

УДК 551.46 + 681.3

А.Н.Серебряный*****, В.А.Иванов**, А.С.Кузнецов***,
Е.Е.Химченко*****, О.Ю.Лаврова*****, Ю.В.Симонова***

**Акустический институт им. акад. Н.Н.Андреева, г.Москва*

***Морской гидрофизический институт, г.Севастополь*

****Экспериментальное отделение*

Морского гидрофизического института, пгт.Кацивели

*****Институт океанологии им. П.П.Шириова РАН, г.Москва*

******Институт космических исследований РАН, г.Москва*

ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН И ТЕЧЕНИЙ В ЧЕРНОМ МОРЕ С ПЛАТФОРМЫ МОРСКОГО ГИДРОФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ЛЕТОМ 2014 Г.

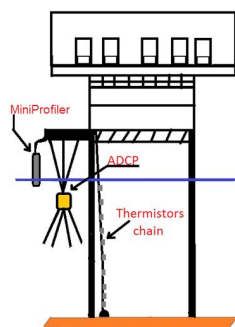
Дан обзор результатов динамического эксперимента по комплексному исследованию течений и внутренних волн. Выполнены цикл измерений комплексом специальной аппаратуры на стационарной океанографической платформе и площадная съемка полигона с маломерного судна. Получены новые экспериментальные данные по динамике инерционных и короткопериодных внутренних волн. Проведено сопоставление результатов исследований с фактами фотофиксации сликовых полос на поверхности моря у платформы и обсуждается связь с радиолокационным изображением спутника *Landsat*.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *внутренние волны, фронты, стационарная платформа, инерционные волны, течения, шельф, ADCP.*

В летнее время на протяжении последних лет нами проводятся регулярные экспедиционные исследования на Черноморском гидрофизическом полигоне у мыса Кикинеиз и стационарной океанографической платформы с целью изучения особенностей динамики вод прибрежной зоны с использованием доплеровского акустического профилометра течений (*ADCP*). При проведении измерений и анализе данных особое внимание уделяется внутренним волнам. Несмотря на длительную историю исследований внутренних волн в этом районе и богатый накопленный материал [1] все еще остаются задачи, которые необходимо решать. Если раньше при внутриволновых исследованиях делался акцент на измерение параметров внутренних волн антеннами распределенных датчиков температуры [2], то сейчас на передний план вышла задача исследования связи поля внутренних волн в прибрежной зоне с фоновыми течениями, а также более детальные исследования по изучению процессов, ведущих к генерации интенсивных внутренних волн, в том числе внутренних боров. Помимо профилометра типа *ADCP*, который работает в непрерывном режиме, будучи установленном на платформе, измеряя направление и скорости течения от поверхности до дна и интенсивность обратного рассеяния звука по глубине, мы проводим измерения среды контактными методами. В следующем разделе представлена методика измерений и используемая аппаратура.

Методика проведения измерений. Работы на платформе проводились

© А.Н.Серебряный, В.А.Иванов, А.С.Кузнецов,
Е.Е.Химченко, О.Ю.Лаврова, Ю.В.Симонова, 2014



Р и с . 1 . Схема размещения приборов на платформе во время проведения измерений.

в период с 12 по 24 июля 2014 г. В этот период времени велись (рис.1): непрерывная многосуточная регистрация данных о течениях по всей толщине водного слоя от поверхности до дна с помощью *ADCP*, непрерывные измерения течений гирляндой из 6 автономных приборов МГИ-1308, непрерывные измерения изменчивости температурной структуры водной толщи и внутренних волнах гирляндой из 10 автономных регистраторов темпера-

туры *DST* фирмы *Starr-oddi*; ежечасные зондирования минизондом *SVP* с регистрацией вертикальные профили температуры и скорости звука.

ADCP “*RioGrande 600 kHz*” измеряет две горизонтальные и вертикальную составляющие течений в морской среде относительно дна в диапазоне скоростей до 3 м/с. Погрешность измерения $\pm 0,25$ % от фактической скорости при разрешении 1 мм/с. Скорость движения воды измеряется в 128 ячейках высотой 50 см (либо 1 м) каждая, охватывающих среду по глубине.

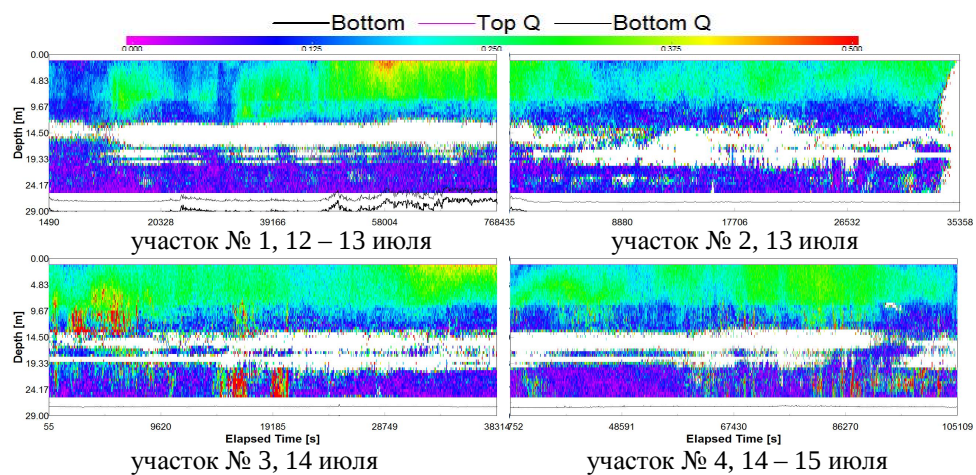
Минизонд *miniSVP* измеряет температуру с точностью 0,01 °C (разрешение 0,001 °C), скорость звука с точностью 0,02 м/с (разрешение 0,001 м/с) и глубину с точностью 0,05 % от всей шкалы (разрешение 0,001 %).

Гирлянда измерителей температуры *DSTcenti* фирмы “*Star-Oddi*” (рис.1) была опущена с мористого юго-западного угла платформы в слой от 5 до 29 м. Разрешение датчиков температуры 0,03 °C, точность 0,1 °C. Измерители работали синхронно при дискретности по времени равной 30 с.

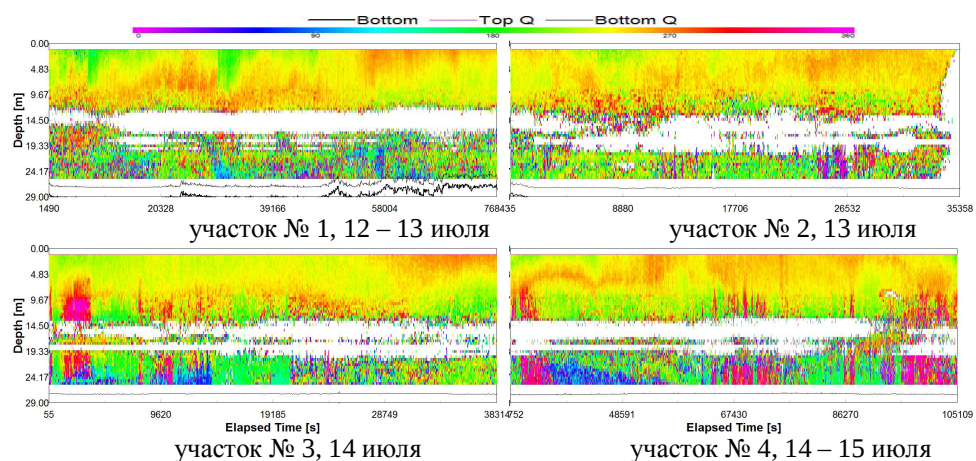
Результаты измерений. Экспедиционные работы были обеспечены ежедневным набором фоновых гидрометеорологических данных, включая: направление и скорость ветра, температуру воздуха и поверхности моря, высоту и направление поверхностных волн с интервалом 3 ч. Наблюдения в 2014 г. проводились в июле при жаркой погоде. Дневная температура изменялась в пределах от 23 до 29 °C. Преобладал слабый ветер преимущественно западных, северо-западных румбов, однако 13, 18 и 20 июля ранним утром (4:00 – 5:00 утра) наблюдалось усиление северного ветра (с берега).

19 июля в 20:00 прошел сильный дождь. Температура поверхности воды в течение экспедиции изменялась в пределах 24 – 26 °C.

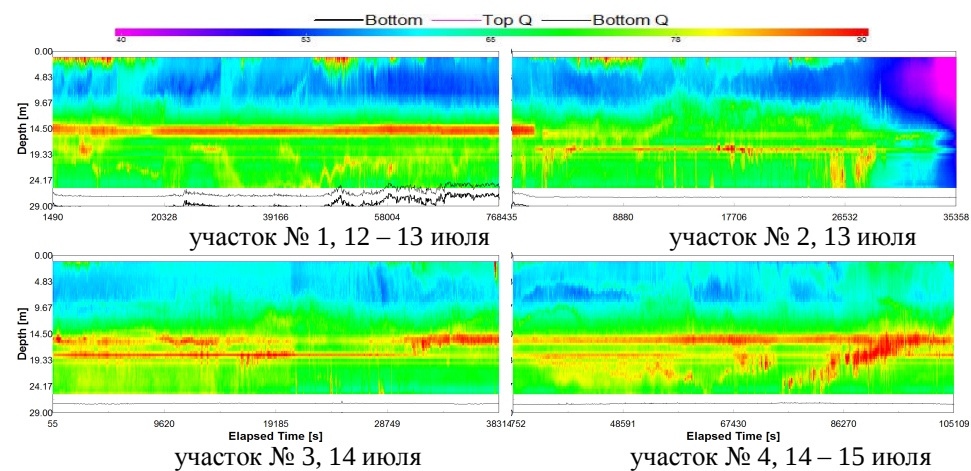
Изменчивость режима течений. Наблюдения доплеровским измерителем течений продолжались в течение почти 12 суток: запись началась 12 июля в 15:07 и велась до 23 июля в 19:36. На рис.2 и 3 представлены данные о модуле скорости и направлении течений (соответственно) с 12 по 15 июля. В наблюдениях 2014 г. скорость течения изменялась в пределах 0,25 – 0,5 м/с, а среднее фоновое значение было около 0,25 м/с. Направление течения в основном сохраняло западную ориентацию. На участке 5 наблюдалась смена направленности течения с западных на северо-западные румбы. Усиление поверхностного течения 12 – 13 июля на участке 1 было связано с усилением ветра. В некоторые моменты на записи появлялись короткие участки с необычно большим усилением скорости течения. Эти особенности по нашему мнению были связаны с попаданием в зону облучения акустического профилометра плотных стай рыб.



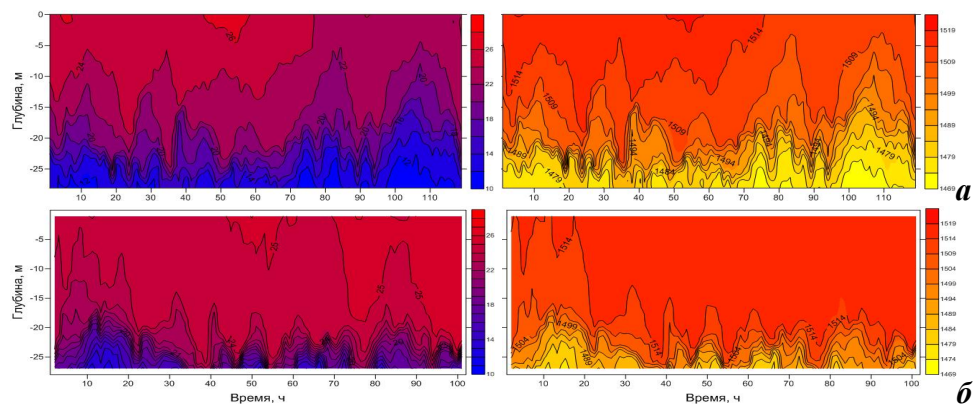
Р и с . 2 . Амплитуда течений (м/с) по данным ADCP с 12 по 15 июля 2014 г.



Р и с . 3 . Направление течений (°) по данным ADCP с 12 по 15 июля 2014 г.



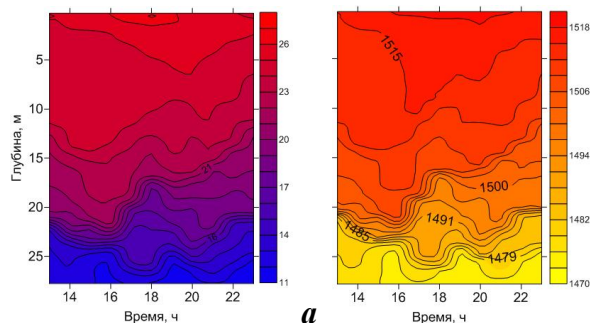
Р и с . 4 . Вариации акустического сигнала обратного рассеяния ADCP с 12 по 15 июля 2014 г.



Р и с . 5 . Временной разрез температуры и скорости звука за период 14 – 19 (а) и 19 – 23 (б) июля.

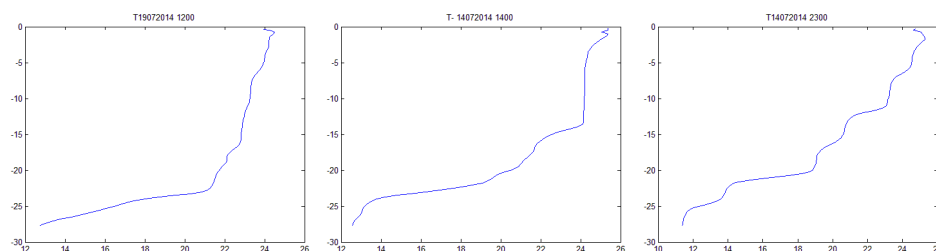
Вариации интенсивности обратно рассеянного акустического сигнала. Рассмотрим данные интенсивного обратного рассеянного акустического сигнала. Эти данные представлены на рис.4, причем вся информация показана на тех же временных участках, что рассматривались и в данных течений. В течение первых двух дней исследований наблюдалась относительно чистая вода в верхнем слое моря (от поверхности и до 10 м глубины), характеризующаяся ослабленным акустическим рассеянием. Как и в предыдущие годы, также отмечалось характерное увеличение области повышенного рассеяния в ночное время и его уменьшение в дневное, вызванное активностью биологических рассеивателей. На участках 1, 4 и 5 можно отметить характерные колебания водной толщи с периодами в несколько десятков минут. В то же время 17-часовые квазиинерционные колебания водной толщи на записи сигнала обратного рассеяния не так ярко выражены, как в предыдущие годы наблюдений. Тем не менее, их проявление можно отметить на участках 1, 4 и 5.

Измерения вертикальных профилей температуры и скорости звука. Ежечасные зондирования профилометром SVP от поверхности до дна начались 12 июля в 19:00 и продолжались до 23 июля. На рис.5 представлены временные разрез температуры и скорости звука за период измерений с 14 по 19 июля и с 19 по 23 июля. Видно, что термоклин вначале измерений находился на глубине 17 – 20 м, после 17-го июля слой скачка температуры и



Р и с . 6 . Временные разрез температуры (а) и скорости звука (б) 14 июля 2014 г., на которых видна внутренняя волна 2-ой моды.

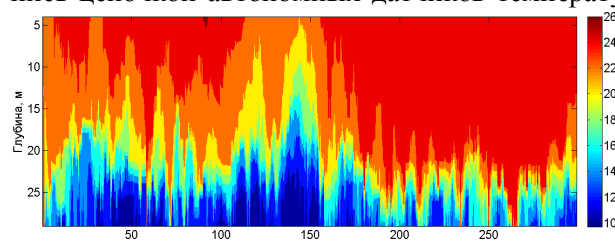
и скорости звука поднимается на глубину 15 м, в этот же период наблюдается усиление ветровой активности (порывы северного ветра до 20 м/с). После 19-го июля наблюдается общее потепление температуры воды, термоклин занимает положение на глубине 24 – 25 м. Скорость звука при этом увеличилась до 1504 м/с. Рассматривая весь



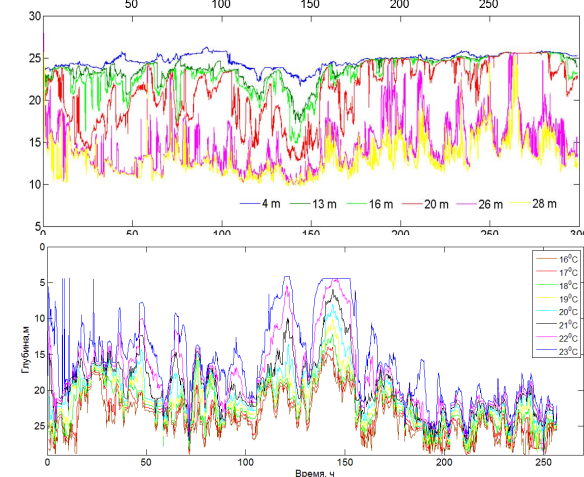
Р и с . 7. Примеры вертикальных профилей температуры со следами тонкой структуры.

период наблюдений, можно отметить длиннопериодные вертикальные смещения термоклина с периодом близким к 17 часам (локальному инерционному периоду), что указывает на подход в прибрежную зону квазиинерционных внутренних волн. Интересно, что при более детальном рассмотрении отдельных участков записей, выделяются характерные противофазные короткопериодные колебания (рис.6). Во время этого события, на глубине от 24 до 21 м температура поднимается с 16 до 21 °С и в тоже время происходит ее понижение с 16 до 12 °С на глубине от 24 до 27 м. Скорость звука при этом изменялась от 1491 до 1500 м/с и от 1491 до 1479 м/с соответственно. Похожие противофазные колебания ранее интерпретировались нами как проявление внутренних волн второй моды (типа волн растяжения). Помимо особенностей временного хода термоклина можно отметить наблюдавшееся присутствие тонкой структуры в профилях температуры и скорости звука (рис.7), происхождение которой можно будет установить только после детального анализа данных.

Измерения гирляндой температурных датчиков. Непрерывная запись цепочкой автономных датчиков температуры с дискретностью 30 сек



Р и с . 8. Временной разрез записи, выполненный температурными датчиками за весь период измерений с 13 по 25 июля 2014 г.



Р и с . 9. Колебания температуры водной толщи на отдельных горизонтах по записям гирлянды термодатчиков в июле 2014 г.

Р и с . 10. Смещение изотерм по глубине, 13 – 23 июля 2014 г.

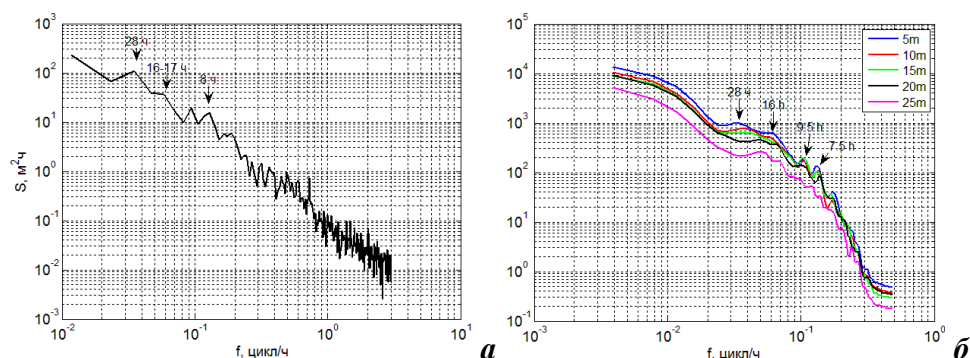


Рис. 1.11. Спектры, построенные по данным смещений изотермы 19 °С, 13 – 23 июля 2014 г. (а) (длина ряда, по которому велся расчет, 1540, дискретность 10 мин) и по данным измерителя течений МГИ-1308, 26 июня – 20 августа 2014 г. (б).

началась в 00:00 13 июля и продолжалась до 11:00 25 июля. На рис.8 представлен реализация записей температурных датчиков по глубине за весь период наблюдений. Из рис.8 видно, что в начале измерений термоклин находился на глубине около 20 м, затем поднялся до глубины 15 м, после 19 июля его положение оказалось на 25 м. Как и по данным зондирования, по записям температурных датчиков хорошо прослеживаются 17-часовые колебания слоя скачка температуры. Кроме того, такие записи позволяют регистрировать и более детально изучать короткопериодные внутренние волны. На рис.9 приведены данные записи температуры водной толщ на отдельных горизонтах за весь период наблюдений в июле 2014 г., из которой хорошо видно частое присутствие не только длиннопериодных, но и короткопериодных колебаний термоклина.

На рис.10 – 12 предоставлены результаты специальной обработки натурных данных и оценки энергетических спектров колебаний вод.

Результаты пространственной съемки. 25 июля профилометр ADCP был установлен на маломерном судне и была проведена пространственная съемка полигона в окрестностях платформы. Утром 25 июля была тихая погода, солнечно. Судно с включенным ADCP прошла с мелководья мимо платформы и вышла на разрез в глубоководную часть. Затем запись была прер-

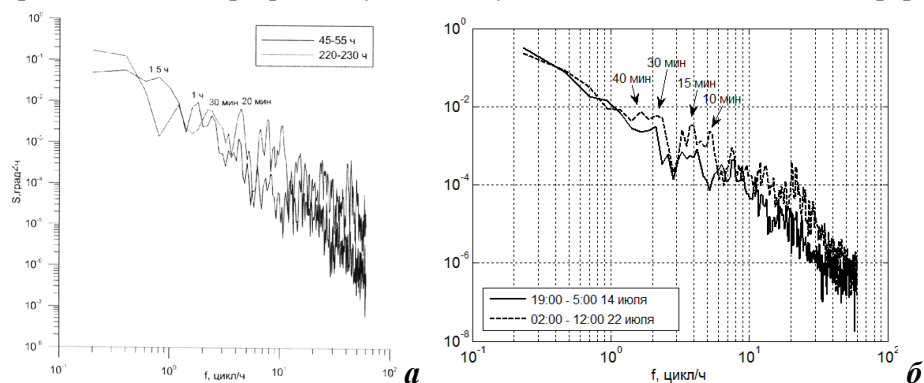
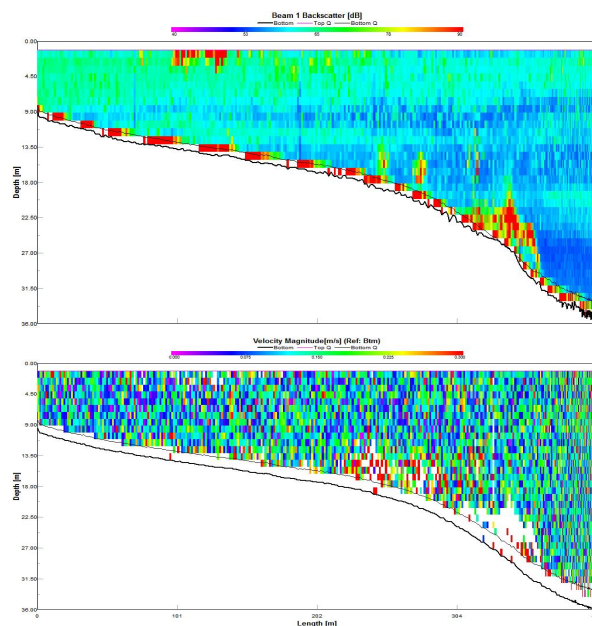


Рис. 1.12. Спектры короткопериодных колебаний температуры по данным "смоделированного" РДТ для участков между 45 – 55 и 220 – 230 ч от начала измерений (а) и 14 и 22 июля (б).



Р и с . 1 3 . Запись *ADCP*, полученная при проведении пространственного разреза через платформу 25 июля 2014 г. Интенсивность обратного рассеяния (*вверху*) и амплитуда скорости течения (*внизу*).

вана и после небольшого перерыва была продолжена уже с мористой относительно платформы стороны. В точке было сделано зондирование *SVP* и дальше сделан разрез до платформы с проходом слева от последней (движение к берегу). На рис.13 показаны распределение интенсивности обратного рассеяния

сигнала и силы течения по толще моря на разрезе. По данным рассеяния хорошо прослеживается положение термоклина ниже горизонта 18 м, а также скачек плотности в приповерхностном слое (ниже 9 м). Эти особенности профиля вертикальной структуры разделены двумя выраженными слоями ослабленного рассеяния, т.е. относительно чистой воды. В придонной



Р и с . 1 4 . Пример уединенной полосы в часто наблюдаемом месте напротив горы Кошка (*а*); фотоснимок с тремя параллельными берегу сликовыми полосами (*б*).



Рис.15. Проявление цуга внутренних волн на изображении *OLI Landsat-8*.

части около платформы скопление рассеивателей, по-видимому, биологического происхождения (область красно-желтого цвета). Мористее платформы – глубины более 29 м в придонном слое холодная вода с малым числом рассеивателей. Течения в момент съемки не превышали 0,1 м/с при западном направлении.

Поверхностные проявления, наблюдаемые с платформы и спутниковый снимок *Landsat*. Во время измерений в июле 2014 г. было много дней тихой погоды, таким образом создавались благоприятные условия для наблюдения с платформы различного вида процессов, создающих поверхностные проявления на море в виде сликовых полос (уединенных и объединенных в группы). Известно, что сликовые полосы на поверхности моря могут быть вызваны различными процессами в море, но наиболее частой причиной служат внутренние

волны. После необходимой обработки можно будет связать некоторые из наблюдавшихся полосчатых структур с контактными записями внутренних волн. На рис.14, а приведен пример уединенной полосы в часто наблюдаемом месте напротив горы Кошка. Происхождение этой сликовой полосы, скорее всего, связано с усилением встречных вдольбереговых течений. На рис.13, б представлен фотоснимок с тремя параллельными берегу сликовыми полосами, происхождение которых мы можем связать с движущимся к берегу цугом короткопериодных внутренних волн. После проведения работ на платформе нами был выполнен поиск космических снимков района южного берега Крыма, сделанных в период середины июля 2014 г. Был найден SAR снимок спутника *Landsat* от 14 июля, на котором хорошо виден пакет развитых внутренних волн в открытом море на достаточно большом удалении от берега. В период с 3 по 28 июля 2014 г. над акваторией района у южного берега Крыма съемка со спутника *Landsat-8* осуществлялась 6 раз. В этот период район попадает в зону солнечного блика, что позволяет наиболее отчетливо наблюдать поверхностные проявления внутренних волн. На изображениях видимого диапазона *OLI Landsat-8* внутренние волны проявляются в виде более светлых и темных чередующихся полос, так же как на радиолокационных изображениях. Практически все 6 изображений *OLI Landsat-8* содержали проявления внутренних волн, однако часть из них являлись поверхностными проявлениями внутренних волн в атмосфере. Для

этого района характерны проявления мелкомасштабных атмосферных внутренних волн, что затрудняет их различение от внутренних волн в море. Поэтому проведение подспутниковых измерений параметров внутренних волн является насущной необходимостью. На рис.14 представлен фрагмент бражения *OLI Landsat-8*, полученного в панхроматическом режиме (8 спектральный канал, разрешение 15 м). На рисунке хорошо виден пакет развитых внутренних волн на достаточно большом удалении от берега. Цуг внутренних волн распространяется на юго-восток широким фронтом, в цуге около 10 волн, их длина около 500 м. По создаваемому контрасту на поверхности можно предположить, что высота внутренних волн этого цуга лежит в пределах 5 – 10 м. Практически в том же районе был выявлен пакет внутренних волн с близкими параметрами на изображении от 28 июля 2014 г.

Заключение. За период наблюдения в июле 2014 г. преобладало западное вдольбереговое течение средней силы, а расположение термоклина имело тенденцию быть ближе ко дну чем к поверхности моря. Данные течений и зондирований выявили присутствие в прибрежной зоне квазиинерционных внутренних волн с периодом около 17 ч. По результатам записи термисторной цепочки проанализированы короткопериодные колебания термоклина. Выделены внутренние волны первой и второй моды. Для дополнительного анализа характеристик внутренних волн района привлечены данные дистанционного спутникового зондирования, по которым сделаны оценки основных параметров внутренних волн.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-45-01646).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Серебряный А.Н., Иванов В.А.* Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика.– 2013.– № 3.– С.34-45.
2. *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.

Материал поступил в редакцию 02.12.2014 г.

АНОТАЦІЯ Дан огляд результатів динамічного експерименту з комплексного дослідження течій і внутрішніх хвиль. Виконані цикл вимірювань комплексом спеціальної апаратури на стаціонарній океанографічній платформі і майданна зйомка полігону з маломірного судна. Отримано нові експериментальні дані по динаміці інерційних і короткоперіодних внутрішніх хвиль. Проведено зіставлення результатів досліджень з фактами фотофіксації слікових смуг на поверхні моря та обговорюється зв'язок з радіолокаційним зображенням супутника *Landsat*.

ABSTRACT The results of dynamic experiment on complex research of currents and internal waves in summer 2014. A series of measurements by special equipment on a stationary oceanographic platform and area survey with a small boat were carried out. New experimental data on the dynamics of inertial and short-period internal waves are received. A research results are compared with the facts photofixation of slick strips on the sea surface at the platform during the experiment, and the relationship between the radar image the Black Sea to the south of Crimea by satellite *Landsat*.