

А.С.Кузнецов, В.А.Иванов, В.В.Зима

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***ОСОБЕННОСТИ МЕЗОМАСШТАБНОЙ ДИНАМИКИ ВОД  
У ЮЖНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА В 2008 – 2016 ГГ.**

Представлены основные результаты натурных исследований мезомасштабной динамики прибрежных вод, полученные в 2008 – 2016 гг. у южного побережья Крыма пространственной антенной векторно-усредняющих измерителей течений на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического полигона. По данным спектрального анализа многолетней изменчивости прибрежных течений достоверно выделены два участка интенсификации мезомасштабных колебаний в диапазонах периодов 10 – 13 и 5 – 6 суток. При этих мезомасштабных колебаниях орбитальные движения прибрежных вод трансформируются практически в коллинеарные возвратно-поступательные движения среднего вдольберегового течения. При глобальной циклонической направленности циркуляции вод такие мезомасштабные колебания в прибрежной зоне локализуются исключительно вдоль направления вектора среднего течения. Вектор среднего прибрежного течения совершает циклонический разворот по глубине от приповерхностного до придонного слоя. Характеристики выделенных мезомасштабных колебаний течений сопоставлены с известными для шельфа Крыма характеристиками захваченных берегом волн.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *Черноморский гидрофизический полигон, прибрежные течения, сдвиг скорости, спектр колебаний, мезомасштабная динамика*

**Введение.** В 90-е гг. XX в. Морским гидрофизическим институтом проводились целенаправленные натурные исследования динамики вод в шельфовой зоне Черного моря у побережья Крыма [1]. В этой работе выделены две основные причины, препятствующие успешному развитию таких исследований, а именно: отсутствие длительных целенаправленных экспериментов для детального изучения специфически интенсивных процессов на шельфе и отсутствие соответствующих теоретических работ для объяснения наблюдаемых явлений. Ряд исследователей динамики шельфовых вод (например, [2, 3]) считают необходимым продолжить исследования захваченных берегом волн. Как отмечено в [2], захваченные берегом волны – один из основных факторов, формирующих среднемасштабную изменчивость гидрофизических полей в области континентального шельфа – склона. Однако исследования этих волн в Черном море крайне малочисленны. Это объясняется тем, что захваченные волны дают слабый сигнал в колебаниях уровня моря и для их наблюдений необходимы работающие длительное время кластеры измерителей течений.

Наряду с захваченными берегом волнами в природных условиях шельфовой зоны Черного моря под воздействием крупномасштабных колебаний и вихревых структур Основного черноморского течения формируются специфические совокупности интенсивных средне-, субмезо- и мелкомасштабных

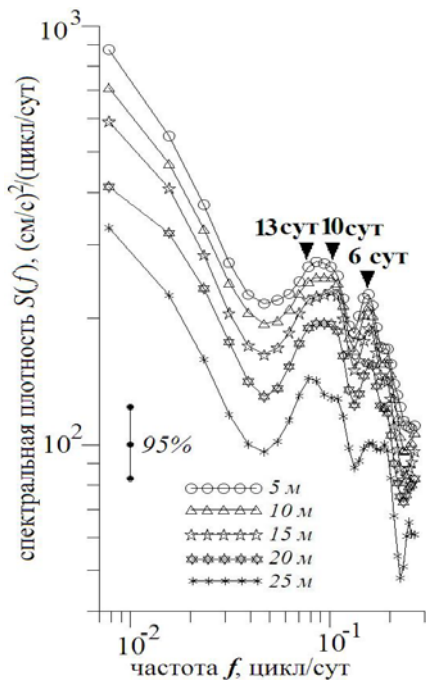
движений вод, которые дают свой вклад в показания измерителей течений.

**Технология натуральных исследований.** Использование современных информационных технологий в океанологии повышает достоверность и точность натуральных данных. Фундаментальный задел и многолетняя практика Морского гидрофизического института при проведении натуральных экспериментов в шельфовых и прибрежных водах у Крымского побережья позволили создать и десятилетием обеспечить непрерывное функционирование современной регионально-адаптированной системы контроля динамики прибрежных вод на базе Черноморского гидрофизического полигона в пгт. Кацивели [4]. В качестве технических средств контроля динамики прибрежных вод используется приборный комплекс автономных эйлеровых измерителей течений, векторно-интегрирующих измеряемые компоненты поля в заданных пространственно-временных пределах апертур. Вертикальная измерительная антенна векторно-усредняющих измерителей течений типа МГИ-1308 установлена от поверхности до дна на гидрологических горизонтах 5; 10; 15; 20 и 25 м со стационарной океанографической платформы при глубине места 28 м и удалении 500 м от берега. Базовый временной интервал векторного осреднения измерителей выбирался, в основном, равным 5 мин при дискретности первичных измерений равной 15 с. Процедура обработки векторных данных позволила использовать скрытые аппаратные возможности измерителей типа МГИ-1308 [4] и повысить точность измерений усредненных компонентов мезомасштабных течений до уровня чувствительности первичного измерительного преобразователя модуля скорости, достигающей величины 0,1 см/с, и изменений направления – до 2,8 угл. град. Долгосрочные измерения течений по такой методике позволили достоверно исследовать структуру и изменчивость длинноволновых характеристик средних течений в прибрежной зоне измерителями течений типа МГИ-1308. Информационная технология мониторинга динамики прибрежных вод реализована как совокупность перспективных измерительных средств, способов организации и поддержки натурального эксперимента, контроля качества первичных натуральных данных и комплексной обработки набора векторных рядов динамики.

**Обсуждение результатов исследования.** В настоящей работе сделан акцент на обсуждение результатов исследования среднемасштабной динамики прибрежных течений за период с 2008 по 2016 гг. На основе исходной векторной информации, полученной измерительной антенной, были сформированы наборы средних за одну и пять минут, среднечасовых и среднесуточных векторных рядов динамики. Для выделения доминирующих энергетических интервалов пространственно-временной изменчивости течений был выполнен спектральный анализ подготовленных рядов динамики. На текущих спектрах (периодограммах) кинетической энергии, рассчитанным по одно- и пятиминутным реализациям, колебания в диапазоне инерционно-гравитационных внутренних волн носят сложную нерегулярную пространственно-временную и энергетическую структуру. В годовых спектрах, рассчитанных по этим реализациям, в инерционно-гравитационном диапазоне внутренних волн за весь многолетний период наблюдений достоверные пики спектральной плотности не выделяются. В спектрах колебаний кинетической энергии прибрежных течений, рассчитанных из среднечасовых ря-

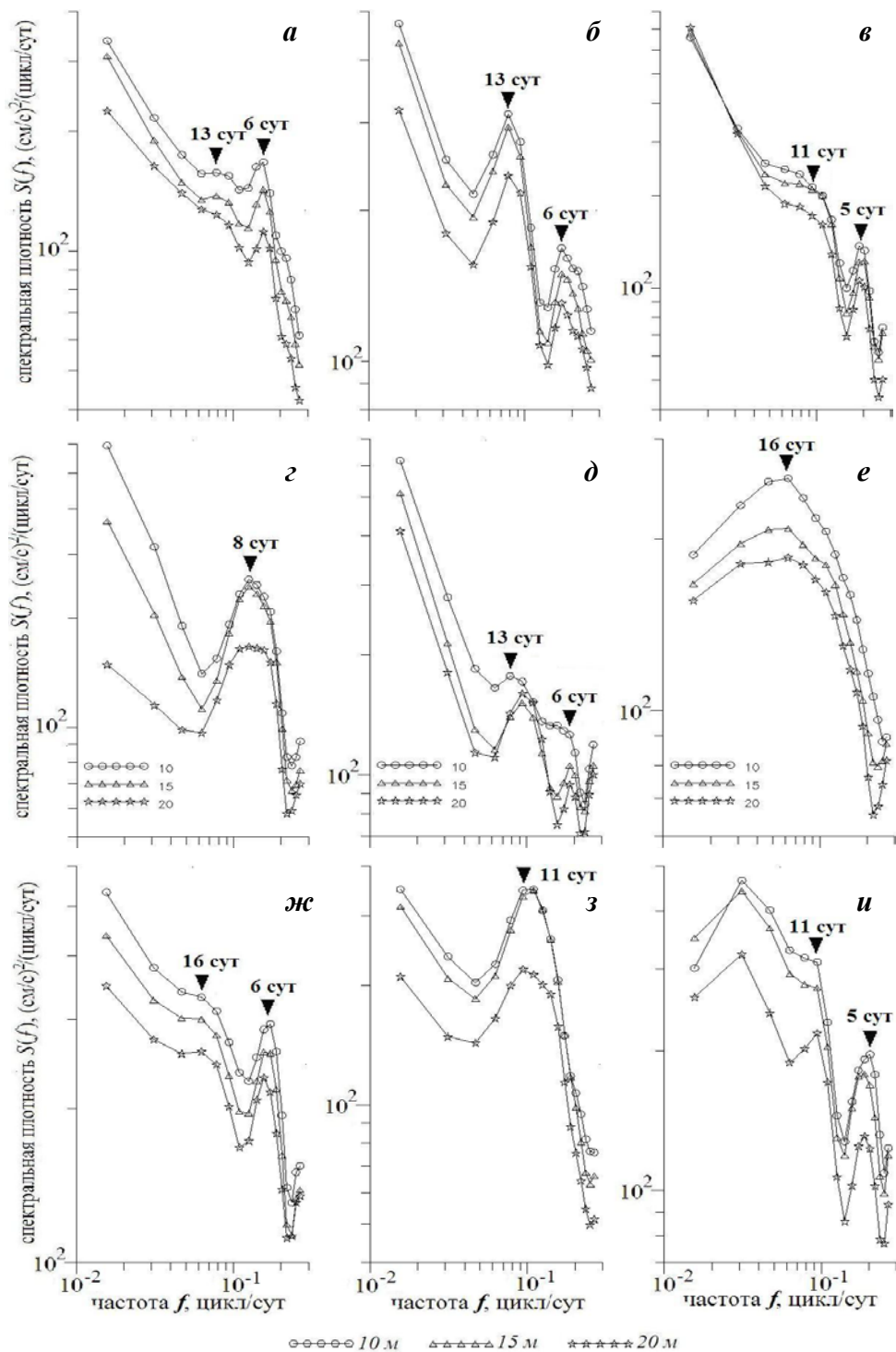
дов по годовым реализациям, отсутствуют какие-либо достоверные пики на частотах колебаний, включая суточный, инерционный и внутрисуточные периоды. Инерционные колебания течений на средних за год временных энергетических спектрах достоверно не выделяются, но периодически принимают регулярный характер, а в отдельных недельных реализациях интенсивные инерционные пики на периодах колебаний около 17 ч становятся четко выраженными и регулярными. В спектрах колебаний кинетической энергии прибрежных течений, рассчитанных из среднечасовых рядов по годовым реализациям в субинерционном диапазоне выражен целый набор колебаний в диапазоне периодов от 2,5 до 16 сут. На спектрах колебаний кинетической энергии течений, рассчитанных из среднесуточных рядов динамики по девятилетним (за 2008 – 2016 гг.) реализациям, выделена совокупность достоверных разделяемых спектральных максимумов в диапазоне колебаний с периодами около 11,5 и 5,5 сут. Колебания с периодами около 3 сут за такой длительный временной интервал анализа по своим энергетическим уровням спектральной плотности не превышают пределы 95 % доверительной вероятности, но при необходимости могут быть достоверно исследованы по выборочным реализациям из имеющегося набора векторных данных. При дальнейшем анализе натурных данных нами были использованы специально подготовленные ряды векторной динамики прибрежных течений, в которых путем цифровой фильтрации подавлен вклад колебаний с периодами 3 сут и менее.

На рис.1 представлены результаты спектрального анализа рядов динамики течений по глубине за период 2008 – 2016 гг. На этих обобщающих спектрах выделяются два пиковых участка в диапазоне периодов 10 – 13 и 5 – 6 сут, которые по своим энергетическим уровням спектральной плотности превышают пределы 95 % доверительной вероятности. На рис.2 пред-



ставлены результаты спектрального анализа годовых реализаций динамики течений на трех репрезентативных гидрологических горизонтах 10; 15 и 20 м отдельно по годам: 2008 – 2016 гг. соответственно. Для удобства визуального восприятия на рис.2 не представлены результаты расчета спектров для приповерхностного (5 м) и придонного (25 м) горизонтов. При межгодовой изменчивости прибрежных течений возникают различные комбинации пиков в указанных спектральных участках. При общей тенденции интенсификации колебаний течений в мезомасштабном диапазоне в ряде случаев

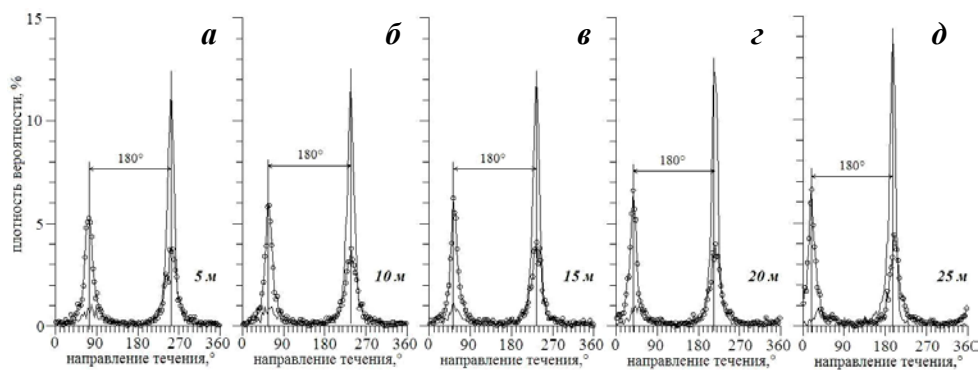
Рис. 1. Спектральная плотность кинетической энергии колебаний прибрежных течений по глубине на горизонтах 5, 10, 15, 20 и 25 м в диапазоне периодов колебаний 4 – 64 суток за временной интервал 2008 – 2016 гг.



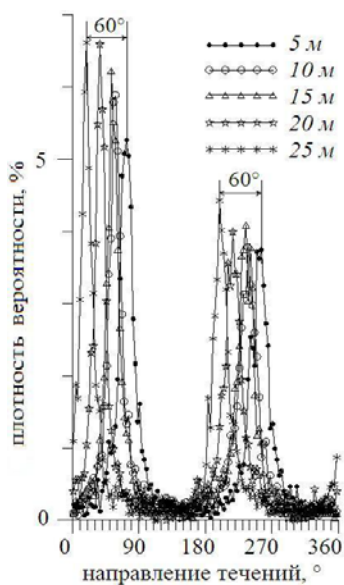
Р и с . 2. Спектральная плотность кинетической энергии колебаний прибрежных течений на горизонтах 10; 15 и 20 м в диапазоне периодов колебаний 4 – 64 сут соответственно по годам 2008 (а), 2009 (б), 2010 (в), 2011 (г), 2012 (д), 2013 (е), 2014 (ж), 2015 (з), 2016 (и).

очевидно достоверное слияние пиков при смещении спектрального максимума, например, в 2011 г. (рис.2, *з*), в 2013 г. (рис.2, *е*) и 2015 г. (рис.2, *ж*).

В [5] на основе анализа экспериментальных данных установлено, что вектор вдольберегового течения совершает суммарный циклонический разворот от приповерхностного до придонного слоя при глубине 25 м на угол порядка  $60^\circ$  в левую сторону от берега в направлении глубокого моря. Этот относительный сдвиг вектора среднего прибрежного течения по глубине на каждом гидрологическом горизонте стационарен во времени и практически не зависит ни от локальных ветров, ни от изменчивости атмосферных аномобарических условий в Черноморском регионе. На рис.3 представлены эмпирические функции распределения плотности вероятности направления течения, вычисленные из исходных девятилетних наборов векторных данных и направленности остаточных низкочастотных колебаний прибрежного течения, вычисленных после удаления вклада вектора среднего течения из ранее специально подготовленных для анализа векторных рядов для каждого из горизонтов. Вектор среднего течения для каждого гидрологического горизонта вычислялся отдельно из соответствующего исходного девятилетнего набора векторных данных. Гистограммы были рассчитаны при угловом интервале  $3^\circ$ . Согласно форме гистограмм, направление движения прибрежных вод по основному потоку, особенно на горизонтах 10; 15 и 20 м, имеет явно выраженный узконаправленный характер. Поток водных масс обратного направления существует статистически более чем на один порядок величины реже прямого потока. Гистограммы низкочастотных колебаний прибрежных вод при удалении вклада среднего течения выглядят иначе. В присутствии среднего течения на каждом гидрологическом горизонте преобладают реверсивные колебания, ориентированные в направлении вектора среднего течения. В этих колебаниях орбитальные движения прибрежных вод трансформируются практически в коллинеарные возвратно-поступательные движения среднего прибрежного течения. Происходит сложение скоростей фонового течения и волновых движений при существенной деформации орбитальных траекторий частиц жидкости. При глобальной циклонической направленности циркуляции вод относительно глубокого моря мезомасштабные



Р и с . 3 . Эмпирические функции распределения плотности вероятности направления прибрежного течения (сплошная линия) и направленности остаточных колебаний прибрежных вод (линия с кружком) для гидрологических горизонтов 5 (*а*), 10 (*б*), 15 (*в*), 20 (*г*) и 25 м (*д*) соответственно.



Р и с . 4 . Эмпирические функции распределения плотности вероятности направленности остаточных низкочастотных колебаний прибрежных вод по глубине на гидрологических горизонтах 5; 10; 15; 20 и 25 м.

колебания в прибрежной зоне локализуются исключительно вдоль направления соответствующего по глубине вектора среднего течения.

Из анализа рис.4 следует, что ось реверсивных колебания прибрежных вод, как и сам вектор среднего вдольберегового течения, совершает суммарный циклонический разворот от приповерхностного до придонного слоя на угол порядка  $60^\circ$  в левую сторону от берега в направлении глубокого моря.

Внедрение новой информационной технологии при совершенствовании методов обработки, накопления, анализа и интерпретации репре-

зентативных векторных рядов динамики позволило уточнить знания о мезомасштабной динамике прибрежных течений, достоверно выявить их вертикальную структуру и динамические особенности, количественно оценить доминирующие энергетические диапазоны их изменчивости.

**Заклучение.** Представлены основные результаты анализа материалов натурного эксперимента по исследованиям мезомасштабной динамики прибрежных вод в 2008 – 2016 гг., полученные у южного побережья Крыма по информационной технологии антенных измерений течений на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического полигона. По данным спектрального анализа изменчивости прибрежных течений достоверно выделены два участка интенсификации мезомасштабных колебаний в диапазонах периодов 10 – 13 и 5 – 6 сут. При межгодовой изменчивости прибрежных течений возникают различные комбинации спектральных пиков в указанных диапазонах. Из анализа многолетних натуральных данных установлено, что в этих колебаниях орбитальные движения прибрежных вод трансформируются практически в коллинеарные возвратно-поступательные движения среднего прибрежного течения. Происходит сложение скоростей фонового течения и волновых движений при существенной деформации орбитальных траекторий частиц жидкости. При глобальной циклонической направленности циркуляции вод относительно глубокого моря мезомасштабные колебания в прибрежной зоне локализуются исключительно вдоль направления соответствующего по глубине вектора среднего течения. При этом вектор вдольберегового течения совершает суммарный циклонический разворот от приповерхностного до придонного слоя при глубине 25 м на угол порядка  $60^\circ$  в левую сторону от берега в направлении открытого моря. Этот относительный сдвиг вектора среднего прибрежного течения по глубине на каждом гидрологическом горизонте стационарен во времени и практически не зависит ни от локальных ветров, ни от изменчивости атмосферных анемобарических условий Черноморского региона.

Характеристики выделенных мезомасштабных колебаний течений сопоставлены с известными для шельфа Крыма характеристиками захваченных берегом волн, представленными в работах [1 – 3]. Согласно выводам, представленным в [1], в субинерционном диапазоне частот наибольшая энергия наблюдалась у колебаний течений с периодом, близким к 11 сут. Эти колебания представляют собой захваченные берегом волны с пространственным масштабом, сравнимым с размерами бассейна Черного моря. Эти колебания представляют собой отклик на удаленное ветровое воздействие. Следует отметить тесную связь характеристик захваченных берегом волн, выделенных на шельфе Крыма в летний сезон и представленных в работах [1, 2], с результатами настоящей статьи. Для дальнейших исследований особенностей динамики течений в шельфовой зоне, оценки характеристик захваченных берегом волн у южного побережья Крыма и сопоставлений с модельными результатами (например, [3]) могут быть использованы длительные и репрезентативные ряды динамики прибрежных течений, полученные в условиях открытого моря на Черноморском гидрофизическом полигоне у м.Кикинеиз при мониторинге поля прибрежных течений антенной векторно-усредняющих измерителей течений.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2015-0001 «Фундаментальные исследования процессов в системе океан-атмосфера-литосфера, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды и климата глобального и регионального масштабов».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.А., Янковский А.Е.* Динамика вод на шельфе Крыма в летний сезон // Морской гидрофизический журнал.– 1994.– № 3.– С.38-56.
2. *Иванов В.А., Янковский А.Е.* Характеристики захваченных волн в шельфовой зоне Южного берега Крыма // Океанология.– 1991.– т.31, вып.2.– С.200-206.
3. *Иванов В.А., Багаев А.В.* Осцилляции гидрофизических полей на шельфе и континентальном склоне, вызываемые нестационарным ветром // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2014.– т.50, № 6.– С.733-743.
4. *Кузнецов А.С., Иванов В.А., Зима В.В.* Особенности динамики течений у южного берега Крыма и перспективы использования информационной технологии полигонных исследований // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2014.– вып.28.– С.42-50.
5. *Кузнецов А.С.* Перспективы совместных натурных исследований динамики прибрежных течений и региональных анемобарических условий у Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон.– Севастополь, 2016.– вып.2.– С.23-32.

Материал поступил в редакцию 17.02.2017 г.  
После доработки 07.03.2017 г.

A.S.Kuznetsov, V.A.Ivanov, V.V.Zima

**PECULIARITIES OF MESOSCALE WATER DYNAMICS  
NEAR THE SOUTH COAST OF CRIMEA IN 2008 – 2016**

The main results of in situ research of mesoscale coastal dynamics are submitted. It was implemented in 2008 – 2016 near the South Crimea coast using a spatial antenna of vector-averaged current meters located on the stationary oceanographic platform of the Black Sea Hydrophysical Polygon. According to the spectral analysis of long-term variability of coastal currents, two intensification areas of mesoscale oscillations in the ranges 10 – 13 and 5 – 6 days are reliably identified. Under these mesoscale oscillations, the orbital movements of coastal water are transformed into practically collinear reciprocating movements of the mean alongshore current. Because of a global cyclonic orientation of water circulation relative to the deep sea, such mesoscale oscillations in the coastal area are localized exclusively along the mean flow vector. The average coastal current vector makes a cyclonic turn from surface to bottom layer. The parameters of isolated mesoscale oscillation of the currents are compared with the parameters of the trapped waves on the Crimea shelf.

**KEYWORDS:** the Black Sea Hydrophysical Polygon, coastal currents, velocity shift, oscillation spectrum, mesoscale dynamics