая и характерная ситуация для черноморского побережья, мы проведём анализ спутникового снимка для другой даты, когда в общих чертах ситуация в море была очень сходной с ситуацией 18 сентября 2016 г. Рассмотрим снимок со спутника MSI Sentinel 2-А от 10 сентября 2017 г., представленный на *рис. 13* (см. с. 177).

На оптическом снимке видимого диапазона MSI Sentinel 2-А, охватывающем кавказское побережье от Грузии до Краснодарского края России, хорошо видны шлейфы речных вод впадающих в море крупных рек Кавказа. Шлейфы всех рек имеют протяжённость в десятки километров и вытянуты вдоль побережья в северо-западном направлении, что говорит о воздействии на них ОЧТ, близко расположенного к береговой зоне. Шлейф реки Кодор имеет прямое отношение к содержанию нашей статьи, поэтому остановимся подробнее на нём.

На *рис. 14* (см. с. 177) представлен фрагмент снимка, охватывающий прибрежную зону от мыса Кодор до мыса Сухумский. Воды реки Кодор несут в море большое количество взвешенного вещества, которое позволяет на снимке видеть шлейф вод пониженной солёности на расстоянии более 20 км.

Втекающая в море вода Кодора в сентябре имеет температуру около 13 °C. Распространяясь по шельфу в основном в поверхностных слоях, вода шлейфов постепенно перемешивается с более тёплыми морскими водами, но, как показали наши измерения, сохраняет свою пониженную температуру вплоть до мыса Сухумский (в нашем случае — 25 °C на фоне окружающих вод 26 °C).



Рис. 13. Изображение видимого диапазона MSI Sentinel 2-А северо-восточного побережья Чёрного моря от 10 сентября 2017 г.



Рис. 14. Фрагмент снимка, относящийся к абхазскому побережью от Кодора до мыса Сухумский



Рис. 15. Фрагмент снимка, на котором видны проявления внутренних волн, движущихся в сторону мыса Сухумский



Рис. 16. Фрагмент снимка, на котором видны цуги внутренних волн, порождённые плюмом Кодора (движение волн на северо-запад) и фронтом (движение волн к берегу)

Между шлейфом и окружающими морскими водами образуются фронты с перепадом солёности, температуры и плотности. Распространяясь по прибрежной зоне, сгенерированные шлейфом распреснённых вод гидрологические фронты, в свою очередь, излучают пакеты короткопериодных внутренних волн. В описанном нами случае при проходе границы фронта был зарегистрирован цуг внутренних волн второй моды у мыса Сухумский. Космические снимки повышенного разрешения позволяют в деталях увидеть пакеты внутренних волн на большей площади, относящейся к фронтальной зоне. Нами были выделены несколько участков границы шлейфа, от которых распространяются цуги интенсивных внутренних волн (см. *рис. 14*, а также *рис. 15–17*, с. 178).

Самые близкие к мысу Сухумский внутренние волны располагались на расстоянии 3,1 км от берега, двигаясь почти по нормали к нему (см. *рис. 15*). Характерная длина волн в цуге была около 100 м, всего в цуге насчитывалось около 20 волн. Южнее этого цуга на расстоянии около 7,8 км от берега была видна уединённая пара внутренних волн, порождённая фронтом шлейфа, вытянутого на северо-запад, которая двигалась под углом на северо-восток. Расстояние между этими волнами было около 370 м. По величине контраста морской поверхности от данных образований можно предположить, что это были интенсивные волны, которые для Чёрного моря оцениваются высотами 10 м и более.

На снимке просматривались также другие участки фронтальной зоны шельфа с поверхностными проявлениями короткопериодных внутренних волн. Среди них к наиболее ярким относятся фрагменты в начале шлейфа и вблизи устья реки Кодор (см. *рис. 16* и *17*).

В начале шлейфа наблюдались два цуга внутренних волн, расположенных почти перпендикулярно друг к другу. Один цуг из 5–6 волн находился в самом шлейфе мутных распреснённых вод и двигался как шлейф на северо-запад. Фронт головной волны этого цуга при взаимодействии с границей шлейфа, обращённого к берегу, сгенерировал цуг из 10 мелкомасштабных внутренних волн, распространяющихся к берегу на восток.



Puc. 17. Фрагмент снимка, на котором видны внутренние волны в местах впадения реки Кодор в море

Головная волна сгенерированного цуга на момент снимка находилась на расстоянии 415 м от берега и имела длину 75 м. Фронт волн при этом имел выпуклую форму в сторону берега и простирался на 2,6 км. Длины остальных волн в цуге постепенно уменьшались до 50—30 м. Генерация цуга, возможно, была вызвана столкновением течений, что имеет место при определённых обстоятельствах в прибрежной зоне (Serebryany, 2008).

Река Кодор впадает в море двумя рукавами (см. *рис. 17*). Правый рукав несёт основной поток реки, а левый — уменьшенный. В прибрежной зоне моря в местах впадения обоих рукавов реки образуются расходящиеся концентрическими кругами внутренние волны. От правого потока образуются более интенсивные волны. Волны распространяются от берега в море, причём от левого рукава, который впадает в море под углом, сгенерированные волны также распространяются в море под углом. Весь ареал поля интенсивных внутренних волн от точки впадения главного потока реки распространяется на 1,45 км в море. Количество волн в этом цуге составляет около 30. Их длина постепенно уменьшается от точки генерации в сторону открытого моря от 114 до 58 м. Генерация внутренних волн в прибрежной зоне океана плюмами речных вод, также как и поверхностными интрузиями распреснённых тёплых вод на шельфе Чёрного моря, — явления известные, они наблюдалась ранее (Иванов, Серебряный, 1983; Serebryany, 2008).

В целом данные, которые содержит в себе спутниковый снимок, дали полезную дополнительную информацию о происхождении, динамике и масштабах гидрологических фронтов, а также внутренних волн в прибрежной зоне данного района Чёрного моря и позволили поновому взглянуть на изученный контактными методами фронт на узком шельфе.

Заключение

Рассмотренные в статье явления происходили на фоне значительного усиления вдольберегового северо-западного течения в прибрежной зоне, что было, безусловно, связано с приближением стрежня Основного черноморского течения к береговой черте. Образованию меандров ОЧТ, а также фронтов в прибрежной зоне способствуют инерционные течения, действующие с 17-часовой периодичностью, что и наблюдалось в нашем случае. В подтверждение приведём ход изменчивости температурной структуры моря с 17 по 19 сентября в нашем эксперименте (*puc. 18*). На рисунке ясно видны последовательно идущие длиннопериодные колебания термоклина с периодом, близким к 17 ч, и амплитудами до 10–15 м. Из этих данных также следует, что 18 сентября гребень инерционной внутренней волны проходил в 18:00 — это время, когда горизонтальный перенос вод был минимален, а в 12:00, когда начала проходить подошва волны, он усилился.



Рис. 18. Инерционные внутренние волны на записи термогирлянды с 17 по 19 сентября 2016 г.

Наложение этого инерционного колебания на струю ОЧТ вызвало его прижатие к берегу и появление фронта холодных вод из открытого моря. Резкая граница фронта проявила себя на поверхности моря узкой полосой пены, образованной зоной конвергенции течений на фронте. В толще моря движущаяся граница фронта породила цуг внутренних волн второй моды, который быстро трансформировался в прибрежной зоне в волны первой моды. Перед подходом резкой границы фронта в поверхностных слоях прибрежной зоны появлялись порции холодной солёной воды в виде конусообразных включений — проявление филаментов, порождённых фронтом.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0010) (обработка и интерпретация экспериментальных материалов), а также при поддержке РФФИ (проект № 17-52-40016 Абх_а) в части проведения морских экспериментов.

Литература

- 1. *Белогорцев А. С., Рыбак С.А., Серебряный А. Н.* Нелинейные внутренние волны второй моды над наклонным дном // Акустический журнал. 2013. Т. 59. № 1. С. 70–76.
- 2. *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.
- 3. *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.
- 4. 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.
- 5. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К.Д., Серебряный А. Н. Изучение гидродинамических процессов в шельфовой зоне на основе спутниковой информации и данных подспутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 98–129.
- 6. *Сабинин К.Д.*, *Серебряный А. Н.* Применение акустических допплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // Акустич. журн. 2012. Т. 58. № 5. С. 639–648.
- 7. *Серебряный А. Н.* (2012а) Слико- и сулоеобразующие явления в море. Внутренние волны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 275–286.
- Серебряный А. Н. (20126) Слико- и сулоеобразующие явления в море. Фронты различного происхождения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 231–240.
- 9. Серебряный А. Н., Лаврова О. Ю. Антициклонический вихрь на шельфе северо-восточной части Черного моря: совместный анализ космических снимков и данных акустического зондирования толщи моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 2. С. 206–215.
- 10. *Серебряный А. Н., Пао Кс.* Прохождение нелинейной внутренней волны через точку переворота на шельфе // Доклады АН. 2008. Т. 420. № 4. С. 543–547.
- 11. Серебряный А. Н., Химченко Е. Е. Исследования внутренних волн на кавказском и крымском шельфах летом 2013 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. №. 3. С. 88–104.
- 12. *Nash J. D., Moum J. N.* River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean // Nature. 2005. V. 437. No. 7057. P. 400–403.
- 13. *Pao H. P., Serebryany A. N.* Studies of intense internal gravity waves: field measurements and numerical modeling // Advances in Engineering Mechanics Reflections and Outlooks: In Honor of Theodore T-Y Wu / Eds. A. T. Chuang, M. H. Teng, D. T. Valentine. World Scientific, 2005. P. 286–296.
- 14. *Serebryany A*. Excitation of internal waves by the collision of currents in coastal waters // Proc. 2nd Intern. Symp. Shallow Flows. Hong Kong, 2008.
- Serebryany A. Monitoring of processes on a sea shelf using ADCP // Hydroacoustics of shallow sea / Eds. E. Kozaczka, G. Grelowska. Warszawa: Polish Academy of Sciences Institute of Fundamental Technological Research, 2013. P. 105–117.

Front in the coastal zone of the sea with a narrow shelf: surface manifestations and internal dynamics

A. N. Serebryany^{1,2}, O. E. Popov³, G. V. Kenigsberger⁴, V. P. Elistratov⁴, E. E. Khimchenko¹

 ¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia
² JSC Andreyev Acoustics Institute, Moscow 117036, Russia
³ A. M. Obukhov Institute of Physics of Atmosphere RAS, Moscow 119017, Russia
⁴ Institute of Ecology of Academy of Sciences of Abkhazia, Sukhum 384900, Abkhazia E-mail: serebryany@hotmail.com

The data of observations of the approach to the coastal zone of the local hydrological front which appears on the sea surface in the form of a foam band rapidly approaching the shore are discussed. The appearance of a foam strip in the coastal zone of Abkhazia on September 18, 2016 was a forerunner of the strengthening of the northwestern coastline current, which in its turn was due to the approach of the Black Sea mainstream to the shoreline. A detailed description of the processes in the depth of the sea accompanying the passage of the sharp boundary of the front is given on the basis of measurements made with a thermistor chain and ADCP Rio Grande 600 kHz fixed on the stationary platform, as well as video and photography. The moving surface intrusion of cold waters generated a train of intense internal waves of the mode 2 with amplitudes up to 7 m on the lower thermocline, which was transformed into the mode 1 and reached the shore. Before approaching the sharp boundary of the front, portions of cold salt water appeared in the surface layers of the coastal zone in the form of cone-shaped inclusions which we interpret as the manifestation of filaments generated by the front. Observations were made in the daytime with quiet weather on the Black Sea shelf off Cape Sukhumsky from the stationary platform of the Hydrophysical Institute of the Academy of Sciences of Abkhazia. The satellite image of the visible range of high spatial resolution MSI Sentinel 2-A of the Abkhazian coast dated September 10, 2017 is analyzed. It clearly shows the plumes of freshened waters emanating from the river Codorus and extending up to Cape Sukhumsky. Frontal zones and packets of internal waves are identified on the boundary of the plume.

Keywords: front, foam band, eddies, internal waves, inertial waves, mode 2 waves, currents, shelf, ADCP, acoustic backscattering, image of visible range, MSI Sentinel 2-A, Black Sea

Accepted: 21.05.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-167-183

References

- Belogortsev A. S., Rybak S. A., Serebryanyi A. N., Nelineinye vnutrennie volny vtoroi mody nad naklonnym dnom (Second-mode nonlinear internal waves over a sloping bottom), *Akusticheskii zhurnal*, 2013, Vol. 59, No. 1, pp. 70–76.
- 2. Ivanov V.A., Serebryanyi A.N., Vnutrennie volny na melkovodnom shel'fe besprilivnogo morya (Internal waves on a shallow shelf of the nontidal sea), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1983, Vol. 19, No. 6, pp. 661–665.
- 3. Ivanov V.A., Serebryanyi A.N., Korotkoperiodnye vnutrennie volny v pribrezhnoi zone besprilivnogo morya (Shortperiod internal waves in the coastal zone of a nontidal sea), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1985, Vol. 2, No. 6, pp. 648–656.
- 4. 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 small-scale hydrodynamic processes in the northeastern Black Sea), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 308–322.
- 5. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sabinin K. D., Serebryanyi A. N., Izuchenie gidrodinamicheskikh protsessov v shel'fovoi zone na osnove sputnikovoi informatsii i dannykh podsputnikovykh izmerenii (Study of hydrodynamic processes in the shelf zone based on satellite data and subsatellite measurements), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 98–129.

- Sabinin K. D., Serebryanyi A. N., Primenenie akusticheskikh dopplerovskikh profilometrov techenii dlya izucheniya prostranstvennoi struktury morskoi sredy (The use of acoustic Doppler current profilometers for studying the spatial structure of the marine environment), *Akusticheskii zhurnal*, 2012, Vol. 58, No. 5, pp. 639–648.
- 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.
- 8. 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 distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 231–240.
- Serebryanyi A. N., Lavrova O. Yu., Antitsiklonicheskii vikhr' na shel'fe severo-vostochnoi chasti Chernogo morya: sovmestnyi analiz kosmicheskikh snimkov i dannykh akusticheskogo zondirovaniya tolshchi morya (Anticyclonic eddy on the northeastern Black Sea shore: joint analysis of satellite images and data of acoustic sounding), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 2, pp. 206–215.
- 10. Serebryanyi A. N., Pao Ks., Prokhozhdenie nelineinoi vnutrennei volny cherez tochku perevorota na shel'fe (Passage of a nonlinear internal wave through a point of a coup on the shelf), *Doklady AN*, 2008, Vol. 420, No. 4, pp. 543–547.
- 11. Serebryanyi A. N., 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.
- 12. Nash J. D., Moum J. N., River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean, *Nature*, 2005, Vol. 437, No. 7057, pp. 400–403.
- Pao H. P., Serebryany A. N., Studies of intense internal gravity waves: field measurements and numerical modeling, In: *Advances in Engineering Mechanics Reflections and Outlooks, In Honor of Theodore T-Y Wu*, A. T. Chuang, M. H. Teng, D. T. Valentine (eds.), World Scientific, 2005, pp. 286–296.
- 14. Serebryany A., Excitation of internal waves by the collision of currents in coastal waters, *Proc. 2nd Interna-tional Symposium on Shallow Flows*, Hong Kong, 2008.
- Serebryany A., Monitoring of processes on a sea shelf using ADCP, In: *Hydroacoustics of shallow sea*, E. Kozaczka, G. Grelowska (eds.), Warszawa, Polish Academy of Sciences Institute of Fundamental Technological Research, 2013, pp. 105–117.