

А.С.Кузнецов

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь*

**ПЕРСПЕКТИВЫ СОВМЕСТНЫХ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДИНАМИКИ ПРИБРЕЖНЫХ ТЕЧЕНИЙ И РЕГИОНАЛЬНЫХ  
АНЕМОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ У ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА**

На Черноморском гидрофизическом полигоне и стационарной океанографической платформе в прибрежной зоне у м.Кикинеиз южного берега Крыма с 2002 по 2015 гг. выполнен региональный динамический эксперимент (РЕДЭКС) по исследованию динамики прибрежных течений при мониторинге изменчивости региональных анемобарических условий. Наличие современной измерительной базы и внедрение новой информационной технологии при совершенствовании методов обработки и анализа позволило синхронно получить многолетние репрезентативные наборы векторных рядов динамики полей прибрежных течений и ветра в приводном слое атмосферы над морем и над сушей. Дано краткое описание выполненных наблюдений и обсуждены результаты РЕДЭКС, полученные на основе данных многолетних исследований динамики прибрежных течений вертикальной антенной автономных векторно-усредняющих измерителей горизонтальной компоненты течений в условиях открытого моря. Определены перспективы использования новой информационной технологии для натуральных исследований, мониторинга и классификации динамики вод прибрежных зон Черного моря.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *Черноморский гидрофизический полигон, информационная технология, прибрежная зона, Южный берег Крыма, региональный динамический эксперимент, спектры кинетической энергии, морские течения, ветровые условия*

**Введение.** Одной из явных причин выделения прибрежных зон моря в самостоятельный объект для натуральных исследований являются существенные различия в динамике вод прибрежной и дальней открытой частей Черного моря. Установление причин наблюдаемых различий и изучение механизмов их существования является актуальной задачей. Высокая концентрация и локализация энергии, динамическая активность вод и наличие гидрологических фронтов в прибрежно-шельфовой зоне Черного моря обусловлены, как правило, совокупностью океанографических, гидрометеорологических, орографических и других природных факторов, действующих одновременно [1], что существенно усложняет процесс их исследования. Использование новых перспективных информационных технологий обеспечивает достоверность и высокую точность натуральных исследований, а оперативный мониторинг динамики природных процессов в прибрежной зоне обеспечивает целенаправленный поиск и выявление новых взаимосвязей в динамике морских течений, атмосферных энергетических потоков и других природных факторов с целью дальнейшего повышения качества прогнозов состояния и изменчивости окружающей среды территории приморских регионов.

Натурные исследования динамики прибрежных течений при проведении регионального динамического эксперимента (РЕДЭКС) выполнялись по планам Центра прибрежных исследований совместно с отделом гидро-

физики шельфа Морского гидрофизического института РАН (г.Севастополь) и Государственным бюджетным научным учреждением Республики Крым «Черноморский гидрофизический полигон» (пгт.Кацивели).

Черноморский гидрофизический полигон (ЧГП) расположен в прибрежной зоне Южного берега Крыма (ЮБК) [2] и был основан в 1929 г. как Черноморская гидрофизическая станция АН СССР для проведения физико-климатических фундаментальных, прикладных и междисциплинарных исследований. Такой специально оборудованный стационарный полигон – наиболее рациональный путь и проверенная многолетней практикой информационная технология надежного получения в надлежащих объемах и эффективного использования контактных натуральных данных для обеспечения контроля и калибровки перспективных дистанционных средств, верификации современных модельных разработок в прибрежной зоне, сертификации и тестирования новых методик решения прикладных задач.

Базовыми элементами регионально-адаптированной системы контроля состояния прибрежных вод Черного моря является ряд самостоятельных и взаимодействующих между собой подсистем, определяющих характеристики наиболее информативных компонентов природной среды различными перспективными технологическими средствами. В состав сети полигонных наблюдений для исследований потоков переноса вещества и энергии в зоне сопряжения прибрежного экотона суши и моря входит набор измерителей гидрометеорологических характеристик приповерхностного слоя атмосферы над сушей и над морем, колебаний уровня и взволнованности морской поверхности, состояния и динамики прибрежных вод. Гидрометеорологический кластер измерителей локализован у мыса Кикинеиз в зоне сопряжения суши и северной части Черного моря. Измерения ветровых условий на суше выполняются на центральном береговом гидрометеорологическом посту, расположенном на удалении около 200 м от береговой черты. Измерения ветровых условий в условиях открытого моря выполняются на морском гидрометеорологическом пункте стационарной океанографической платформы, расположенной на удалении около 500 м от береговой черты с передачей данных на берег по радиоизернету. Модернизация инфраструктуры субрегионального информационно-аналитического центра и процедур контроля качества натуральных данных позволила оперативно сформировать тематическую базу информационных ресурсов по гидрометеорологическим, океанологическим, гидродинамическим и другим природным условиям.

**Современное состояние изученности региональных анемобарических условий и динамики прибрежных течений.** Структура воздушных масс и основные черты атмосферной циркуляции над Черным морем обусловлены динамикой барического поля над Евразийским континентом [3]. При этом квазистационарный субтропический (Азорский) антициклон в совокупности с сезонными барическими процессами и системой синоптических атмосферных образований определяют анемобарические условия на Черном море. В зависимости от конкуренции доминирующих барических факторов, а также циклонической и антициклонической активности атмосферных потоков существенно меняется поле ветра над морем. Анемобарические изменения условий над морем достоверно выделяются в изменчиво-

сти атмосферного давления в районе мыса Кикинеиз. Среднегодовое значение атмосферного давления в регионе имеет несущественный разброс при минимуме в июле  $\sim 1010$  гПа и при максимуме в октябре  $\sim 1019$  гПа. Среднегодовые значения варьируют также незначительно. Значительная изменчивость атмосферного давления характерна для осенне-зимнего сезона интенсификации циклонической активности, где минимум атмосферного давления может спадать до значений 985 гПа, а максимальные значения кратковременно достигают 1040 гПа.

Поле ветра в приводном слое атмосферы над морем существенным образом влияет на динамику вод, но при этом очевидны существенные отличия в динамике вод открытой части Черного моря, зоны Основного черноморского течения и прибрежной зоны. В опубликованных материалах, например, [4], отмечено существенное влияние Крымских гор на структуру поля ветра в прибрежной зоне у ЮБК. При различных типах синоптических процессов орографические искажения ветрового потока проявляются по-разному. Однако, при всех различных типах ветровых процессов над открытой частью моря зона наиболее слабых ветров всегда располагается возле ЮБК. Во всех отмеченных случаях явно выражена тенденция ослабления интенсивности поля ветра в направлении прибрежной зоны ЮБК независимо от направления воздушных потоков над Черным морем. Основная гряда Крымских гор (высоты 990 – 1196 м) простирается в регионе на удалении около 4 км от береговой черты с запада – юго-запада на восток – северо-восток, перекрывая прямой доступ на ЮБК ветрам северных румбов. Такие региональные особенности геоморфологии прибрежной зоны у м.Кикинеиз формируют свои закономерности в направленности прибрежных воздушных потоков. В силу такой специфики рельефа суши в регионе ежегодно наиболее часто наблюдаются ветры, ориентированные вдоль горной гряды.

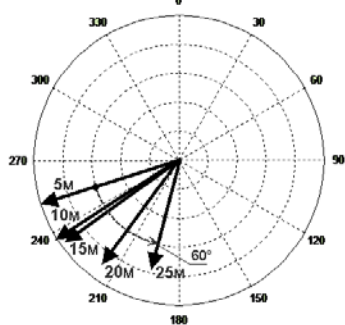
Очевидным энергетическим источником динамики вод Черного моря является Основное черноморское течение (ОЧТ) [1]. При общей циклонической циркуляции вод относительно глубокого моря над материковым склоном поверхностное течение ориентировано по изобатам рельефа дна при наибольших скоростях вблизи наиболее крутых участков склона. Для шельфа характерен своеобразный режим циркуляции вод со значительными поперечными сдвигами средних скоростей и весьма изменчивым волновихревым характером орбитальных движений. В прибрежной зоне интегральный перенос вод под воздействием ОЧТ выражен слабо, хотя остаточные вдольбереговые течения согласованы по направлению с ОЧТ, но значительно меньше по модулю. На фоне деградации крупномасштабных течений в прибрежной зоне формируется специфическая совокупность интенсивных движений вод, включая инерционные колебания, субинерционные захваченные берегом волны, системы прибрежных гидрологических фронтов с вертикальным переносом вод в зонах конвергенции и дивергенции, цугов интенсивных гравитационных внутренних волн и турбулентности.

В [2] рассмотрены основные методические, технические и технологические аспекты проведения РЕДЭКС с целью исследования динамики прибрежных течений антенной системой автономных эйлеровых измерителей при мониторинге региональных анемобарических условий с использовани-

ем стандартных и перспективных гидрометеорологических измерительных комплексов. В течение натурного эксперимента с 2002 по 2015 гг. на стационарной океанографической платформе был выполнен непрерывный цикл измерений и переустановки антенного набора автономных измерителей течений в 263 краткосрочных научных экспедициях. При исследованиях в 2002 – 2005 гг. на гидрологических горизонтах 5 и 20 м устанавливались автономные измерители течений старого образца типа МГИ-1301, работающие в дискретном режиме измерений. С 2005 по 2008 гг. проведена постепенная замена измерителей старого образца типа МГИ-1301 на векторно-усредняющие измерители типа МГИ-1308, которые в этот период времени использовались одновременно с МГИ-1301 на трех либо четырех (5; 10; 15; 20 м) гидрологических горизонтах. С сентября 2008 г. по декабрь 2015 г. антенные исследования динамики прибрежных течений выполнялись исключительно измерителями типа МГИ-1308 не менее чем на пяти (5; 10; 15; 20; 25 м) гидрологических горизонтах при глубине места постановки равной 28 м.

В настоящей работе обсуждаются результаты обработки данных натурального эксперимента по исследованию динамики прибрежных течений за период с 2009 по 2015 Гг. Внедрение новой информационной технологии при совершенствовании методов обработки, накопления, анализа и интерпретации репрезентативных векторных рядов динамики позволило уточнить знания о динамике прибрежных течений, достоверно выявить их вертикальную структуру и динамические особенности, количественно оценить доминирующие энергетические диапазоны их изменчивости.

**Обсуждение результатов РЕДЭКС.** По результатам работы [2] выявлен стационарный режим региональных течений при устойчивой вертикальном сдвиге направлений векторов прибрежного течения по глубине. На рис.1 показано в плане пространственное распределение среднесуточных нормированных на максимальное значение модуля скорости векторов прибрежного течения, где выделен циклонический разворот вектора придонного течения на глубине 25 м на угол порядка  $60^\circ$  по отношению к направлению вектора течения на глубине 5 м при уменьшении модуля скорости течений с глубиной.



Р и с . 1 . Пространственное распределение среднесуточных нормированных на максимальное значение модуля скорости векторов прибрежного течения.

На основании фактического экспериментального материала в настоящей статье исследуется изменчивость среднесуточного режима прибрежных течений при поэтапном учете вклада отдельных, наиболее энергетически насыщенных составляющих динамики течений. Исходный эквидистантный интервал измерений компонентов вектора течений в эксперименте был установлен равным 15 с. Из исходных рядов динамики течений путем цифровой фильтрации были сформированы среднесуточные наборы, в которых практически нивелирован вклад интенсивной волно-вихревой изменчивости инерционно-гравитационного диапазона и турбулентности для последующей дос-

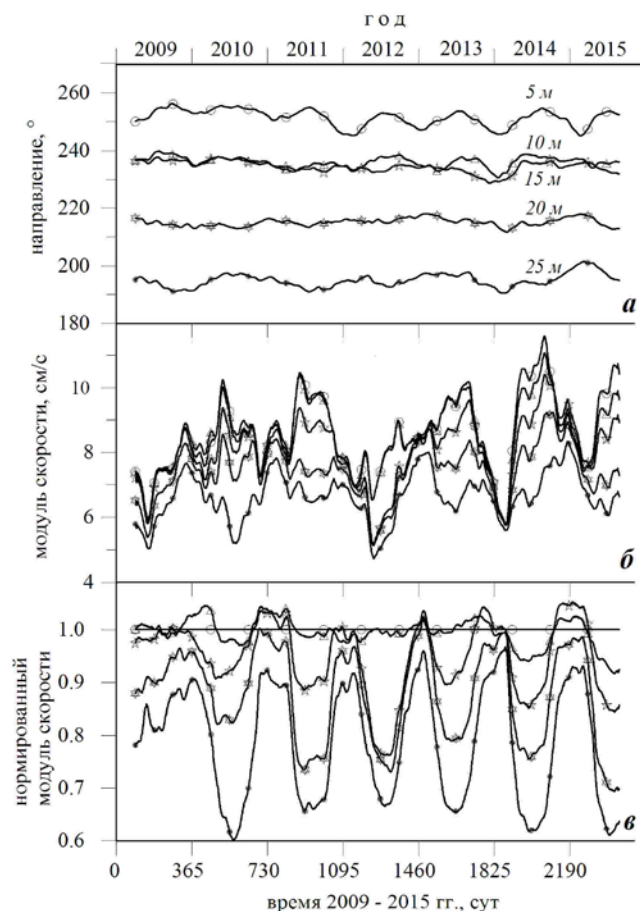
товерной обработки и анализа данных течений. На основании семилетних рядов динамики были рассчитаны спектры изменчивости течений в диапазоне периодов колебаний от 2 сут до 2 мес. На спектрах колебаний кинетической энергии течений для горизонтов 5; 10; 15; 20 и 25 м достоверно выделена совокупность разделяемых спектральных максимумов в диапазоне колебаний с периодами около 11 и 6,5 сут, а также присутствуют регулярные колебания с периодами около 3 сут. На всех спектрах указанные энергетические максимумы колебаний течений по своим уровням превышают пределы 95 % доверительной вероятности. Выделено статистически значимое спадание уровней кинетической энергии колебаний течений между горизонтами по глубине. Исключение составили спектры для горизонтов 10 и 15 м, где взаимные различия спектральных уровней находятся в пределах 95 % доверительной вероятности, что позволяет считать наблюдения на этих двух горизонтах статистически идентичными.

По результатам спектрального анализа изменчивости анемобарических условий на ЧГП за семилетний период 2009 – 2015 гг. в диапазоне периодов колебаний от 2 сут до 2 мес. установлено следующее:

- в спектре колебаний атмосферного давления достоверно выделяют спектральные максимумы колебаний на периодах около 16 и 8 сут;
- в спектре колебаний уровня моря присутствуют регулярные колебаний с периодами около 16 и 7,5 сут, спектральные уровни которых не превышают пределы 95 % доверительной вероятности.
- в спектре колебаний кинетической энергии ветра, рассчитанном за семилетний период по данным берегового гидрометеорологического поста, в рассматриваемом диапазоне колебаний значимых пиков не выделено, но в рассматриваемом диапазоне изменчивости следует отметить относительную интенсификацию колебаний ветра на периодах 4 – 21 сут. По результату сопоставления указанного спектра с климатическим спектром колебаний ветра, рассчитанным по данным берегового гидрометеорологического поста за 27 лет (1989 – 2015 гг.) в диапазоне периодов колебаний от 2 сут до 2 мес. установлено, что по климатическим данным спектральные максимумы колебаний ветра с периодами около 16 и 8 сут выделяются достоверно. Спектральные уровни колебаний ветра, рассчитанные за период 2009 – 2015 гг., существенно ниже уровней климатического спектра, причем их различия превышают пределы 95 % доверительной вероятности, т.е. за последнее десятилетие для региона ЮБК достоверно выделено снижение интенсивности колебаний ветра в указанном диапазоне временной изменчивости.

Согласно результатам, опубликованным в статье [2], энергетически насыщенным являются сезонный и полугодовой диапазоны изменчивости прибрежных течений. По данным спектрального анализа из климатического массива изменчивости берегового ветра за период 1989 – 2015 гг. также достоверно выделен интенсивный спектральный максимум колебаний на полугодовом периоде.

Для детальных исследований межгодовой изменчивости среднесуточного режима прибрежных течений были подготовлены среднесуточные ряды динамики течений и ветра, из которых путем цифровой фильтрации были удалены колебания с периодами менее полугода. На рис.2, а приведены



Р и с . 2 . Временная межгодовая (2009 – 2015 гг.) изменчивость характеристик среднесуточного течения: направления (*а*), модуля скорости (*б*) и нормированного модуля (*з*) на гидрологических горизонтах 5; 10; 15; 20; 25 м. Из реализаций исключен вклад полугодовых и сезонных колебаний течений.

ренней перестройкой динамики течений при изменении вертикальной плотностной стратификации прибрежных вод. Как показывает практика натурального эксперимента, у ЮБК изменения стратификации прибрежных вод могут быть как эволюционными и долгосрочными, например, в ходе природной сезонной перестройки, так быстрыми и краткосрочными, вызванными адвекцией вод различными динамическими факторами и явлениями.

На рис.3, *б*, *в*, *г* укрупненно изображены годовые за 2014 г. фрагменты рис.2, *а*, *б*, *в* соответственно, где детально прослеживается вертикальная структура типовой изменчивости прибрежного течения по глубине. Из анализа рис.3, *г* следует, что в летний сезон 2014 г. существует тип вертикальной структуры, где модуль скорости течения максимален в верхнем слое и существенно уменьшается с глубиной, в зимний сезон такой тип вертикальной структуры течений меняется кардинально. При этом модуль скорости

временные реализации изменчивости по глубине направления прибрежного течения за период наблюдений 2009 – 2015 гг., на рис.2, *б* – соответствующие изменения модуля скорости по глубине. Ранее был отмечен факт, что в летний сезон максимальны скорости прибрежного течения наблюдались, как правило, на глубинах 5 – 10 м. В связи с этим была применена процедура текущей нормировки скоростей для каждого горизонта на соответствующий по времени модуль скорости горизонта 5 м. На рис.2, *в* приведены результаты выполненной нормировки семилетних реализаций, что позволило наглядно упорядочить и систематизировать данные пространственно-временной изменчивости прибрежных течений. Тип распределения вертикальной структуры нормированных скоростей обусловлен внут-

течения в зимний сезон либо практически не меняется от поверхности до дна (январь – февраль 2014 г. на рис.3, *з*), либо имеет относительно небольшой максимум скорости в водной толще (ноябрь – декабрь 2014 г. на рис.3, *з*). В переходные весенний и осенний сезоны согласно рис.3, *з* происходит постепенная перестройка типа вертикальной структуры поля скоростей прибрежного течения. Внутригодовая изменчивость направления течения в этих реализациях отсутствует (рис.3, *б*). На рис.2, *а* в течение семилетнего периода наблюдений отмечается годовая изменчивость направлений течения, явно выраженная на горизонте 5 м.

На рис.4 представлены годовые за 2014 г. реализации изменчивости направления (рис.4, *б*), модуля скорости (рис.4, *в*) и нормированного модуля (рис.4, *з*) прибрежного течения, полученные из исходных среднесуточных рядов динамики после исключения вклада интенсивных колебаний с периодами 21 сутки и менее. Однако, в этих реализациях в полном объеме присутствуют вклады исходных интенсивных сезонных и полугодовых колебаний. Из сравнений соответствующих реализаций на рис.3 и 4, полученных из одних и тех же исходных данных, но при различном наборе и степени содержания вклада интенсивных низкочастотных колебаний, следует, что сама изменчивость течений может вызвать кратковременную смену типа структуры вертикального распределения скоростей прибрежного течения

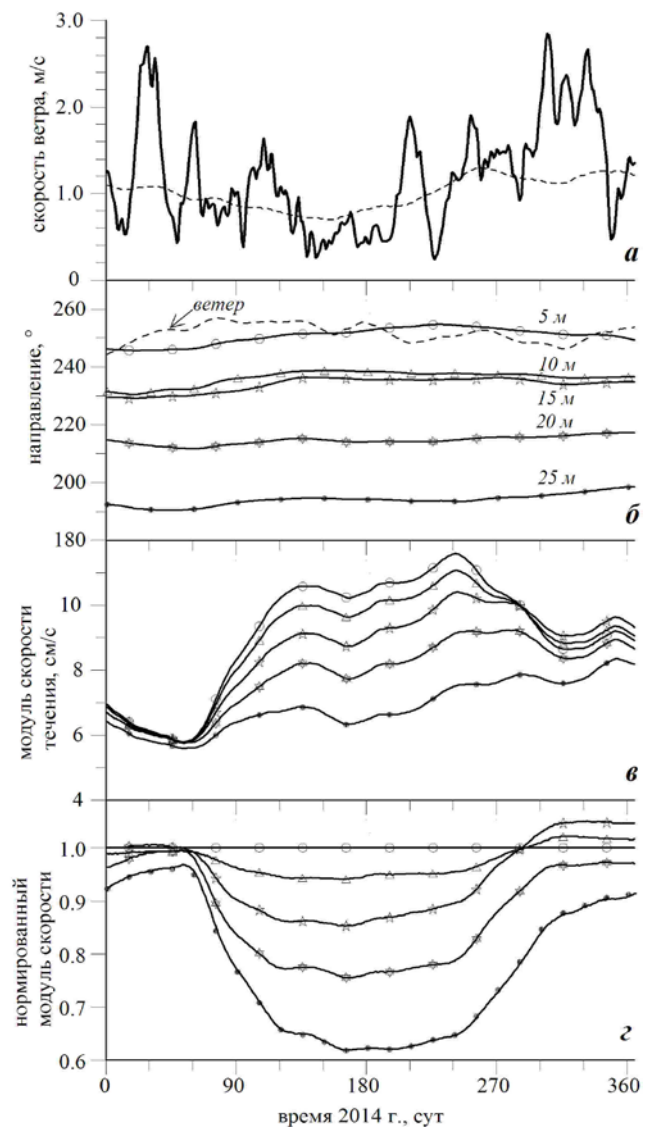


Рис. 3. Временная внутригодовая (2014 г.) изменчивость скорости ветра (*а*) и характеристик среднесуточного течения: направления (*б*), модуля скорости (*в*) и нормированного модуля (*з*) на горизонтах 5; 10; 15; 20; 25 м. Из реализаций исключен вклад полугодовых и сезонных колебаний.

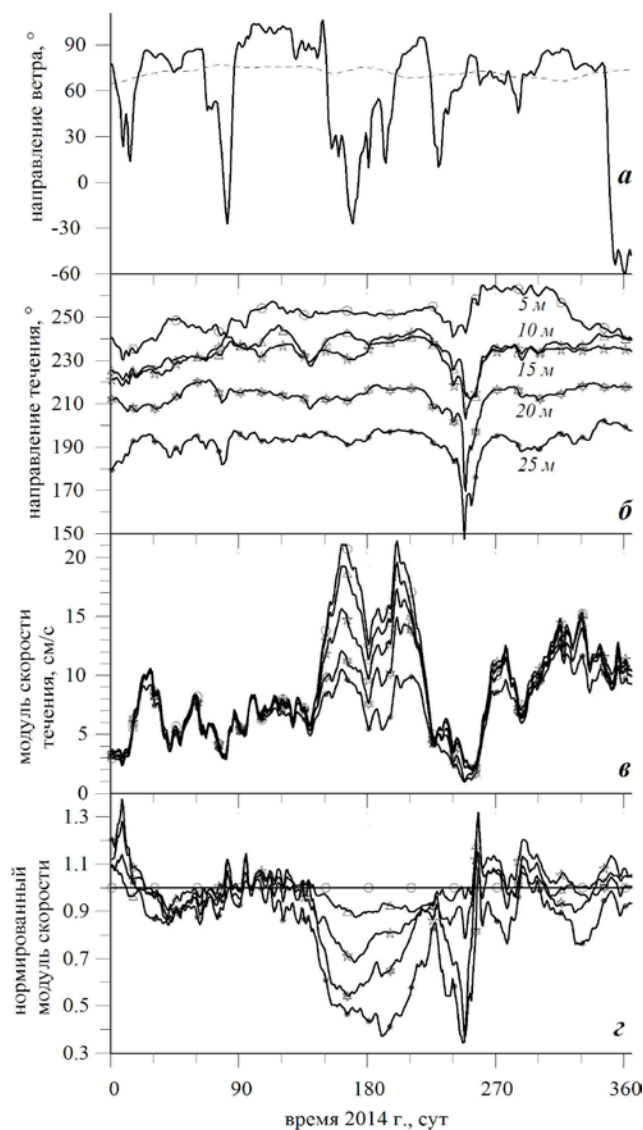


Рис. 4. Временная внутригодовая (2014 г.) изменчивость направления ветра (а) и характеристик среднесуточного течения: направления (б), модуля скорости (в) и нормированного модуля (г) на горизонтах 5, 10, 15, 20, 25 м. Из реализаций исключен вклад колебаний в диапазоне периодов менее 3 недели.

по глубине (август – сентябрь 2014 г. на рис.4, г). При этом направления течения по глубине на рис.4, б меняются кратковременно в фиксированных пределах при последующем восстановлении исходного устойчивого направления после прекращения действий очередного возмущающего фактора.

Одним из основных возмущающих динамических факторов для поверхностных вод в регионе является приповерхностный ветер и его изменчивость. Несмотря на проведенные ранее исследования [5] решение проблемы влияния берега на направление прибрежного поверхностного течения и роли при этом региональных ветров по-прежнему представляет практический интерес для региона ЮБК. В статье [4] отмечена роль Крымских гор в динамике поля ветра в регионе Черного моря, а результаты обработки многочисленных наборов экспериментальных данных, с рядом оговорок о погрешностях измерений и

пространственной изменчивости, например [5], подтверждают преобладание вдольберегового направления ветров и поверхностного течения.

Полученные в ходе РЕДЭКС многолетние наборы натуральных данных по изменчивости прибрежного течения и ветра, результаты их обработки и анализа позволяют дополнить представления о влиянии региональных ветров. На рис.4, а пунктирной линией представлена реализация изменчивости направления регионального ветра после удаления колебаний с периодами



полгода и менее, а на рис.3, *а* пунктирной линией показана изменчивость соответствующего модуля скорости ветра. Для наглядности графического сопоставления разнотипных векторных данных была выполнена процедура разворота данных вектора ветра на 180°. На рис.3, *б* пунктирной линией представлена реализация инверсного направления ветра (куда дует). Графическое сопоставление реализаций направлений течения и ветра на рис.3, *б*, демонстрирует практическое совпадение направлений среднего ветра со средним течением на горизонте 5 м. На рис.3, *а* и 4, *а* сплошной линией представлены реализации соответственно модуля скорости и направления регионального ветра, в которых содержится вклад интенсивных полугодичных и сезонных колебаний без вклада колебаний с периодами менее трех недель. На этих реализациях выделяются временные интервалы наибольшей интенсификации изменчивости регионального ветра (январь – февраль, ноябрь 2014 г. на рис.3, *а*) устойчивого направления (рис.4, *а*). Существенная интенсификация прибрежных течений наблюдается в летний период (рис.3, *в*; июнь, июль – август 2014 г. на рис.4, *в*) при наиболее слабых средних ветрах (рис.3, *а*). В зимней сезон, наоборот, наблюдается относительный спад интенсивности прибрежных течений (январь – февраль, ноябрь – декабрь 2014 г. на рис.3, *в*) при относительной интенсификации средних ветров (рис.3, *а*) устойчивого направления. Дальнейший анализ материалов совместной обработки изменчивости прибрежного течения и ветровых условий позволит систематизировать и обобщить результаты таких исследований.

**Заключение.** Предварительный анализ экспериментального материала, полученного по информационной технологии антенных измерений на Черноморском гидрофизическом полигоне у Южного берега Крыма при проведении регионального динамического эксперимента по исследованию динамики прибрежных течений и анемобарических условий в 2009 – 2015 гг., позволил получить новые научные знания об изменчивости прибрежных течений и уточнить ряд природных закономерностей их структуры.

Предложен новый метод исследований и обработки векторных натуральных данных с целью создания системы оперативного мониторинга изменчивости плотностной стратификации вод прибрежных зон Черного моря по данным вертикальной антенны измерителей течений.

Продолжение таких исследований способствует развитию региональной системы оперативного мониторинга и базы данных для спектральных сигнатур природных объектов региона [6], их актуализации для Черноморского гидрофизического полигона как опорного контрольного-калибровочного полигона с целью развития перспективных дистанционных технологий, а также в качестве тестового полигона для разработки и сертификации методик решения ряда прикладных задач и других научных исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блатов А.С., Иванов В.А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря.– Киев: Наукова думка, 1992.– 242 с.
2. *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 шель-

фовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: 2014. – вып.28.– С.42-50.

3. *Ковешников Л.А., Иванов В.А., Богуславский С.Г., Казаков С.И., Каминский С.Т.* Вопросы теплового и динамического взаимодействия в системе море-атмосфера-суша Черноморского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: 2001.– вып.3.– С.9-52.
4. *Чернякова А.П.* Типовые поля ветра Черного моря. // Сборник работ Бассейновой секции гидрометеорологической обсерватории Черного и Азовского морей. – Л: Гидрометеиздат, 1965.– вып.3.– С.78-121.
5. *Иванов Р.Н.* Влияние берега на направление ветрового поверхностного течения // Труды Морского гидрофизического института.– М: Изд-во АН СССР, 1957.– т.ХІ.– С.84-96.
6. *Лялько В.И., Попов М.А., Иванов В.А., Кузнецов А.С.* Перспективы развития морских и наземных стационарных опорных полигонов для геоэкологического мониторинга // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2009.– вып.19.– С.19-35.

Материал поступил в редакцию 13.10.2015 г.

A.S.Kuznetsov

#### **PROSPECTS FOR JOINT IN SITU RESEARCHS OF COASTAL CURRENTS DYNAMICS AND REGIONAL ANEMOBARIC CONDITIONS NEAR THE SOUTH COAST OF CRIMEA**

On the Black Sea hydrophysical polygon and stationary oceanographic platform located in the coastal zone near the Kikineiz Cape of the South coast of Crimea the regional dynamic experiment had been making from 2002 to 2015. It was aimed on reseach of the dynamics of coastal currents during monitoring of the variability of regional anemobaric conditions. The presence of modern measuring base and the introduction of new information technology to improve the processing and analysis allowed simultaneously obtaining long-term representative sets of time series of vector fields of coastal currents and winds in the atmosphere layer above the sea and over land. The brief description of the observations is given and the results obtained based on the long-term studies of coastal currents dynamics by vertical antenna of autonomous vector-averaging gauge metering a horizontal current component in the open sea are discussed. The prospects of the use of new information technology for in situ research, monitoring and classification of the coastal dynamic in the Black Sea are determined.

**KEYWORDS:** the Black Sea hydrophysical polygon, information technology, coastal zone, the South coast of Crimea, regional dynamic experiment, spectra of kinetic energy, ocean currents, wind conditions