

УДК 551.465

## СИНОПТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ В ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ г. СОЧИ

© 2014 г. О. А. Короткина<sup>1,2</sup>, П. О. Завьялов<sup>1</sup>, А. А. Осадчиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва  
e-mail: peter@ocean.ru, osadchiev@ocean.ru

<sup>2</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва  
e-mail: oly\_sa@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2012 г., после доработки 04.03.2013 г.

Исследована синоптическая изменчивость прямых, высокоразрешающих по времени (дискретность 10 мин) измерений скорости придонных и поверхностных течений, скорости течения реки Мзымта, а также скорости ветра в прибрежной зоне г. Сочи в мае 2009, 2010, 2011 и 2012 гг. На основе полученных данных выполнен спектральный анализ Фурье и гармонический анализ как низкочастотных, так и высокочастотных составляющих изменчивости скорости течений и ветра. В результате анализа обнаружена сходная структура главных периодов колебаний течений в низкочастотном спектре, а также значимые периоды колебания течений в высокочастотном диапазоне. Кроме того изучены внутренние волны, генерируемые плуомом.

DOI: 10.7868/S0030157414040078

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья посвящена изучению синоптической изменчивости течений в районе влияния стока реки Мзымта в прибрежной зоне Адлерского района города Сочи. Основное внимание в статье уделено изменчивости в области малых временных (начиная с первых десятков минут) и пространственных (начиная с сотен метров) масштабов.

Исследования основаны на данных высоко-разрешающих по времени измерений скоростей придонных и поверхностных течений, выполнявшихся с дискретностью в 10 минут. Измерения были выполнены в ходе четырех экспедиций, проведенных в 2009, 2010, 2011 и 2012 гг. Район работ находится на внутренней части шельфа у восточной оконечности российского сектора черноморского побережья (рис. 1). Узкий шельф, ширина которого не превышает здесь нескольких километров, находится под значительным влиянием берегового речного стока: в этом районе в море впадает самая крупная из рек черноморского побережья России р. Мзымта (среднегодовой расход — 1.56 км<sup>3</sup>), а также несколько малых рек (Хоста, Кудепста, Херота). Измерения продолжительностью 5–6 суток проводились ежегодно в одно и то же время года (во второй половине мая), в период весеннего половодья.

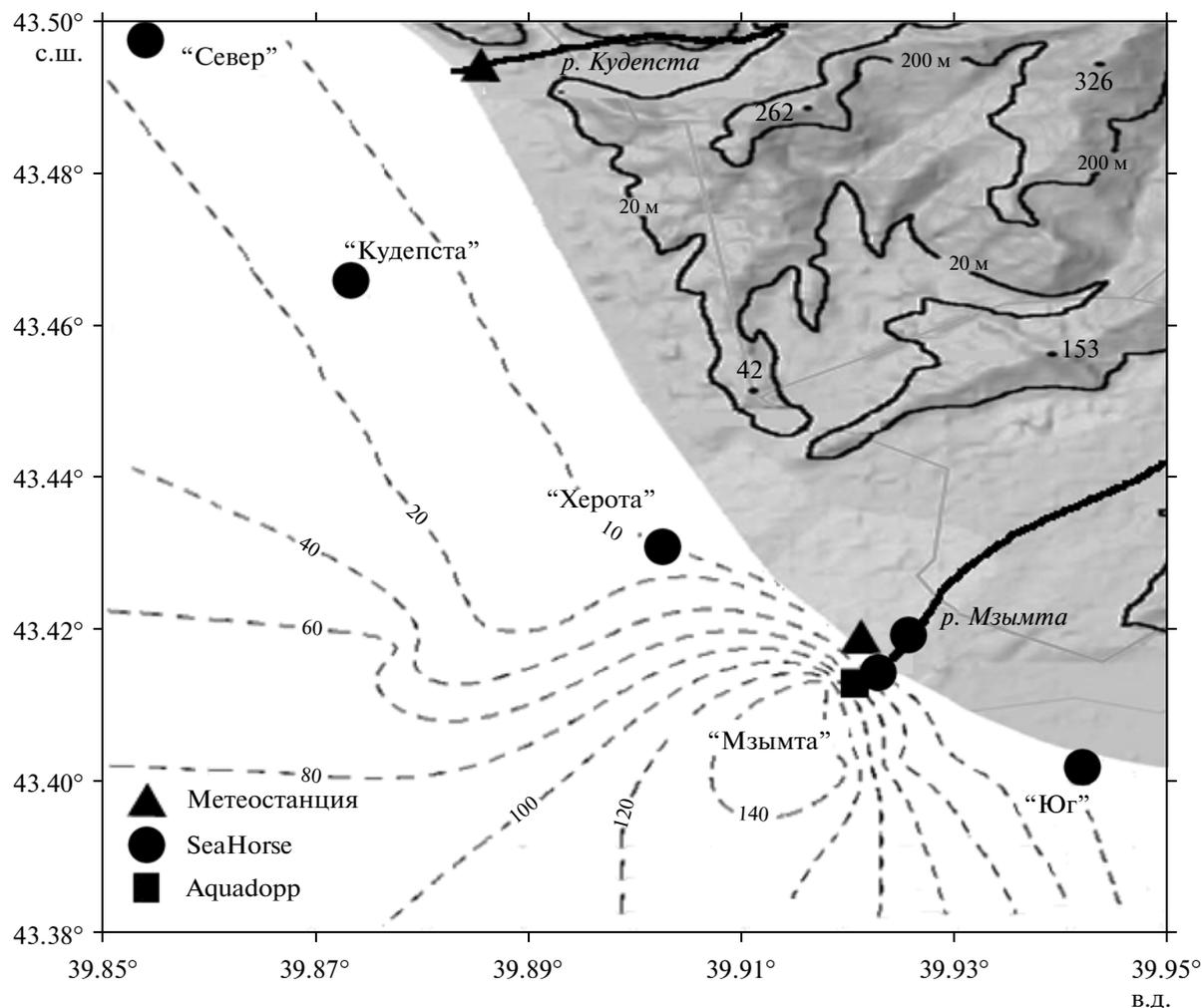
В настоящей статье мы описываем результаты анализа данных измерений скоростей течений и ветра, полученных в экспедициях за 2009–2012 гг. Эта работа может рассматриваться как продолже-

ние и расширение нашей статьи [1], в которой были опубликованы результаты подобной обработки измерений за 2009 г. Объединяя данные за все четыре года наблюдений, мы переходим к изучению общих закономерностей изменчивости течений в прибрежной акватории г. Сочи и ее возможной связи с изменчивостью ветра. Отдельно обсуждается вопрос о внутренних волнах, возможно, порождаемых нестационарными движениями речного плуома.

### 2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Измерения выполнялись на полигоне, расположенном в прибрежной акватории Адлерского района г. Сочи между устьями рек Кудепста и Мзымта. В 2009 г. измерения проводились с 20 по 27 мая, в 2010 г. — с 26 по 29 мая, в 2011 г. — с 25 по 30 мая и в 2012 г. — с 16 по 19 мая. Таким образом, все четыре периода измерений соответствовали практически одинаковым условиям сезонного цикла, характеризующимся весенним прогревом верхнего слоя моря и паводковым стоком рек.

Во время полевых работ использовались заякоренные станции, оснащенные механическими измерителями придонных течений типа SeaHorse [13]. Измеритель SeaHorse представляет собой обладающий небольшой положительной плавучестью цилиндр, один конец которого крепится эластичным жгутом к грузу на дне, а на втором, свободном конце, закрепляется датчик углов наклона Hobo Pedant G Data Logger UA-004-64. При отсутствии придонного течения цилиндр



**Рис. 1.** Карта района работ и расположения заякоренных станций и метеостанций. Пунктирными линиями в море показаны изобаты (м), а сплошными линиями на суше — изогипсы высоты над уровнем моря (м).

расположен вертикально. Под воздействием течения цилиндр отклоняется от вертикального положения, и датчик измеряет угловое смещение, на основе которого по известной калибровочной зависимости затем вычисляются компоненты скорости придонного течения. Заякоренные станции были установлены в 3 точках в 2009, 2011 и 2012 гг. и в 5 точках в 2010 г. (рис. 1).

Во время всех экспедиций измерения проводились в точках “Юг” (43.401° с.ш., 39.941° в.д.; глубина — 15 м, расстояние до берега — 200 м) и “Мзымта” (43.413° с.ш., 39.922° в.д.; глубина — 8 м, расстояние до берега — 200 м), расположенной напротив устья р. Мзымта. Последняя станция, кроме придонного измерителя течений SeaHorse, в 2009 и 2011 гг. была также оборудована акустическим измерителем течения Nortek Aquadopp, установленным на глубине 2 м под поверхностью моря. Данный прибор измеряет доплеровский сдвиг частоты, возникающий при рас-

пространении звука в движущейся среде, и на основе этого измерения вычисляет скорость течения. В 2009 и 2010 гг. работала также заякоренная станция “Север” (43.499° с.ш., 39.855° в.д.; глубина — 13 м, расстояние до берега — 1100 м), а в 2010, 2011 и 2012 гг. — станция “Херота” (43.429° с.ш., 39.906° в.д.; глубина — 8 м, расстояние до берега — 500 м) в районе устья р. Херота. В 2010 г. на траверсе устья р. Кудепста была установлена заякоренная станция “Кудепста” (43.463° с.ш., 39.870° в.д.; глубина — 14 м, расстояние до берега — 2000 м) (рис. 1). Кроме того, во время полевых работ в 2010–2012 гг. с целью оценки изменчивости речного стока велись измерения скорости течения р. Мзымта непосредственно в русле реки. Для этого измеритель SeaHorse устанавливался на дне реки на глубине 1–1.5 м, в 60–100 м от места ее впадения в море. Скорости течений на всех станциях регистрировались с дискретностью в 10 мин. Одновременно с такой же временной дискретностью проводи-

**Таблица 1.** Периоды (ч) главных гармоник низкочастотной составляющей вдольбереговой компоненты скорости течения за периоды измерений в 2009–2012 гг.

Год	Название станции					
	“Мзымта”дно	“Юг” дно	“Север” дно	“Херота”дно	“Мзымта”поверхность	“Кудепста” дно
2009	17.2	17.3	17.6	–	16.8	–
2010	18.4	25.1	17.6	23.3	–	22.0
2011	23.0	22.9	–	15.7	15.5	–
2012	17.2	16.5	–	20.8	–	–

лись измерения скорости и направления ветра. В 2009 и 2010 гг. они выполнялись с помощью двух портативных автоматических метеостанций, установленных на берегу моря около устьев р. Кудепста и р. Мзымта. Расстояние между ними составляло 8 км. Полученные по этим данным оценки пространственных неоднородностей полей местного ветра, а также их влияния на режим течений приведены в статье [1]. В 2011 и 2012 гг. использовалась одна метеостанция, установленная у устья р. Мзымта.

В данной статье мы рассматриваем по отдельности “низкочастотную” и “высокочастотную” изменчивость течений и ветра. Конечно, граница между этими спектральными интервалами является условной и может быть определена произвольным образом. В данном случае к высокочастотным (низкочастотным) мы относим изменения с характерными периодами менее (более) 6 ч.

### 3. АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕЧЕНИЙ

**3.1. Средние и максимальные значения.** Как указывалось выше, измерения течений в *приповерхностном слое* проводились во время экспедиций в 2009 и 2011 гг. на станции “Мзымта”. Отмеченные скорости приповерхностных течений были достаточно велики, максимальные значения достигали 63 см/с в 2009 г. и 48 см/с в 2011 г., а средняя скорость составила 11 см/с в 2009 г. и 8 см/с в 2011 г.

Наблюдения за скоростью *придонных* течений велись во время экспедиций в 2009–2012 гг. на пяти станциях (пример серий значений скорости придонных течений для станции “Мзымта” приведен на рис. 2). Максимальная скорость придонного течения на станции “Север” составила 19 см/с в 2009 г. и 29 см/с в 2010 г., при соответствующих средних значениях 6.0 см/с в обоих случаях. На станции “Кудепста” (2010 г.) максимальная скорость составила 38 см/с, а средняя –

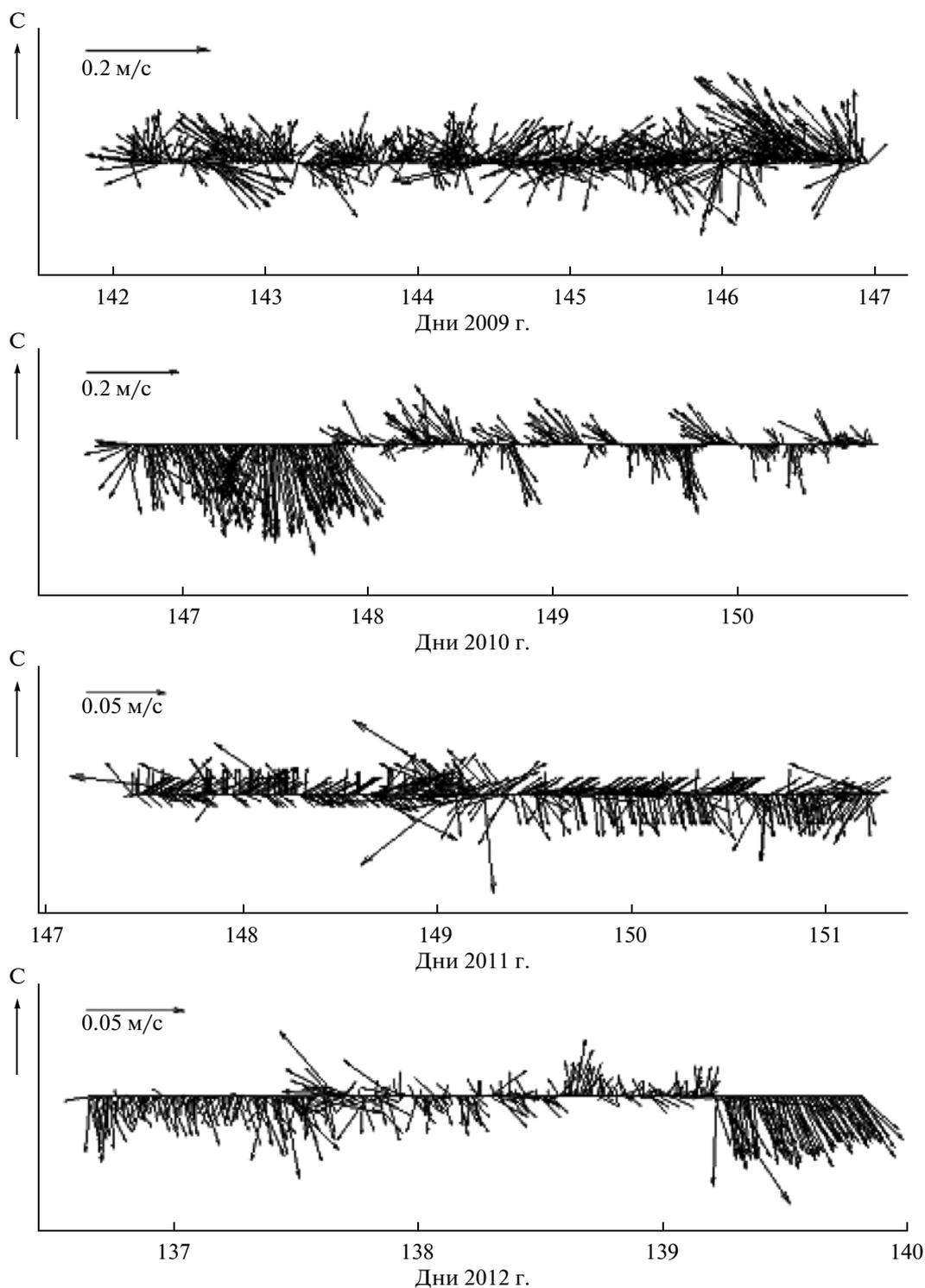
5.9 см/с. Для станции “Херота” отмечены максимальные значения 29 см/с (2010 г.), 29 см/с (2011 г.) и 26 см/с в 2012 г. при соответствующих средних 5.3 см/с, 5.3 см/с и 5.6 см/с. Для станции “Мзымта” отмечены следующие максимальные и средние значения скорости: 24 см/с и 6.6 см/с в 2009 г., 24 см/с и 3.7 см/с в 2010 г., 31 см/с и 13.7 см/с в 2011 г., 10 см/с и 2.0 см/с в 2012 г. Наконец, для станции “Юг” аналогичные значения составили 22 см/с и 6.7 см/с в 2009 г., 41 см/с и 8.0 см/с в 2010 г., 44 см/с и 5.0 см/с в 2011 г. и 26 см/с и 4.0 см/с в 2012 г.

Хорошо видно, что максимальные и средние значения скорости приповерхностного течения, в целом, значительно выше, чем соответствующие значения для придонных течений.

**3.2. Низкочастотная изменчивость скорости течения.** Как отмечалось выше, низкочастотной составляющей временного ряда данных в этом разделе и далее в статье считался результат фильтрации исходного временного ряда с помощью 6-часового скользящего среднего.

Были вычислены спектры Фурье для выделенной таким образом низкочастотной части изменчивости вдольбереговых компонент поверхностных и придонных течений за периоды измерений в 2009–2012 гг. (рис. 3–6). В районе исследований ориентация линии берега практически совпадает с меридиональным направлением (отклонение не более 10°), поэтому за вдольбереговую компоненту скорости принималась ее меридиональная составляющая. Все найденные главные периоды колебаний для 2009 и 2012 гг. попали в интервал 14–19 ч. Инерционный период для данной ширины составляет 17.6 ч.

Для более детального анализа спектральной структуры низкочастотной изменчивости вдольбереговых компонент скорости течения для каждой из серий была подобрана гармоническая функция вида  $c(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$ , обеспечивающая наименьшее среднеквадратическое отклонение от заданного временного ряда. Периоды

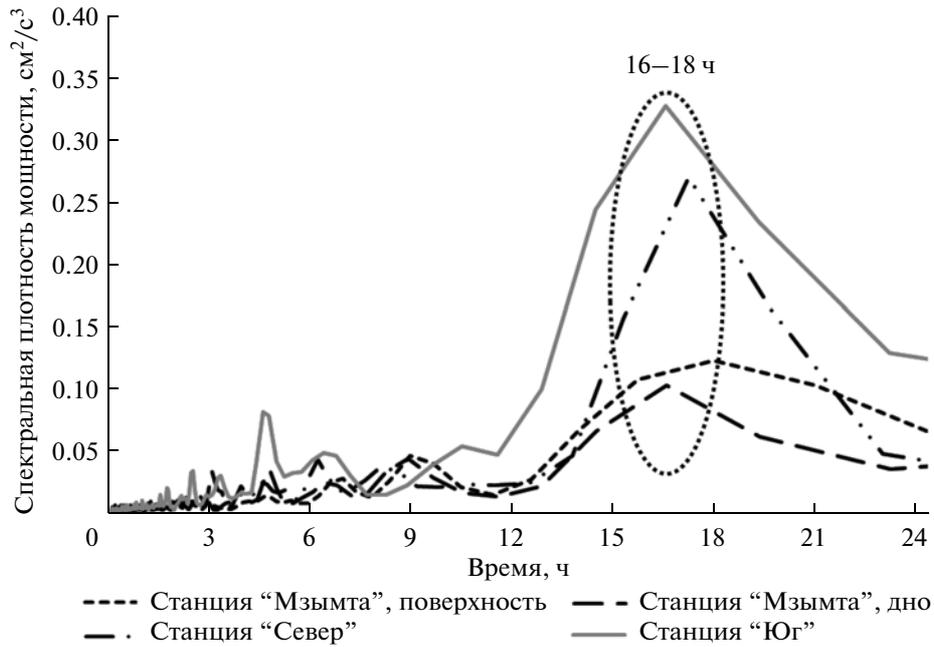


**Рис. 2.** Серии скорости придонного течения, измеренные на станции "Мзымта" за периоды измерений в мае 2009–2012 гг.

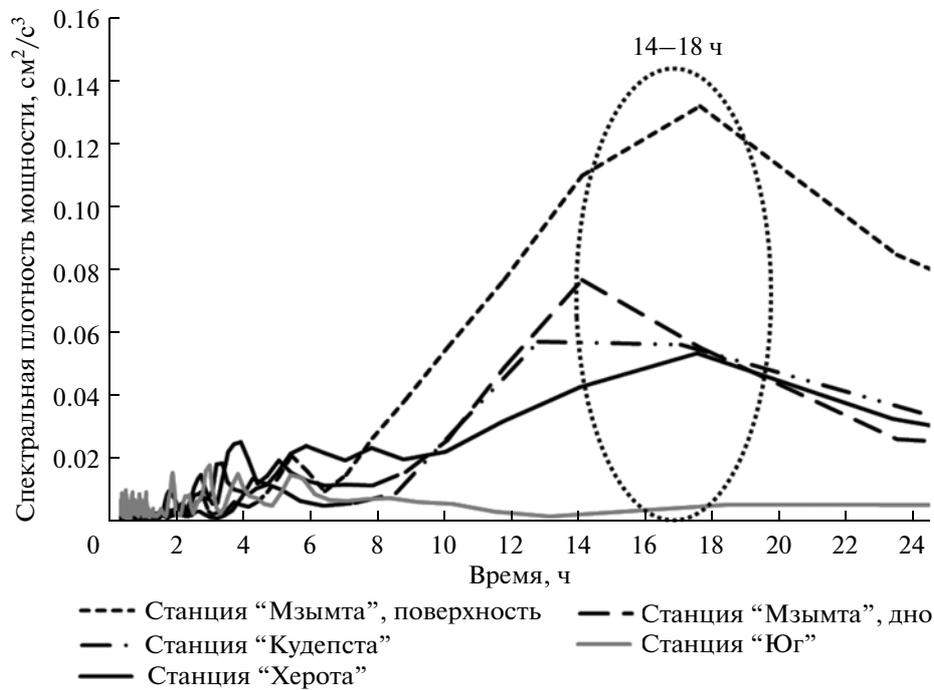
$T = 2\pi/\omega$  этих главных гармоник для каждой из серий представлены ниже в табл. 1.

Все найденные главные гармоники для рядов данных четко разделяются на две группы. Первую группу составляют функции с периодами колеба-

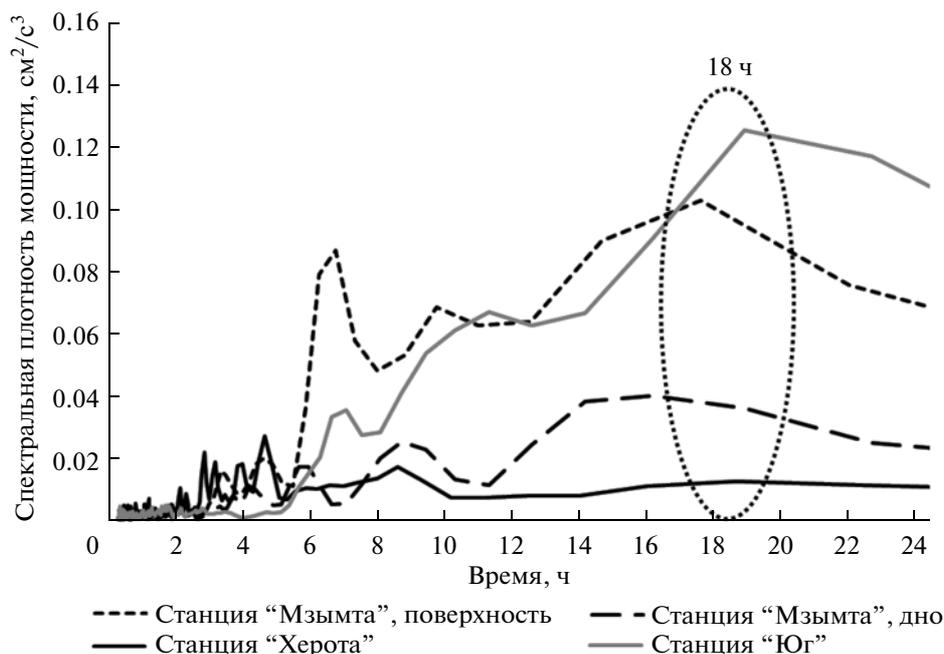
ний близкими к 17.6 ч, что указывает на связь с инерционными колебаниями. Периоды колебаний функций из второй группы близки к 24 ч, что может быть связано с бризовой составляющей ветра (см. ниже).



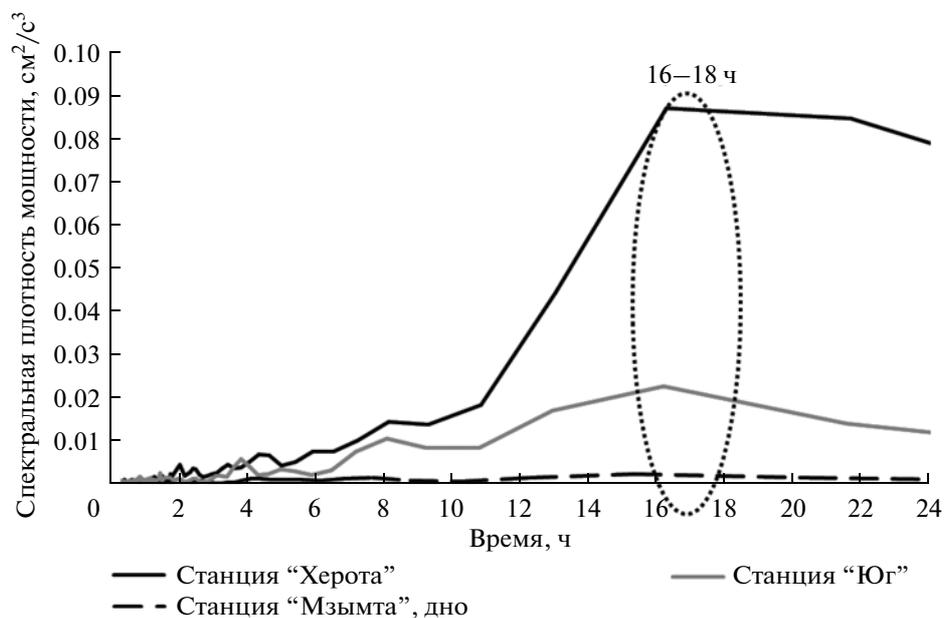
**Рис. 3.** Спектральная структура низкочастотной изменчивости вдольбереговых компонент скоростей поверхностного течения на станции “Мзымта” и придонных течений на станциях “Мзымта”, “Север” и “Юг” за период измерений в мае 2009 г. Точечной линией выделена область частот наибольшей мощности.



**Рис. 4.** Спектральная структура низкочастотной изменчивости вдольбереговых компонент скоростей поверхностного течения на станции “Мзымта” и придонных течений на станциях “Мзымта”, “Кудепста”, “Херота” и “Юг” за период измерений в мае 2010 г. Точечной линией выделена область частот наибольшей мощности.



**Рис. 5.** Спектральная структура низкочастотной изменчивости вдольбереговых компонент скоростей поверхностного течения на станции “Мзымта” и придонных течений на станциях “Мзымта”, “Херота” и “Юг” за период измерений в мае 2011 г. Точечной линией выделена область частот наибольшей мощности.



**Рис. 6.** Спектральная структура низкочастотной изменчивости вдольбереговых компонент скоростей придонных течений на станциях “Мзымта”, “Херота” и “Юг” за период измерений в мае 2012 г. Точечной линией выделена область частот наибольшей мощности.

**3.3. Высоочастотные колебания скорости течений.** Теперь обратимся к изучению высокочастотной изменчивости приповерхностных и придонных течений. Высокочастотной компонентой ряда данных в этом разделе и далее в статье

считалась разность исходного ряда и низкочастотной составляющей, определенной выше.

В результате гармонического анализа, выполненного в соответствии с процедурой, аналогичной описанной выше для случая низкочастотных

**Таблица 2.** Периоды (ч) главных гармоник высокочастотной составляющей вдольбереговой компоненты скорости течения за периоды измерений в 2009–2012 гг.

Год	Название станции					
	“Мзымта”дно	“Юг”дно	“Север”дно	“Херота”дно	“Мзымта”поверхность	“Кудепста”дно
2009	3.2	4.8	4.5	—	4.9	—
2010	3.8	3.0	4.6	3.4	—	2.8
2011	3.0	3.9	—	3.2	4.5	—
2012	4.3	4.0	—	4.9	—	—

колебаний, были выделены главные периоды высокочастотных колебаний вдольбереговых составляющих поверхностных и придонных течений в периоды измерений (табл. 2).

Как видно из табл. 2, периоды главных гармоник высокочастотных колебаний вдольбереговой компоненты скорости придонных течений за период измерений в 2009–2012 гг. составляли в среднем 3.9 ч, а скорости приповерхностных течений – 4.7 ч.

#### 4. АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕТРА

##### 4.1. Низкочастотные колебания скорости ветра.

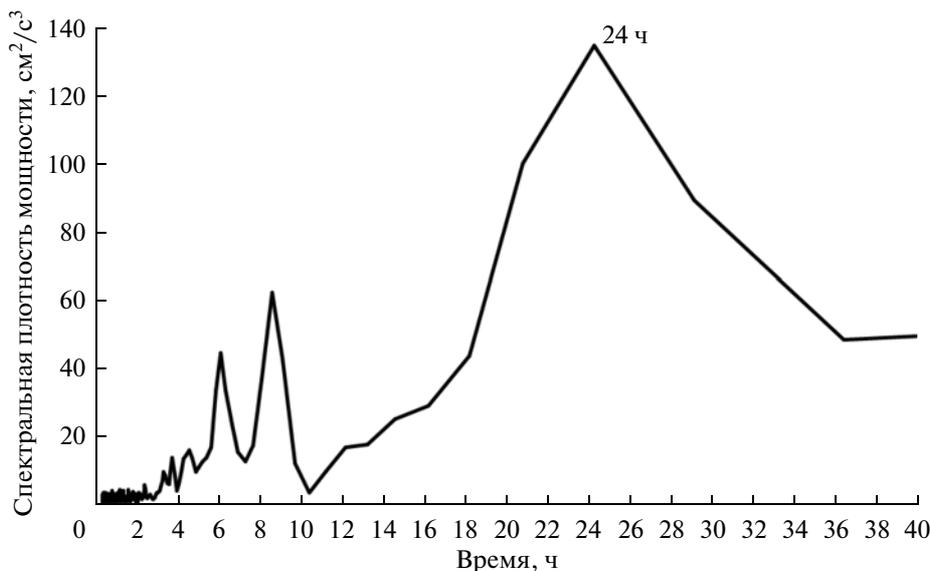
Спектральный анализ низкочастотной компоненты поперечной берегу составляющей скорости ветра показал во всех случаях наличие главного периода, близкого к 24 ч (от 22 до 27 ч в разных сериях, рис. 7–8). Можно предположить, что эти периоды связаны с бризовыми колебаниями скорости ветра. Аналогичные периоды главных гармоник низкочастотной изменчивости вдольбере-

говой компоненты скорости течений за периоды измерений в 2009–2012 гг., близкие к 24 ч (см. раздел 3.2), могут объясняться воздействием бризовых ветровых колебаний.

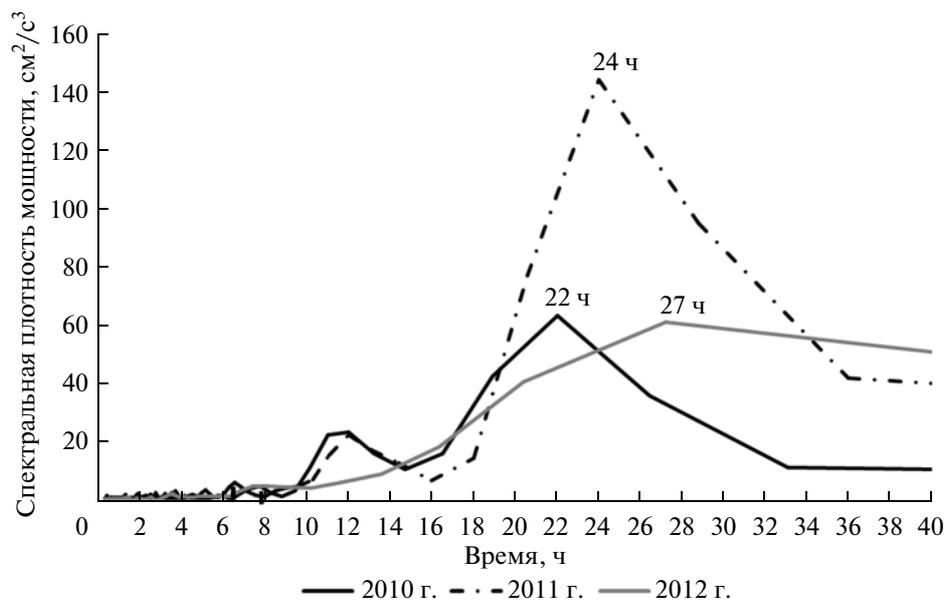
Спектральный анализ низкочастотной изменчивости вдольбереговой составляющей скорости ветра значимых периодов не обнаружил.

##### 4.2. Высокочастотные колебания скоростей ветра.

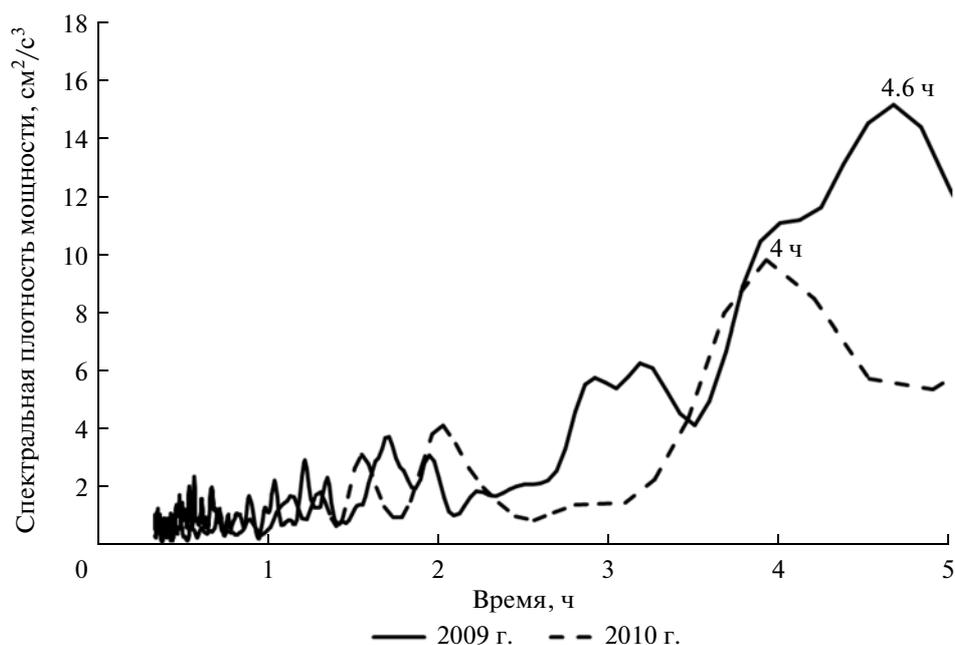
В результате спектрального анализа Фурье высокочастотной составляющей изменчивости поперечной берегу компоненты скорости ветра были найдены периоды главных колебаний, которые составили 4.0 и 4.6 ч для данных метеостанции “Кудепста” в 2009 и 2010 гг. соответственно (рис. 9), 4.5 и 4.2 ч для данных метеостанции “Мзымта” в 2011 и 2012 гг. соответственно (рис. 10). Для вдольбереговых компонент эти значения составили 5.0 и 5.8 ч для станции “Кудепста” в 2009 и 2010 гг. соответственно, 6.2 и 4.0 ч для станции “Мзымта” в 2011 и 2012 гг. соответственно.



**Рис. 7.** Спектральная структура низкочастотной изменчивости поперечной берегу компоненты скорости ветра на метеостанции “Кудепста” за период измерений в мае 2009 г.



**Рис. 8.** Спектральная структура низкочастотной изменчивости поперечной берегу компоненты скорости ветра на метеостанции “Мзымта” за периоды измерений в мае 2010–2012 гг.

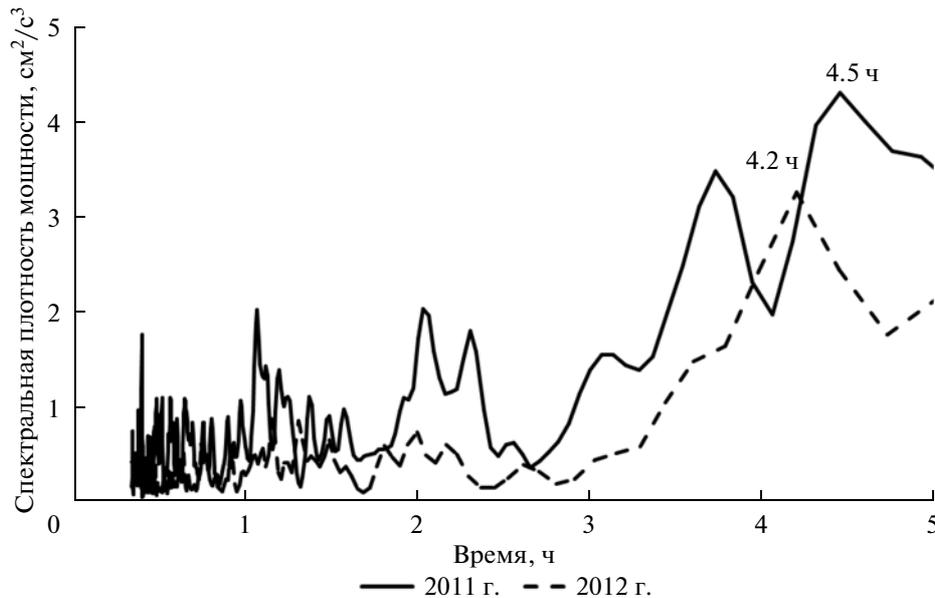


**Рис. 9.** Спектральная структура высокочастотной изменчивости поперечной берегу компоненты скорости ветра на метеостанции “Кудепста” за периоды измерений в мае 2009 и 2010 гг.

Как и в случае с низкочастотной изменчивостью, спектральный анализ высокочастотной компоненты вдольбереговой составляющей скорости ветра значимых периодов не обнаружил.

Таким образом, главный период высокочастотных колебаний скорости ветра за период наблюдений в 2009–2012 гг. в среднем составлял 4,8 ч. Как отмечалось выше в разделе 3.3, такой же период

был характерен и для высокочастотных колебаний вдольбереговой скорости поверхностного течения на станции “Мзымта”. Таким образом, высокочастотные колебания приповерхностных течений могут объясняться ветровым воздействием. В то же время аналогичная прямая связь между ветровым воздействием и высокочастотными колебаниями придонных течений не обна-



**Рис. 10.** Спектральная структура высокочастотной изменчивости поперечной берегу компоненты скорости ветра на метеостанции “Мзымта” за периоды измерений в мае 2011–2012 гг.

руживается. Аналогичный вывод сделан в нашей работе [1], где исследовались корреляционные связи между ветром и поверхностными и придонными течениями в этом районе. Этот результат объясняется тем, что точка расположения станции “Мзымта” во время измерений находилась непосредственно в области распространения опресненного берегового стока, тем самым измерения приповерхностных течений проводились внутри вод плюма. Согласно ряду публикаций (см., например, [4]), скачок плотности воды на нижней границе плюма препятствует передаче ветрового импульса нижележащим морским водам.

### 5. АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ Р. МЗЫМТА

Измерения скорости течения реки Мзымта велись во время полевых работ в 2010–2012 гг. Максимальные значения скорости течения реки составили 61 см/с в 2010 г., 108 см/с в 2011 г. и 103 см/с в 2012 г. (рис. 11). Колебания объема речного стока для р. Мзымта за время измерений можно считать прямо пропорциональными колебаниям скорости течения реки, так как на этом коротком интервале времени не отмечалось существенного изменения уровня реки.

В результате анализа спектра Фурье были выделены основные периоды низкочастотной и высокочастотной изменчивости скорости течения реки (рис. 12). Период основной гармоники для низкочастотных колебаний составил 24 ч в 2010 г., 9 ч в 2011 г. и 16 ч в 2012 г., а для высокочастотных

колебаний – 2.9 ч в 2010 г., 3.6 ч в 2011 г. и 3.9 ч в 2012 г.

Таким образом, спектральная структура как низкочастотных, так и высокочастотных колебаний мощности стока р. Мзымта за периоды измерений в 2010–2012 гг. не обнаруживает очевидной связи с изменчивостью придонных и приповерхностных течений. Синоптические колебания объема стока крупных рек могут существенно влиять на динамику поверхностных течений в области речного плюма [9], однако в данном случае подобной связи выявлено не было.

### 6. ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ПЛЮМОМ

Внутренние волны во многих случаях ответственны за наиболее энергичные высокочастотные колебания скорости в прибрежных районах океана [5, 10, 11]. Нестационарные движения речного плюма, как было показано в [3, 6, 8, 12], могут порождать внутренние волны, которые влияют на процессы турбулентного перемешивания на шельфе [7, 14]. Для полузамкнутого Черного моря, где практически отсутствуют приливные явления, зато изобилуют источники пресноводного стока, влияние которого здесь на порядок сильнее, чем в среднем по океану, такой механизм генерации внутренних волн является потенциально особенно важным. В этом разделе статьи на основе данных измерений будут приведены аргументы в пользу существования внутренних волн, генерируемых плюмом реки Мзымта, и оценены значения их волновых параметров.

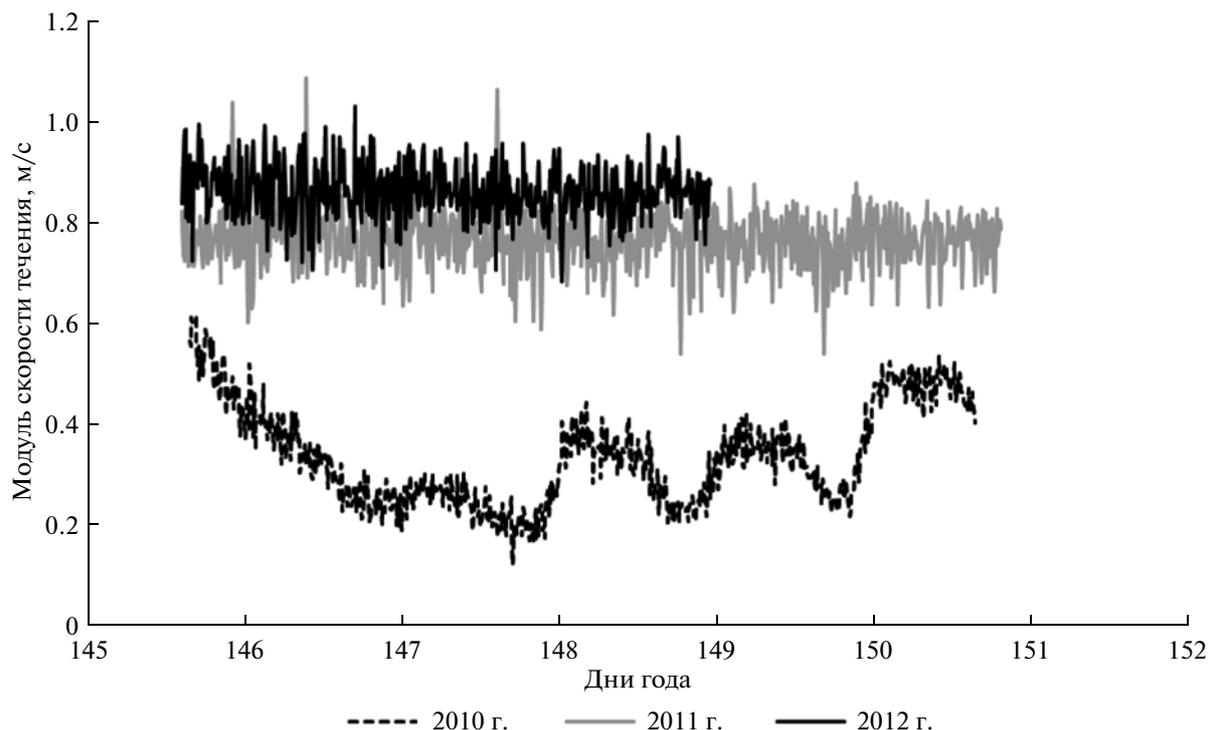


Рис. 11. Изменения скорости течения р. Мзымта за период измерений в мае 2010–2012 гг.

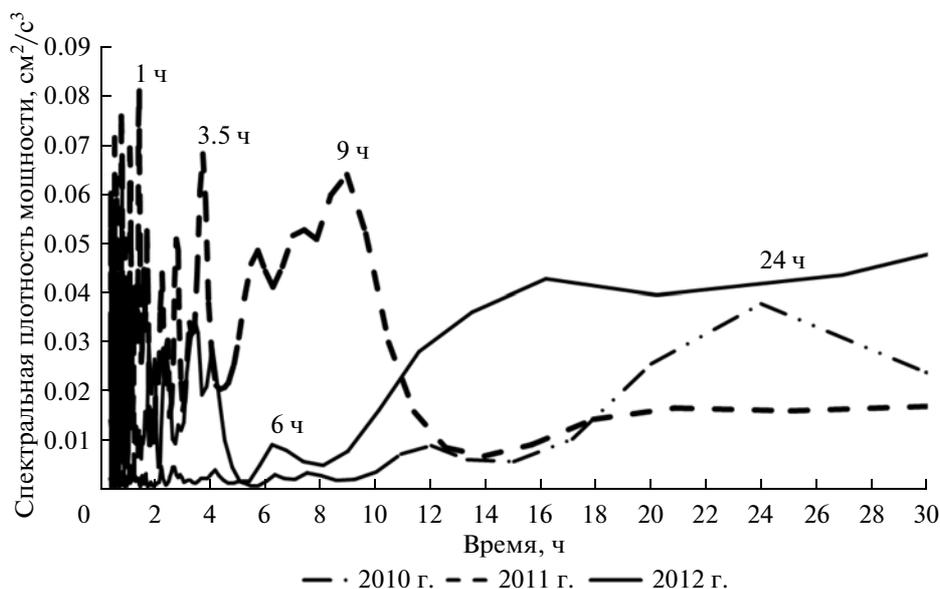


Рис. 12. Спектральная структура изменчивости скорости течения р. Мзымта за период измерений в мае 2010–2012 гг.

В течение всех четырех периодов измерений в 2009–2012 гг. главные гармоники высокочастотной изменчивости скорости вдольбереговых придонных течений на всех станциях имели близкие периоды, которые в среднем составляли 3.9 ч. Это дает повод предположить, что высокочастотные колебания, наблюдавшиеся в разные годы, имели

общую природу. При этом ни ветровое воздействие, ни колебания интенсивности стока р. Мзымта (см. выше разделы 4.3 и 5) такого периода не обнаруживают.

Допустим гипотетически, что причиной колебаний скорости течения с периодом около 4 ч являются внутренние волны, распространяющиеся

от “квазиточечного” источника у устья р. Мзымта. Выделяя соответствующие гармоники в сериях измерений скорости на станциях “Мзымта”, расположенной непосредственно у устья, а также на станциях “Север”, “Юг” и “Херота”, расположенных на известных расстояниях к северу и югу от устья, можно получить соотношения между фазами главных гармоник в этих точках и затем рассчитать фазовую скорость распространения внутренней волны. Эта несложная процедура приводит к значениям, сведенным в табл. 3. При расчетах фазовых скоростей внутренней волны было решено пренебречь влиянием фонового течения ввиду относительной малости средних значений измеренных скоростей придонных течений (см. п. 3.1), примерно на порядок меньших, чем оцененные скорости распространения внутренней волны.

Если наша исходная гипотеза верна и картина изменчивости скорости в разных точках описывается распространением одной и той же волны от точечного источника, то для полученных таким образом фазовых скоростей следует ожидать:

1) совпадения (или, по крайней мере, близости) значений, рассчитанных для отрезков “Мзымта”–“Север”, “Мзымта”–“Юг” и “Мзымта”–“Херота”;

2) относительной близости значений, рассчитанных для разных лет, поскольку характер вертикальной стратификации и другие океанографические условия были аналогичными во всех случаях;

3) сопоставимости полученных расчетных величин и значений, предписываемых приближенными теоретическими формулами, например, для случая двухслойной стратификации.

Как видно из табл. 3, первые два критерия в данном случае неплохо выполняются. Для проверки третьего условия можно рассчитать теоретическую скорость распространения внутренней волны в двухслойной жидкости. Ввиду наличия в верхней части водной колонны слоя, опресненного речным стоком, приближение вертикальной стратификации двухслойной моделью в нашем случае представляется физически оправданным, хотя бы на качественном уровне. Эта скорость выражается формулой [2]:

$$C = (g \Delta\rho/\rho h(H-h)/H)^{1/2},$$

где  $\rho$  – плотность морской воды,  $\Delta\rho$  – разность плотностей речной и морской воды,  $g$  – ускорение свободного падения,  $h$  – глубина скачка плотности (толщина плюма),  $H$  – глубина моря. Подставляя характерные значения, получаем, что формула удовлетворительно воспроизводит значения, приведенные в табл. 1.

Наконец, приведем еще один дополнительный аргумент в пользу высказанной гипотезы. Кроме осцилляции поля скорости течений, внутренние

**Таблица 3.** Фазовые скорости внутренней волны (м/с), рассчитанные для различных отрезков полигона

Год	“Мзымта”– “Север”	“Мзымта”– “Юг”	“Мзымта”– “Херота”
2009	0.78	0.75	–
2010	0.97	0.88	–
2011	–	0.80	0.64
2012	–	0.75	0.66

**Таблица 4.** Параметры волновых функций, имеющих наименьшее квадратичное отклонение от внутренней волны, генерируемой плюмом, за соответствующие периоды наблюдений в 2011 г.

Дата	$A$ , м	$\varphi$ , рад	$h_0$ , м	$\delta$ , м
27.05.11	0.4	1.31	4.7	0.48
28.05.11	0.4	5.3	5.0	1.19
29.05.11	0.4	3.42	4.1	0.67
30.05.11	0.4	2.27	4.6	0.44
27–30.05.11	0.4	3.08	4.6	0.92

волны должны вызывать периодические вертикальные смещения изопахин (а также изохалин) в окружающем море. Если волны действительно порождаются речным плюмом, глубина залегания соответствующих изохалин как функция горизонтальных координат и времени должна описываться уравнением бегущей волны с источником в приустьевом районе. Для проверки этого предположения можно воспользоваться данными STD-зондирований, которые имеются в нашем распоряжении.

Так, во время полевых работ 2011 г. в течение четырех последовательных дней с 27 по 30 мая нами были выполнены от 6 до 7 ежедневных зондирований температуры, солёности и плотности от поверхности до дна в различных точках полигона. Для каждого измерения была определена глубина  $h$  залегания изохалины 17 епс. В качестве контрольной можно было выбрать и любую другую “разумную” изохалину, однако именно изохалина 17 епс примерно соответствует границе между опресненными водами речного плюма и окружающими морскими водами. В каждом случае известно также время измерения  $t$  и расстояние  $x$  от точки измерения до устья р. Мзымта. Далее для каждого из четырех дней в отдельности были найдены параметры (амплитуда  $A$  и начальная фаза  $\varphi$ ) волны заданного периода 3.9 ч, распространяющейся от локализованного у устья р. Мзымта точечного источника, обеспечивающие наименьшее среднее квадратическое отклонение в точках  $(x, t)$  от измеренных глубин залегания  $h$  (табл. 4). Как видно, у всех четырех найденных таким образом волновых функций совпали амплитуды ( $A = 0.4$  м). Средние значения  $h_0$  оказались близкими между собой (от 4.1 до 4.7 м), а

среднеквадратические отклонения  $\delta$  принимали значения в пределах от 0.4 до 1.2 м.

Таким образом, можно утверждать, что в каждый из четырех последовательных дней измерений наблюдавшиеся вертикальные смещения изохалины 17 епс с достаточно высокой точностью соответствуют распространению внутренних волн с периодом 3.9 ч от источника, расположенного в районе устья р. Мзымта.

Данные за все четыре дня были также сведены в один ряд, и для него также было подобрано следующее уравнение бегущей волны с источником в районе речного устья, минимизирующее отклонение от данных измерений величины  $h(x, t)$ :

$$h(x, t) = h_0 + A \cos(\varphi + w(t-x/v)),$$

где  $A = 0.4$  м – амплитуда,  $\varphi = 3.08$  рад – начальная фаза,  $w = 4.52 \times 10^{-4}$  с $^{-1}$  – циклическая частота,  $v = 0.78$  м/с – скорость распространения волны.

Среднеквадратическое отклонение от данных наблюдений для этой волны составило 0.92 м.

Приведенные выше результаты должны рассматриваться как сильный (хотя и косвенный) аргумент в пользу гипотезы о существовании внутренних волн, генерируемых плюмом р. Мзымта.

## 7. ВЫВОДЫ

Синоптическая изменчивость течений в области влияния стока р. Мзымта была изучена на основе натурных измерений, выполненных в 2009–2012 гг. в прибрежной зоне моря в Адлерском районе г. Сочи. Низкочастотная изменчивость (определенная здесь как изменчивость с периодами более 6 ч) течений в шельфовой зоне обнаруживает сходную структуру для поверхностных и придонных течений, в обоих случаях основное влияние на низкочастотную изменчивость течений оказывают инерционные колебания (период 17.6 ч) и суточная бризовая циркуляция ветра (период 24 ч). В высокочастотной изменчивости течений в приповерхностном слое преобладают колебания с периодами 4.5–4.9 ч. Аналогичные периоды обнаружены для изменчивости скорости ветра в данном районе, поэтому можно думать, что высокочастотная изменчивость поверхностных течений связана, прежде всего, с ветровыми воздействиями. Однако для придонных течений дело обстоит иначе. Преобладающие частоты в их короткопериодной изменчивости в целом выше, чем для поверхностных течений, они соответствуют периодам от 2.8 до 4.9 ч (в среднем 3.9 ч). Изменчивость придонных течений не обнаруживает значимых связей с изменчивостью ветра, что согласуется с результатами нашей опубликованной ранее работы [1]. Осцилляции скорости придонных течений в данном районе, возможно, объясняются прохождением внутренних волн, ге-

нерируемых движениями плюма р. Мзымта. Имеющиеся данные измерений скорости и зондирований термохалинной структуры косвенно подтверждают эту гипотезу. Однако ее окончательная проверка потребует измерений с более высоким пространственным разрешением по горизонтальным координатам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Президиума РАН в рамках программы 23, Министерства образования и науки РФ в рамках тройственного соглашения В.25.31.0028, ГК 2042 и ГК 8338, РФФИ в рамках научных проектов № 07-05-00240 а, № 13-05-00626 а и № 13-05-96518 р\_юг\_а, а также проекта CLIMSEAS в рамках международного гранта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Короткина О.А., Завьялов П.О., Осадчиев А.А. Субмезомасштабная изменчивость полей течений и ветра в прибрежной акватории Сочи // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 5. С. 797–806.
2. Миропольский Ю.З. Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 301 с.
3. Fu L.L., Holt B. Seasat views oceans and sea ice with synthetic-aperture radar // *JPL publication*. NASA Jet Propulsion Laboratory. Pasadena. 1982. P. 81–120.
4. Hetland D.R. Relating river plume structure to vertical mixing // *J. Phys. Oceanogr.* 2005. V. 35. № 9. P. 1667–1688.
5. Huthnance J.M. Internal tides and waves near the continental shelf edge // *Geophys. Astro. Fluid.* 1989. V. 48. P. 81–105.
6. Jackson C. An atlas of internal solitary-like waves and their properties (second edition). Global Ocean Associates report. 2004. 560 p.
7. Moum J.N., Farmer D.M., Smyth W.D. et al. Structure and generation of turbulence at interfaces strained by internal solitary waves propagating shoreward over the continental shelf // *J. Phys. Oceanogr.* 2003. V. 33. P. 2093–2112.
8. Nash J.D., Moum J.N. River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean // *Nature*. 2005. V. 437. P. 400–403.
9. Orton P.M., Jay D.A. Observations at the tidal plume front of a high-volume river outflow // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L11605. doi: 10.1029/2005GL02237.
10. Osborne A.R., Burch T.L. Internal solitons in the Andaman Sea // *Science*. 1980. V. 208. P. 451–460.
11. Ostrovsky L., Stepanyants Y. Do internal solitons exist in the ocean? // *Rev. Geophys.* 1989. V. 27. P. 293–310.
12. Ray R.D., Mitchum G.T. Surface manifestation of internal tides generated near Hawaii // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 2101–2104.
13. Sheremet V.A. SeaHorse Tilt Current Meter: Inexpensive Near-Bottom Current Measurements Based on Drag Principle with Coastal Applications // *Eos Trans. AGU*. 2010. V. 91. № 26. Ocean Sci. Meet. Suppl., Abstract PO25C-13.
14. Stanton T.P., Ostrovsky L.A. Observations of highly nonlinear internal solitons over the continental shelf // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 2695–2698.

**Synoptic Variability of Currents in the Coastal Zone of Sochi****O. A. Korotkina, P. O. Zavialov, A. A. Osadchiev**

Synoptic variability of near-bottom and near-surface current velocity in the coastal zone of Sochi in the region of the influence of the Mzymta River flow are studied on the basis of direct high temporal resolution (10 min) measurements carries out in the springs of 2009, 2010, 2011 and 2012. In addition, wind and current velocity analysis in the near-mouth region of the Mzymta River is performed. The frequency structure variability of these values is described in the high-frequency (the periods are less than 6 hours) and low-frequency (the periods are 6–50 hours) spectral ranges. The hypothesis about the existence of internal waves in this region with the periods between 3 and 5 h is suggested and justified.