

УДК 551.466.8

ИНТЕНСИВНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ АНОМАЛЬНЫХ ВЫСОТ НА ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2019 г. В.Г. Бондур¹, А.Н. Серебряный^{1,2}, В.В. Замшин¹,
Л.Л. Тарасов¹, Е.Е. Химченко^{1,2}

¹ Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга "АЭРОКОСМОС"
Россия, 105064 Москва, Гороховский пер., 4

² Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН
Россия, 117997 Москва, Нахимовский проспект, 36
E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 19.07.2018 г.
После доработки 27.09.2018 г.

Приведены результаты исследования цуга аномально больших для Черного моря внутренних волн с высотами ~16 м и длинами 101–131 м. Измерения проводились в акватории вблизи г. Геленджик с помощью буксируемого акустического доплеровского профилометра течений (ADCP), гидрологического мини-зонда «RBR concerto», заякоренной термисторной цепочки, а также путем пространственного спектрального анализа космического радиолокационного изображения, полученного во время проведения подспутниковых измерений. Зарегистрированные внутренние волны имели нелинейный характер (солитоноподобная форма волновых профилей, дисперсия амплитуд, изменяющееся расстояние между гребнями и др.). Вертикальные компоненты скоростей орбитальных течений во внутренних волнах достигали 0.20 м/с. По пространственным спектрам космического радиолокационного изображения зарегистрированы квазимонохроматические спектральные максимумы, обусловленные поверхностными проявлениями внутренних волн с длинами, соответствующими измеренным по данным ADCP. Источником генерации этого аномального по высоте цуга внутренних волн являлись атмосферный фронт и связанная с ним область пониженного давления.

Ключевые слова: внутренние волны, нелинейные волны, шельф, ADCP, гирлянда термисторов, дистанционное зондирование, радиолокационные изображения, атмосферный фронт

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-3515531114-127>

ВВЕДЕНИЕ

Внутренние гравитационные волны играют важнейшую роль в вертикальном перемешивании океана. Генерация и распространение таких волн связаны с приливами и процессами взаимодействия атмосферы и океана при наличии плотностной стратификации водной толщи [1–6]. Наиболее часто цуги интенсивных внутренних волн генерируются приливами [1, 3, 4, 6]. Эти волны, как правило, проявляют свойства солитонов и могут распространяться на большие расстояния, сохраняя свою форму [2, 7]. Высоты внутренних волн в океане могут достигать нескольких десятков и даже сотен метров [3, 6]. В замкнутых, бесприливных морях, таких как Черное море, также отмечаются цуги

интенсивных внутренних волн, достигающих сравнительно небольших 10-метровых высот [8].

Исследование внутренних волн производится с помощью различной аппаратуры, устанавливаемой на судах и буях [9, 10], с использованием спутниковых данных, регистрирующих внутренние волны по их проявлениям на поверхности и в приповерхностных слоях морей и океанов [2, 11–16], а также методами математического моделирования [2, 11, 17]. Наилучшие результаты дает комплексное использование различных методов [2, 11, 12, 18].

Целью настоящей работы является исследование впервые зарегистрированного цуга рекордных для Черного моря солитоноподобных внутренних волн, с высотами до 16 м.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ПРИМЕНЯЕМАЯ АППАРАТУРА

Комплексные наземно-космические исследования в шельфовой зоне Черного моря, примыкающей к г. Геленджик в районе мыса Толстый, проводились в октябре 2015 г. Этот район ранее был хорошо изучен, поскольку на протяжении нескольких лет здесь проводились работы по исследованию антропогенных воздействий на прибрежные акватории [19–21]. Измерения проводились с помощью акустического доплеровского профилометра течений ADCP "Rio Grande 600 kHz", хорошо зарекомендовавшего себя для изучения течений на шельфе [23], а также с помощью гидрологического мини-зонда "RBR concerto", позволяющего измерять вертикальные профили температуры, солености и других параметров среды в отдельных точках исследуемого района. Профилометр ADCP и мини-зонд устанавливались на борту яхты ("Вита").

Перед началом съемок 7 октября 2015 г. в точке шельфа, удаленной от берега на расстояние 2.5 км (см. рис. 1) при глубине места 32 м, была установлена заякоренная станция

с вертикальной гирляндой, состоящей из 10-и автономных регистраторов температуры типа DST centi фирмы "Starr Oddi". Разрешение датчиков по температуре составляло 0.03 °С, точность – 0.1 °С. Регистрация данных производилась с дискретностью 10 с. Верхний датчик гирлянды помимо температуры фиксировал глубину залегания верхнего измеряющего горизонта.

После постановки гирлянды термисторов проводилась съемка участка исследуемой акватории размером 4 км × 5 км с использованием ADCP. На рис. 1 показаны галсы, выполненные яхтой во время съемки. Всего в этот день было сделано 14 галсов, на которых регистрировались характеристики течений (два из них – первый и последний связаны с постановкой и съемом гирлянды термисторов, место установки которой обозначено треугольником на рис. 1). В процессе проведения экспериментов яхта двигалась с равномерной скоростью близкой к 3 м/с. В точках разворота яхты, между галсами, делались короткие остановки для проведения вертикальных зондирований гидрологическим мини-зондом. В процессе съемки были реализованы два основных вида галсов – ориентиро-

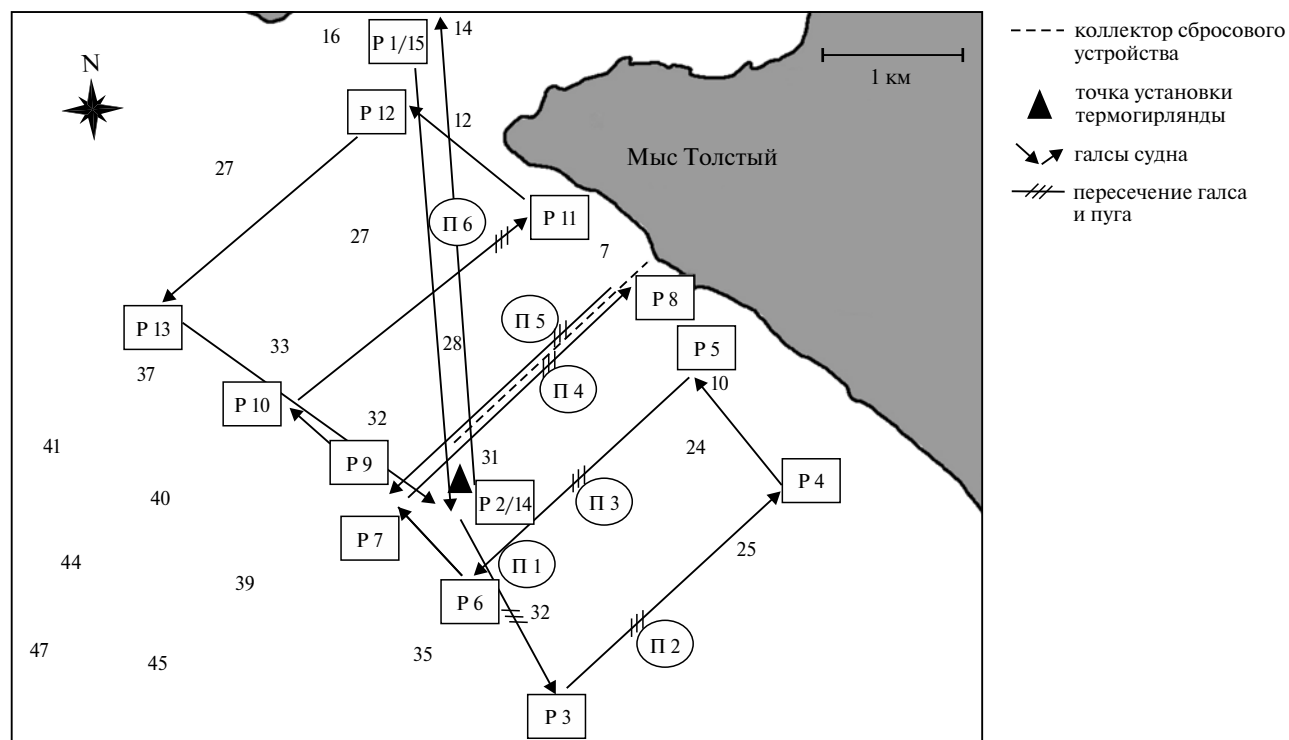


Рис. 1. Схема галсов яхты во время съемки 7 октября 2015 г. (точки разворота обозначены прямоугольниками P1...P15; приблизительное положение участков пересечения пуга внутренних волн на галсах показаны штрихами и обозначены эллипсами П1...П6); треугольником показано место установки термогирлянды. Числами 7...47 показаны глубины моря (в м).

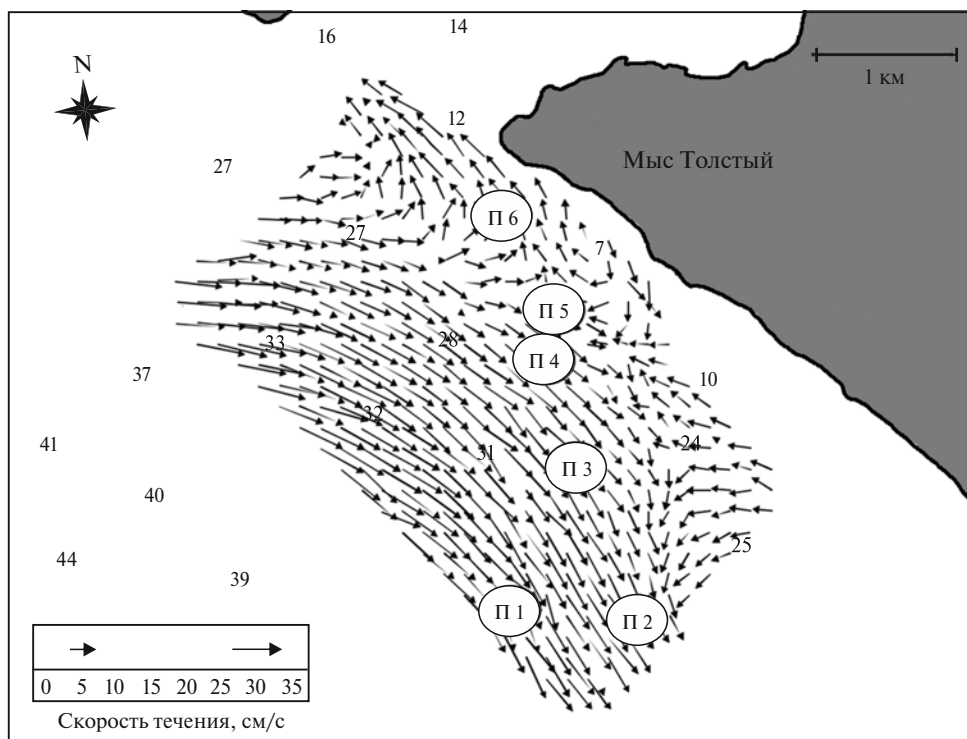


Рис. 2. Поле средних по глубине течений, зарегистрированное 7 октября 2015 г. (реконструкция съемки с ADCP). Приблизительное положение участков, на которых цуг внутренних волн встречался на пути яхты, обозначены эллипсами П1...П6).

ванные перпендикулярно берегу и параллельные берегу.

Во время судовых измерений была выполнена космическая радиолокационная съемка района с борта спутника SENTINEL-1A (разрешение на местности – 10 м, поляризация двойная – VV, VH). Полученное космическое радиолокационное изображение использовалось для исследования поверхностных проявлений внутренних волн с применением методов пространственного спектрального анализа [11–13].

При анализе результатов исследований в качестве метеоданных привлекались карты приземных барических образований над Европой [23].

ПОЛЕ ТЕЧЕНИЙ И ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ВОДНОЙ ТОЛЩИ В ИССЛЕДУЕМОЙ АКВАТОРИИ

На рис. 2 приведено поле средних по глубине течений, зарегистрированное 7 октября 2015 г. (реконструкция съемки с ADCP).

Из анализа поля средних по глубине течений (рис. 2) следует, что 7 октября 2015 г. в исследу-

емой акватории преобладало течение юго-восточной направленности. Это свидетельствует о присутствии во время эксперимента на шельфе прибрежного антициклонического вихря – характерного явления для шельфовой зоны Черного моря в летне-осенний период [24]. Скорость течения в вихре изменялась от ~0.15 м/с до ~0.50 м/с в мористой части акватории, где глубины более 30 м. В прибрежной зоне, где глубины составляют менее 20 м, присутствовало вдольбереговое противотечение. Характер течений в юго-восточной части исследуемой акватории свидетельствовал о соседстве с антициклоническим вихрем циклонического вихря (см. рис. 2).

На рис. 3 представлены вертикальные профили температуры и плотности, полученные мини-зондом при зондировании в начале съемки в точке постановки термогирлянды (отмечена треугольником на рис. 1), а также профиль частоты плавучести.

Как видно из рис. 3, температурная структура исследуемой акватории характеризовалась перемешанным теплым квазиоднородным слоем с температурой 23–24 °С до глубины 24 м. Ниже располагался термоклин. Температура придонного слоя достигала 16–17 °С. В исследуемой

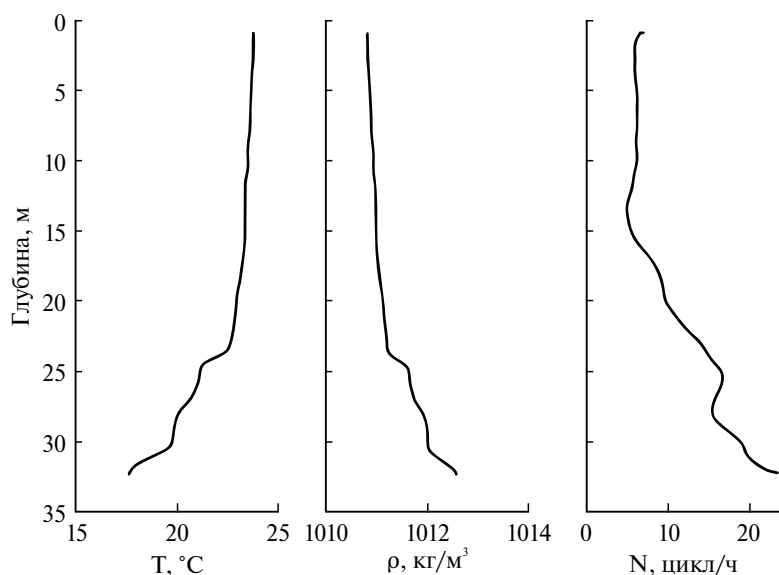


Рис. 3. Вертикальные профили температуры (T) и плотности (ρ) воды, полученные мини-зондом вблизи гирлянды термисторов, и профиль частоты плавучести (N).

акватории глубины моря составляли не более 35 м, в связи с чем термоклин оказывался в придонном положении. Подобная картина наблюдалась и для вертикального распределения плотности. Соленость воды мало изменялась с глубиной. Она составляла 17.9 PSU, лишь у дна достигала 18.0 PSU. Частота Вейселя-Брента имела максимум около 0.025 с^{-1} в придонном слое.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЦУГА АНОМАЛЬНО БОЛЬШИХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ПО ДАННЫМ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Цуг внутренних волн необычно больших для Черного моря высот регистрировался с помощью ADCP на 6-и разнонаправленных галсах яхты (приблизительное местоположение участков пересечения галсов яхты с цугом показаны на рис. 1 штрихами и отмечены эллипсами, обозначенными П1...П6). Кроме того, этот аномальный цуг был обнаружен по данным измерений термисторной цепи, а также на основании результатов пространственного спектрального анализа данных космической радиолокационной съемки [22].

Исследования по данным ADCP

На рис. 4 показана запись обратно-рассеянного сигнала ADCP при встрече с цугом внутренних волн во время прохода яхты на галсе

в направлении от берега из точки Р5 к точке Р6 (участок, обозначенный эллипсом П3 на рис. 1). Время встречи судна с цугом на участке П3 ~ 08 час. 10 мин.¹ Здесь цуг пересекался почти по нормали к фронту его распространения. Это позволило оценить длины внутренних волн, которые составили ~101–131 м. Хорошее качество акустического изображения внутренних волн на этом галсе оказалось возможным благодаря большому количеству рассеивателей в придонном слое, увлекаемых волнами вверх.

На участке галса яхты между точками Р5 и Р6 (см. рис. 4), на котором по измерениям ADCP было получено наиболее контрастное изображение внутренних волн, определялись их высоты. Они последовательно уменьшались, начиная с головной волны (оценки высот – 16 м, 15 м, 14 м и 11 м). Расстояния между гребнями волн цуга последовательно возрастали с 101 м (между головной и второй волнами) до 117 м (между второй и третьей волнами) и 131 м (между третьей и четвертой волнами).

Анализ разрезов составляющих векторов течений, измеренных с помощью ADCP, показал, что вертикальные скорости в течениях, связанных с цугом внутренних волн, достига-

¹ Здесь и далее под временем встречи судна с цугом внутренних волн имеется ввиду местное время, соответствующее моменту нахождения судна на полпути от головной до последней волны цуга.

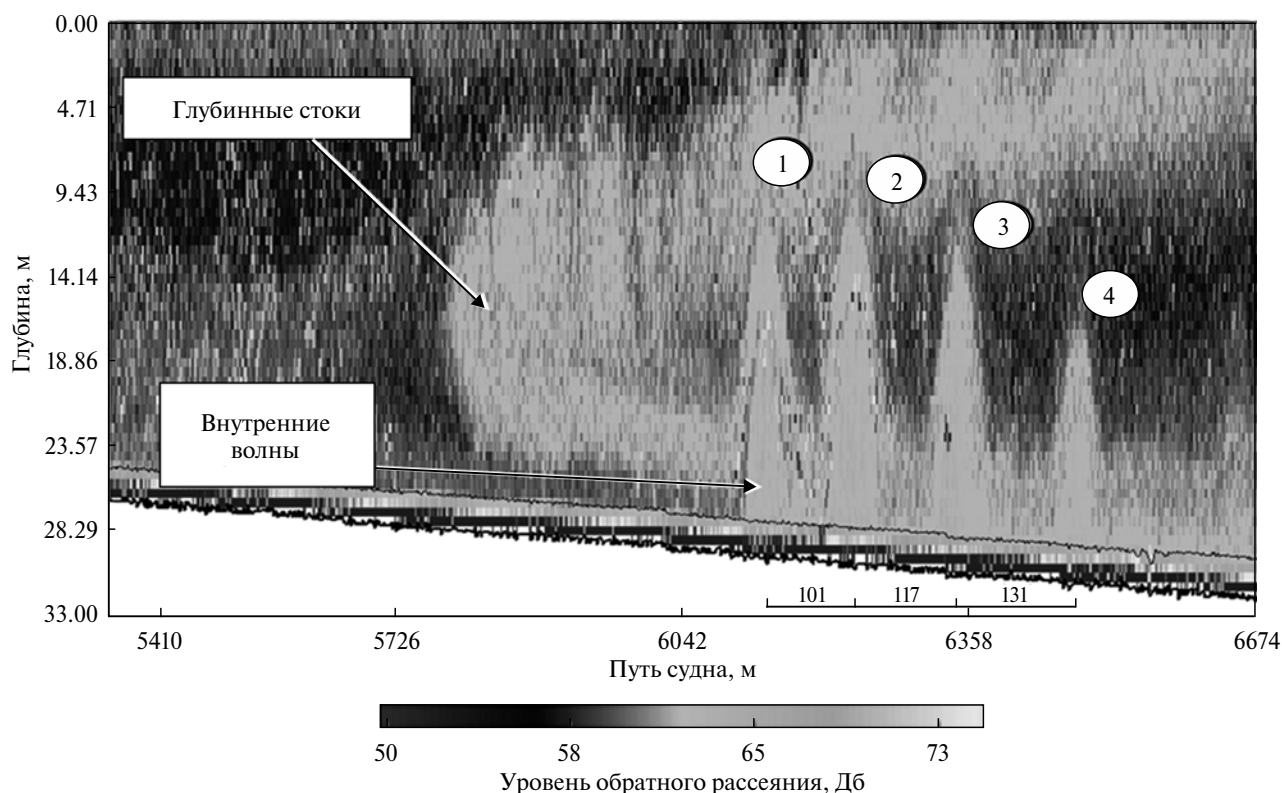


Рис. 4. Картина эхолокационного контраста по данным ADCP при прохождении яхты через цуг anomalно-больших внутренних волн на участке галса от точки P5 к точке P6 перпендикулярно направлению их распространения. Внутренние волны пронумерованы цифрами (1...4), расстояния между гребнями составили 101, 117 и 131 м.

ли 0.15–0.20 м/с. Горизонтальная компонента сопровождавших цуг придонных течений в области внутренних волн меняла направление на противоположное на уровне термоклина.

На рис. 4 помимо структуры внутренних волн можно видеть две контрастные "струи", сходящиеся в одной области (несколько ближе к берегу, чем волна № 1). Это явление обусловлено действием глубинных стоков, поступающих в водную толщу из заглубленного коллектора [19–21] (расположение коллектора показано на рис. 1 пунктиром). Такая "двухструйная" структура, вероятно, связана с тем, что часть сбрасываемых вод всплывает к поверхности (по всей видимости, это неочищенные воды, сброс которых возможен в часы повышенной нагрузки на сбросовую систему), а часть — остается в придонных слоях.

Цуг обнаруженных anomalных внутренних волн двигался в сторону берега. Доказательством этого были встречи цуга на последовательных (перпендикулярных берегу) галсах яхты, когда цуг внутренних волн обнаруживался все ближе к берегу, что показано схематично на рис. 1.

На рис. 5 приведены картины эхолокационных контрастов для участков двух последовательных параллельных галсов, на которых движение яхты производилось в сторону берега. В верхней части рис. 5 показана запись, выполненная на галсе от точки P7 к точке P8, а внизу — на галсе от точки P10 к точке P11 (см. схему на рис. 1). На галсе P7–P8 встреча с цугом произошла в ~ 08 час. 40 мин., а на галсе P10–P11 — в ~ 09 час. 50 мин. Из сопоставления двух записей понятно, что цуг за время между двумя галсами (~70 мин.) продвинулся к берегу на расстояние ~900 м. Это позволило получить оценку скорости распространения внутренних волн, которая составила ~0.21 м/с.

Вследствие того, что термоклин оказывался в придонном положении (см. рис. 3), наблюдалась асимметричная по вертикали форма внутренних волн с обостренными гребнями и уплощенными подошвами, являющаяся одним из проявлений нелинейности [7, 26]. В цуге также хорошо просматривались другие свойства нелинейных волн, а именно: неравенство и ранжированность амплитуд, изменяющееся

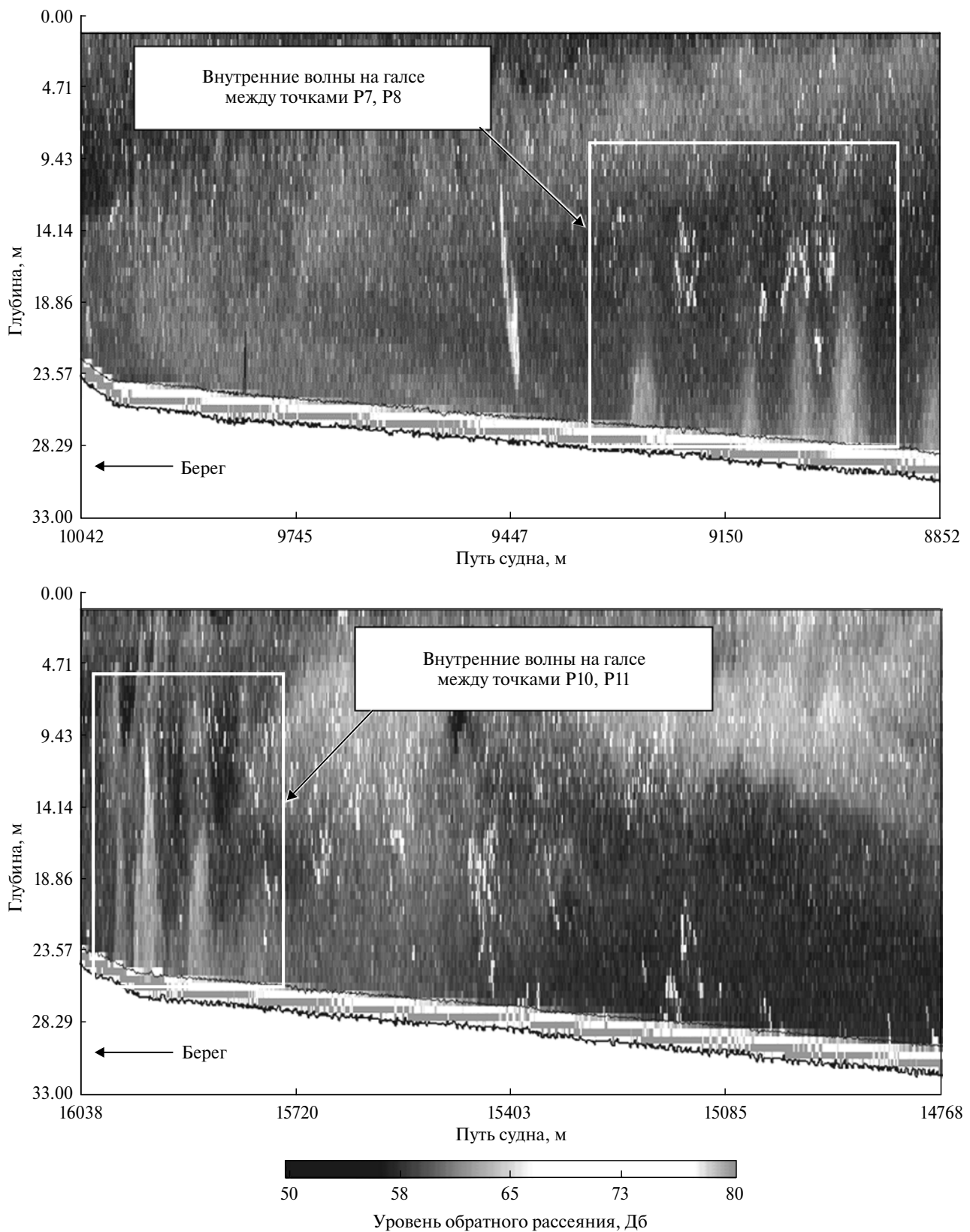


Рис. 5. Фрагменты картин эхолокационных контрастов, зарегистрированных на галсах между точками разворота P7, P8 (вверху) и P10, P11 (внизу), на которых видно значительное продвижение цуга внутренних волн к берегу.

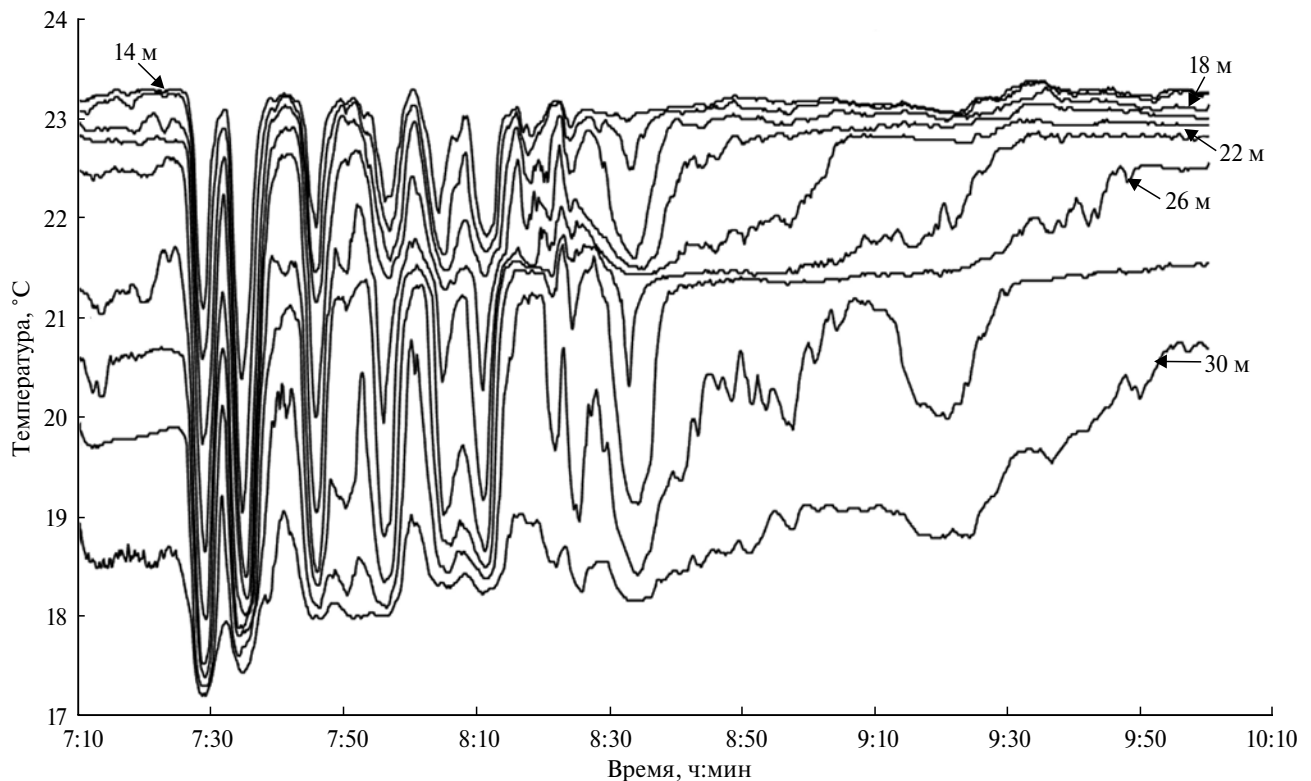


Рис. 6. Временной ход колебаний температуры на горизонтах от 14 до 30 м (через каждые 2 м) во время прохождения аномального цуга внутренних волн.

расстояние между гребнями волн (см. рис. 4, 5). Анализ данных, полученных с помощью ADCP, позволил выявить не только сохранение солитоноподобной формы внутренних волн, но также сохранение сильной вертикальной компоненты в орбитальных течениях.

Отметим, что на картинах эхолокационных контрастов, приведенных на рис. 5, помимо внутренних волн можно видеть высококонтрастные области сильного рассеяния, связанные с движением рыб, попавших в зону облучения ADCP.

Исследования по данным гирлянды термисторов

Помимо данных ADCP в работе были получены, обработаны и проанализированы данные гирлянды термисторов, через которую прошел цуг внутренних волн. На рис. 6 показан временной разрез колебаний температуры на горизонтах от 14 до 30 м (через каждые 2 м) во время прохождения цуга. На рис. 7 показаны вертикальные смещения изотерм во время прохождения цуга внутренних волн, построенные по дан-

ным гирлянды термисторов. Анализ рис. 6 и 7, свидетельствует о наличии синхронных колебаний температуры во всех слоях водной толщи, которые вызваны прохождением аномального цуга внутренних волн. Это свидетельствует о принадлежности волн к первой моде. Размах колебаний по температуре достигал 3–4 °С, что соответствовало высотам волн в цуге до 12–16 м.

Запись гирлянды термисторов подтверждает данные о параметрах внутренних волн, полученных с помощью ADCP, но дают также дополнительную информацию о временном периоде этих волн.

По результатам измерений, выполненных с помощью гирлянды термисторов, были рассчитаны частотные спектры цуга интенсивных внутренних волн и спектр фоновых внутренних волн (рис. 8). Для расчета спектров был "смоделирован" распределенный датчик температуры (РДТ) длиной 16 м (горизонты от 14 м до 30 м). При этом значения температуры в водной толще между указанными горизонтами осреднялись на основании измеренных показаний точечных датчиков.

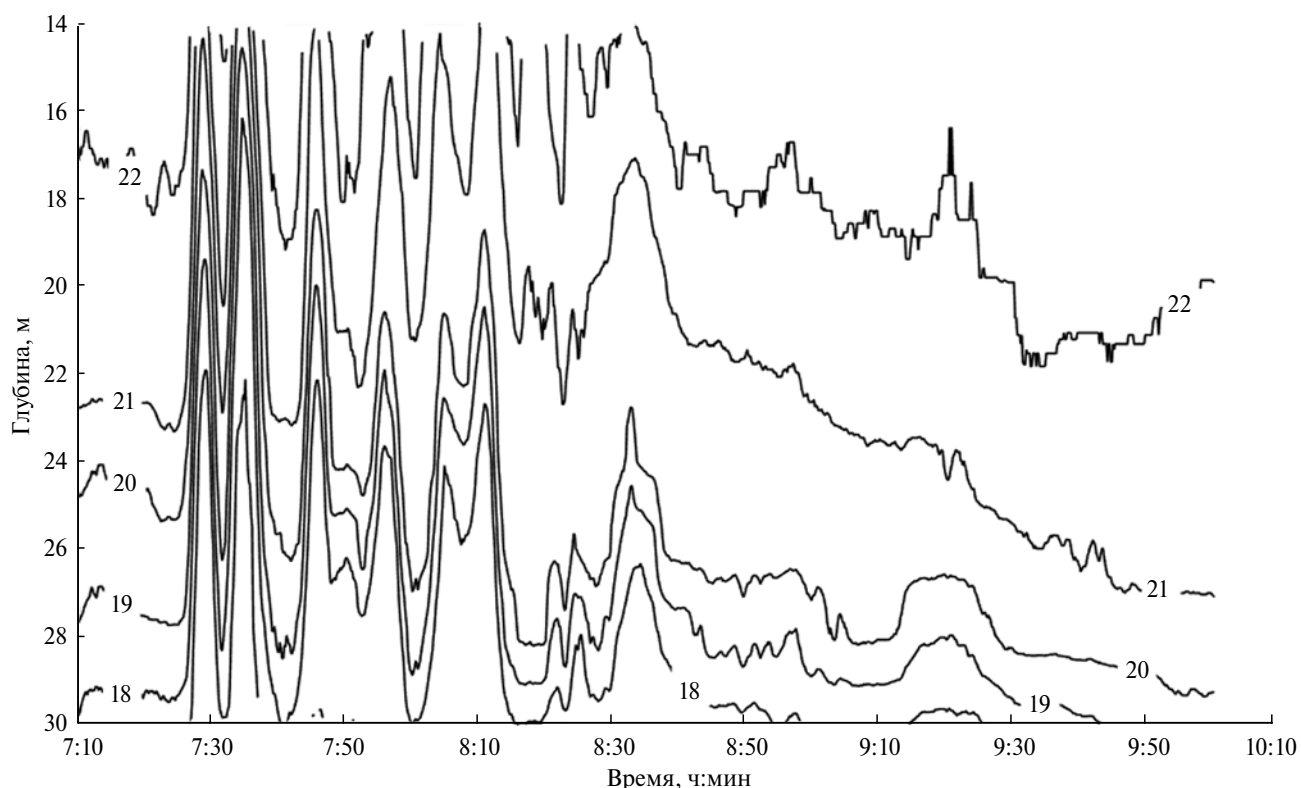


Рис. 7. Вертикальные смещения изотерм 22, 21, 20, 19, 18 °С во время прохождения цуга внутренних волн.

Расчет проводился на рядах продолжительностью по 2.5 часа для временного интервала наблюдения цуга, а также для временного интервала его отсутствия. Аналогичный расчет был проведен для смещений изотермы 19 °С в период наблюдения цуга. Спектры рассчитывались с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье с использованием программного пакета MatLab методом Уэлча.

Как следует из анализа рис. 8, частотный спектр цуга внутренних волн, рассчитанный по данным РДТ, а также частотный спектр, рассчитанный по данным о вертикальных смещениях изотермы 19 °С, имеют спектральные пики, соответствующие периодам волн ~7–8 мин. Такой пик отсутствует на фоновом частотном спектре. По сравнению с фоновыми колебаниями термоклина прохождение цуга внутренних волн привело к общему поднятию спектрального уровня почти на 2 порядка.

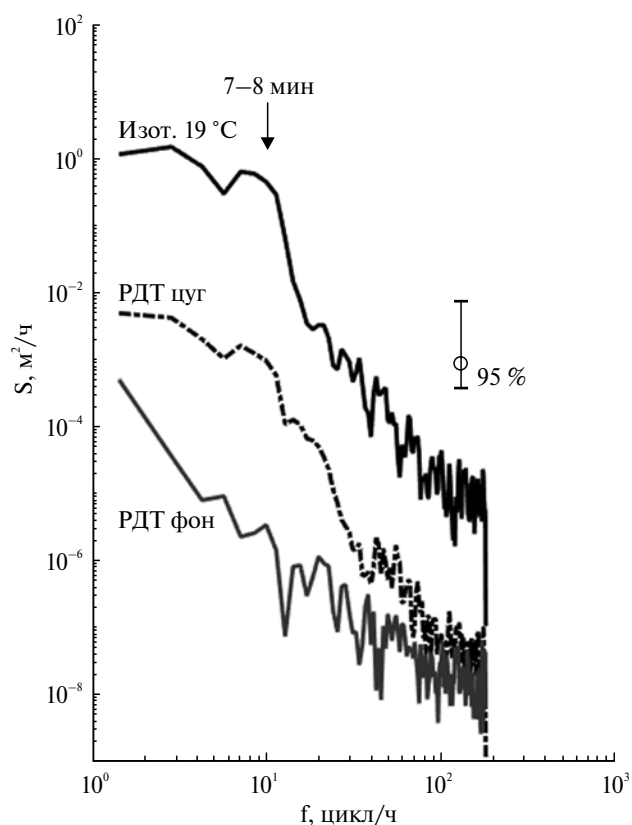


Рис. 8. Частотные спектры цуга внутренних волн, рассчитанные по данным смоделированного распределенного датчика температуры (РДТ), и фоновых внутренних волн. Частотный спектр вертикальных смещений изотермы 19 °С.

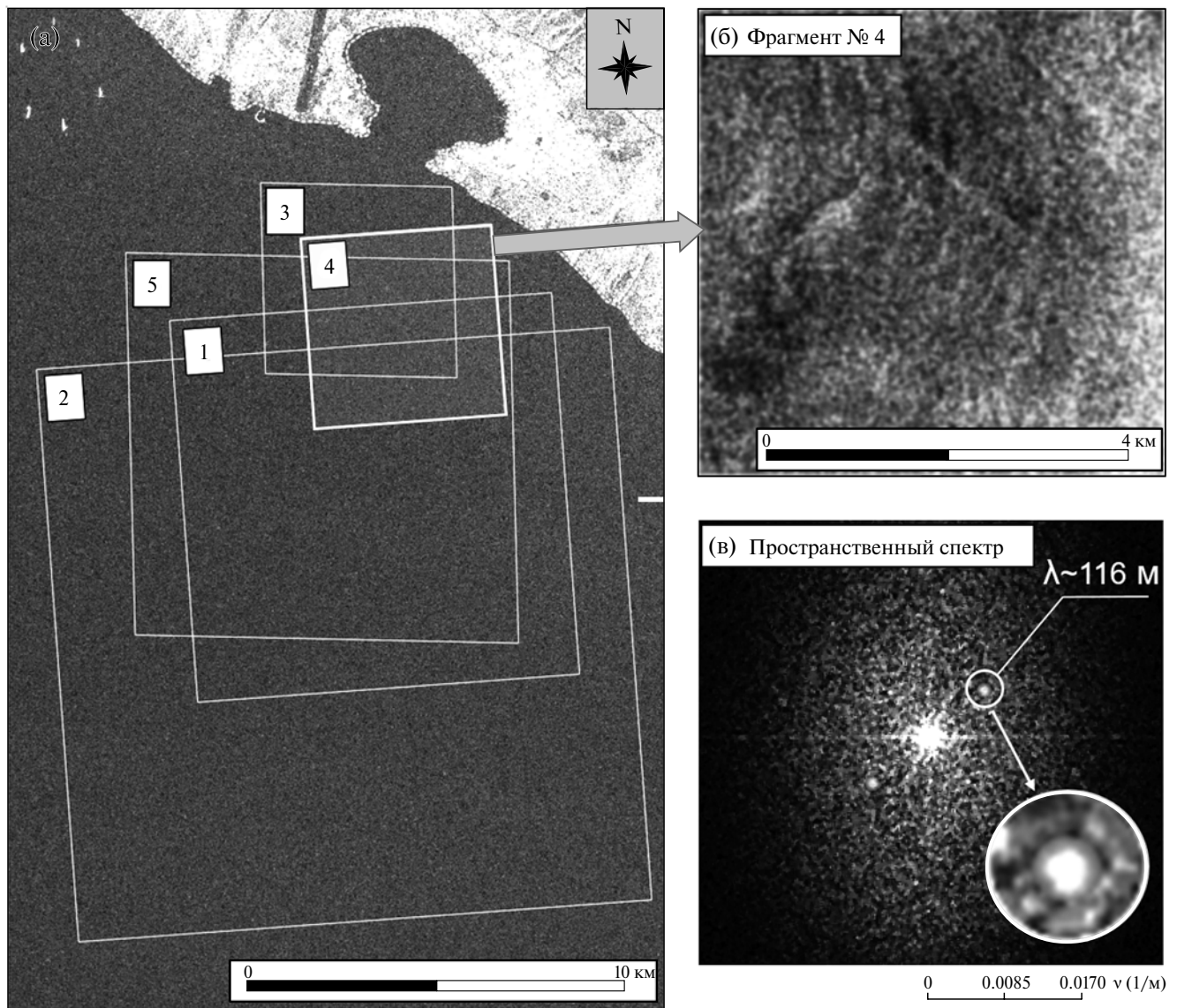


Рис. 9. Космическое радиолокационное изображение исследуемой акватории, полученное 7 октября 2015 г. в 06:40 по местному времени и границы его фрагментов (1.2.3.4.5), к которым применялся пространственный спектральный анализ (а). Увеличенный фрагмент радиолокационного изображения с проявлением головной волны цуга внутренних волн (б). Пример пространственного спектра, полученного путем обработки фрагмента № 4, и увеличенный фрагмент спектра, иллюстрирующий форму и значимость спектрального максимума, обусловленного поверхностными проявлениями внутренних волн (в). Copernicus Sentinel data [2015].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЦУГА АНОМАЛЬНО БОЛЬШИХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ПО ДАНЫМ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ

Во время судовых измерений 7 октября 2015 г. в 06:40 по местному времени была выполнена космическая радиолокационная съемка района с борта спутника SENTINEL-1A (разрешение на местности – 10 м, поляризация двойная – VV,VH) [27]. Полученное космическое изображение исследовалось для обнару-

жения поверхностных проявлений внутренних волн методами пространственного спектрального анализа [11, 12].

На рис. 9а приведено космическое радиолокационное изображение, на котором белыми контурами показаны 5 фрагментов размером от $\sim 5 \times 5 \text{ км}^2$ до $\sim 15 \times 15 \text{ км}^2$, подвергавшиеся пространственному спектральному анализу.

На рис. 9б в качестве примера представлен результат предварительной обработки фрагмента № 4 радиолокационного изображения. На этом фрагменте отчетливо видна яркостная

аномалия в виде светлой линейной структуры, ориентированной параллельно берегу. Анализ космических и подспутниковых данных указывает на то, что эта структура обусловлена поверхностным проявлением головной волны цуга, двигавшегося к берегу. На приведенном фрагменте космического изображения выделяются также неоднородные по текстуре участки с пространственным масштабом ~ 350 м, связанные с антициклоническим вихрем, обнаруженным по данным ADCP (см. рис. 2).

Пространственная спектральная обработка 5-и фрагментов радиолокационного изображения на поляризации VV позволила выявить поверхностные проявления внутренних волн в виде "квазимонохроматических" спектральных гармоник [11, 12]. На приведенном двумерном спектре фрагмента космического радиолокационного изображения (см. рис. 9в) отчетливо выделяются два "квазимонохроматических" спектральных максимума со следующими характеристиками: длина волны $\lambda_{\text{косм4}} \sim 116$ м ($\nu_{\text{косм4}} \sim 0.0086$ м⁻¹), направление $\varphi_{\text{косм4}} \sim 44$ град. По результатам анализа спектральных максимумов 5-и фрагментов радиолокационного изображения была определена средняя длина внутренних волн, которая составила $\lambda_{\text{косм}} \sim 101.3$ м, и средняя ширина спектральных максимумов $\Delta\lambda_{\text{косм}} \sim 9.4$ м. Направление распространения внутренних волн составило в среднем $\varphi_{\text{косм}} \sim 39.3$ град., а средняя угловая ширина "квазимонохроматических" спектральных гармоник — $\Delta\varphi_{\text{косм}} \sim 6.4$ град.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ ВОЛН, ОПРЕДЕЛЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ И ПОДСПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

На основании результатов обработки космических и подспутниковых данных были определены длины, высоты, фазовая скорость и период внутренних волн, наблюдавшихся на шельфе у г. Геленджик 7 октября 2015 г. При этом длины волн определялись по данным ADCP на галсе между точками P5 и P6 (расстояния между гребнями составили $\lambda_{\text{адср1}} \sim 101$ м, $\lambda_{\text{адср2}} \sim 117$ м и $\lambda_{\text{адср3}} \sim 131$ м), а также по данным космической радиолокационной съемки ($\lambda_{\text{косм}} \sim 101$ м).

Оценка длин внутренних волн в первом приближении может быть получена также с использованием дисперсионного соотношения для внутренних волн, которое имеет вид [28]:

$$\omega^2 = gk \frac{\Delta\rho}{\rho} \left\{ k\delta + \text{cth}(kh) + \text{cth}(k(H-h)) \right\}^{-1}, \quad (1)$$

где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ частота; g — ускорение свободного падения; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ волновое число; ρ — плотность воды выше пикноклина; $\Delta\rho$ — скачок плотности; δ — средняя толщина пикноклина; h — средняя глубина пикноклина; H — глубина моря.

Выражение (1) можно представить в виде:

$$\left[\frac{2\pi}{T} \right]^2 = g \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta\rho}{\rho} \times \left\{ k\delta + \text{cth}\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\right) + \text{cth}\left(\frac{2\pi}{\lambda}(H-h)\right) \right\}^{-1}. \quad (2)$$

Из выражения (2) для периода внутренних волн получаем:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{g \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta\rho}{\rho} \left\{ k\delta + \text{cth}\left(\frac{2\pi}{\lambda}h\right) + \text{cth}\left(\frac{2\pi}{\lambda}(H-h)\right) \right\}^{-1}}}. \quad (3)$$

На основании (3) определим значение λ , при котором T примет величину, измеренную с помощью гирлянды термисторов (см. рис. 10) — 7.5 мин (450 с). При этом на основании результатов измерений мини-зондом (см. рис. 5) принималось $\Delta\rho = 1.2$ кг/м³, $\rho = 1011$ кг/м³, $\delta = 1$ м, $h = 25$ м, $H = 32$ м.

В результате численного решения уравнения (3) определено расчетное значение длин внутренних волн $\lambda_{\text{расч}} = 103$ м. Это значение длины внутренних волн, полученное с использованием дисперсионного соотношения, близко к результату измерения длин волн по космическому изображению ($\lambda_{\text{косм}} = 101.3$ м), а также к значению, определенному с помощью ADCP ($\lambda_{\text{адср}} \sim 116$ м).

Оценим фазовую скорость внутренних волн с использованием выражения [28]:

$$C = \left[g \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{h(H-h)}{H} \right]^{0.5}. \quad (4)$$

Подставляя измеренные в ходе судовых исследований значения $\Delta\rho$, ρ , h и H см. выше) получим $C_{\text{расч}} \sim 0.24$ м/с. Как было показано ранее,

из сопоставления двух записей, полученных с помощью ADCP, измеренная скорость пакета внутренних волн имеет близкое значение — $C_{\text{изм}} \sim 0.21$ м/с.

Незначительные различия в значениях $\lambda_{\text{расч.}}$, λ_{ADCP} и $\lambda_{\text{косм.}}$, а также в величинах измеренной $C_{\text{изм}}$ и расчетной $C_{\text{расч}}$ фазовой скорости внутренних волн, объясняются тем, что судовая съемка акватории проводилась в течение ~6 часов на площади ~20 км² (при этом гирлянда термисторов устанавливалась только в одной точке), а космическая радиолокационная съемка пришлось по времени на первую четверть судовых измерений. В связи с этим анализируемые данные были получены в несколько различающихся условиях (по времени, по пространству и по глубине), что является принципиальным, поскольку обнаруженный цуг внутренних волн с течением времени перемещался и видоизменялся. Несмотря на эти обстоятельства, имеется хорошее соответствие длин, фазовой скорости и периода внутренних волн, определенных различными способами (разница не превышает 13%).

ИСТОЧНИК ГЕНЕРАЦИИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Возникает естественный вопрос об источнике генерации зарегистрированного аномального цуга внутренних волн. Еще раз подчеркнем, что высоты волн в обнаруженном цуге были максимальными за всю историю наблюдений на Черном море.

Почти за 40-летний период исследований внутренних волн в Черном море был выявлен ряд механизмов (процессов), ответственных за генерацию интенсивных внутренних волн. Докладательные наблюдения генерации внутренних волн проходящей интрузией распресненных вод представлены в работе [29]. Генерация интенсивных солитоноподобных внутренних волн приходящими в прибрежную зону внутренними инерционными волнами и локальными фронтами сгонно-нагонного происхождения в послештормовой период описана в работах [30, 31] на основании долговременных измерений с океанографической платформы. Отмечалась генерация цуга внутренних волн с высотами 9–13 м при проходе по шельфу компактного субмезомасштабного антициклонического вихря [32]. Появление интенсивных солитоноподобных внутренних волн возможно также при подходе в прибрежную зону внутренних бо-

ров — сильнонелинейных длинных внутренних волн [33].

Отдельно рассмотрим случаи генерации внутренних волн, связанные с атмосферными образованиями. Известны теоретические работы о генерации внутренних волн в море атмосферными фронтами [34–35]. Существует также экспериментальное наблюдение такого явления, полученное с использованием космического радиолокационного изображения шельфовой зоны Каспийского моря в работе [36], где рассматривается цуг внутренних волн в море непосредственно вблизи границы атмосферного фронта.

В нашем случае впрямую не наблюдалась ни одна из описанных выше ситуаций. Однако в период проведения исследований фиксировалось значительное изменение фоновой метеорологической обстановки, связанной с движением резко-выраженного холодного атмосферного фронта вблизи района исследований, и присутствием предшествующей фронту области пониженного атмосферного давления непосредственно в районе проведения измерений. В то время, когда цуг внутренних волн уже наблюдался, атмосферный фронт распространялся с север-запада на юго-восток и находился над сушей [24] (цуг внутренних волн двигался навстречу атмосферному фронту).

Теоретическое обоснование генерации длинных волн (внутренних сейшей) в области пониженного атмосферного давления дано в работе [35]. В нашем случае справедливо предположить, что появление области пониженного давления над районом проведения исследования до момента проведения измерений привело к генерации внутренней сейши, которая, распространяясь к берегу в районе геленджикского шельфа, испытала нелинейную трансформацию на мелководье, стала причиной возникновения цуга солитоноподобных волн больших амплитуд. Отметим, что такой механизм генерации интенсивных внутренних волн схож с генерацией внутренних солитонов на шельфе внутренними приливами или выходящими на шельф инерционными внутренними волнами. Однако в рассматриваемом нами случае изначальной причиной появления цуга интенсивных внутренних волн с высотами 9–13 м является наличие над морем барического образования, связанного с приближением резко выраженного атмосферного фронта к району проведения исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов исследований, выполненных с помощью буксируемого акустического доплеровского профилометра течений (ADCP), заякоренной гирлянды термисторов, гидрологического зонда, а также с использованием результатов обработки космического радиолокационного изображения, обнаружен цуг аномальных внутренних волн с рекордными для Черного моря высотами (16 м). Цуг двигался со стороны открытого моря к берегу и состоял из четырех ранжированных по высоте внутренних волн-возвышений, свойства которых (солитоподобная форма волновых профилей, дисперсия амплитуд, изменяющееся расстояние между гребнями и др.) свидетельствовали об их нелинейном характере.

При исследовании частотных спектров внутренних волн, рассчитанных по данным измерений, выполненных с помощью гирлянды автономных датчиков температуры, был выявлен обусловленный внутренними волнами спектральный пик, соответствующий периодам ~7...8 мин. Такой пик отсутствовал в частотном спектре фоновых колебаний термоклина.

На космическом радиолокационном изображении, полученном со спутника SENTINEL-1A, зарегистрированы поверхностные проявления внутренних волн. По пространственным спектрам фрагментов этого изображения выявлены квазимонохроматические спектральные гармоники, соответствующие средним длинам волн $\lambda_{\text{косм}} \sim 101.3$ м, что хорошо соответствует средним длинам внутренних волн, измеренным по данным ADCP ($\lambda_{\text{ADCP}} \sim 116$ м), а также длинам волн, вычисленным на основании дисперсионного соотношения ($\lambda_{\text{расч}} = 103$ м). Рассчитанная на основании измеренных гидрофизических параметров фазовая скорость внутренних волн составила $C_{\text{расч}} \sim 0.24$ м/с., которая соответствовала измеренной фазовой скорости цуга внутренних волн, составлявшей $C_{\text{изм}} \sim 0.21$ м/с. Незначительная разница (10–13%), обусловлена некоторыми различиями в условиях проведения измерений различными методами. Вертикальные компоненты скоростей орбитальных течений во внутренних волнах достигали величин $v \sim 0.20$ м/с.

Метеоданные, в том числе карты приземных барических образований, указывали на атмосферный фронт и предшествующую фронту область пониженного давления, которые явились источником генерации цуга этих аномальных

по высоте внутренних волн, ранее не наблюдавшихся в Черном море.

Источник финансирования. Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57716X0234, темы государственного задания № 0149-2019-0011, № 075-00896-19-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В.* Генерация инерционно-гравитационных волн на островном шельфе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 235–241. DOI: 10.7868/S0002351515020030
2. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Морозов Е.Г.* Регистрация из космоса и моделирование коротких внутренних волн в прибрежных зонах океана // ДАН. 2008. Т. 418. № 4. С. 543–548.
3. *Сабинин К.Д., Серебряный А.Н., Назаров А.А.* Интенсивные внутренние волны в Мировом океане // Океанология. 2004. Т. 44. № 6. С. 805–810.
4. *Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В.* Аномальная изменчивость инерционных колебаний океанских волн на Гавайском шельфе // ДАН. 2013. Т. 450. № 1. С. 100–104. DOI: 10.7868/S0869565213130173
5. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Спектральные характеристики и кинематика короткопериодных внутренних волн на Гавайском шельфе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 5. С. 641–651.
6. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории о. Оаху (Гавайи) // Океанология. 2008. Т. 48. № 5. С. 661–671.
7. *Серебряный А.Н.* Проявление свойств солитонов во внутренних волнах на шельфе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. № 2. С. 244–252.
8. *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.
9. *Keeler R., Bondur V., Vithanage D.* Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // Sea Technology. 2004. April. P. 53–58.
10. *Бондур В.Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В., Долотов Ю.С., Здорovenнов Р.Э., Петров М.П., Цидилина М.Н.* Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 827–846.
11. *Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal wa-

- ter areas // in book *Waste Water – Evaluation and Management*, ISBN 978-953-307-233-3, InTech, Croatia. 2011. P. 155–180. DOI: 10.5772/2051
12. *Bondur V.* Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. 7 p.
 13. *Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазовых территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
 14. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Ежова Е.В., Казаков В.И., Сергеев Д.А., Соустова И.А., Троицкая Ю.И.* Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Часть 1. Механизм генерации внутренних волн // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 833–845.
 15. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В.* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67.
 16. *Бондур В.Г., Зубков Е.В.* Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многозональным спутниковым изображениям высокого разрешения. Часть 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // Исследования Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54–61.
 17. *Бондур В.Г., Журбас В.М., Гребенюк Ю.В.* Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // Океанология. 2006. Т. 46. № 6. С. 805–820.
 18. *Bondur V., Tsidilina M.* Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192–195.
 19. *Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Исследования полей течений и загрязнений прибрежных вод на Гелленджикском шельфе Черного моря с использованием космических данных // Исследование Земли из космоса. 2012. № 4. С. 3–12.
 20. *Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Замшин В.В., Серебряный А.Н., Латушкин А.А., Ли М.Е., Мартынов О.В., Хурчак А.П., Гринченко Д.В.* Мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря по многоспектральным космическим изображениям // Исследование земли из космоса. 2017. № 6. С. 3–22. DOI: 10.7868/S020596141706001X
 21. *Bondur V.G., Zamshin V.V.* Comprehensive Ground-Space Monitoring of Anthropogenic Impact on Russian Black Sea Coastal Water Areas, in book K.V. Anisimov et al. (eds.), *Proceedings of the Scientific-Practical Conference "Research and Development – 2016"*, 2018. P. 625–637. DOI: 10.1007/978-3-319-62870-7
 22. *Бондур В.Г., Серебряный А.Н., Замшин В.В.* Аномальный цуг внутренних волн рекордных высот на шельфе Черного моря, генерируемый атмосферным фронтом // ДАН. 2018 (в печати).
 23. *Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 5. С. 639–648.
 24. Архив карт приземных барических образований над Европой. Интернет доступ: <http://www.wetterzentrale.de/>.
 25. *Гончаров В.В., Иванов В.Н., Кочетов О.Ю., Курьянов Б.Ф., Серебряный А.Н.* Акустическая томография на шельфе Черного моря // Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 5. С. 614–622.
 26. *Серебряный А.Н.* Эффекты нелинейности во внутренних волнах на шельфе // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26. № 3. С. 285–293.
 27. Copernicus Open Access Hub. Интернет-доступ: <https://scihub.copernicus.eu/>.
 28. *Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 375 с.: ил.; 22 см.
 29. *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.
 30. *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.
 31. *Серебряный А.Н., Иванов В.А.* Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6. № 3. С. 34–45.
 32. *Serebryany A., Rybak S., Galybin N., Mikruykov A., Popov O., Belogortsev A.* New findings in studying internal solitons in the sea and the associated acoustic effects // *Proceedings of 10 European Conference on Underwater Acoustics*. Istanbul, Turkey, 2010. P. 703–711.
 33. *Серебряный А.Н.* Сliko- и сулообразующие явления в море: внутренние волны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 275–286.
 34. *Черкесов Л.В.* Гидродинамика поверхностных и внутренних волн. Наукова Думка, 1976.
 35. *Доценко С.Ф., Миклашевская Н.А.* Генерация поверхностных и внутренних волн в ограниченном

- бассейне перемещающимся барическим фронтом // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 3. С. 3–18.
36. 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.

Intensive internal waves having anomalous heights in the black sea shelf area

V.G. Bondur¹, A.N. Serebryany^{1,2}, V.V. Zamshin¹,
L.L. Tarasov¹, E.E. Khimchenko^{1,2}

¹ AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring
Gorokhovskiy per., 4, Moscow, 105064, Russia

² Shirshov Institute of Oceanology
Nakhimovskiy prosp., 36, Moscow, 117997, Russia
E-mail: office@aerocosmos.info

Received: 19.07.2018

Revised version received: 27.09.2018

Here we describe the study of a train of internal waves having ~16 m heights and 101–131 m length and being abnormally large for the Black sea. The measurements were conducted in the water area near the city of Gelendzhik using a towed Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), *RBR concerto* hydrological mini-probe, moored thermistor string, as well as by spatial spectral analysis of a radar satellite image obtained at the moment of sea truth measurements. Registered anomalous internal waves had a non-linear character (soliton-like shapes of wave profiles, amplitude dispersion, changing distance between the crests, etc.). Vertical components of orbital current velocities in the internal waves reached 0.20 m/s. Quasimonochromatic spectral maxima due to surface manifestations of internal waves having lengths corresponding to those measured by ADCP were registered using the satellite radar image. The source of this internal wave train with such an anomalous amplitude were a cold atmospheric front and related low-pressure region.

Keywords: internal waves, non-linear waves, continental shelf, ADCP, thermistor string, remote sensing, radar imagery, atmospheric front