

А.С.Кузнецов*, В.А.Иванов**, В.В.Зима**

**Экспериментальное отделение*

Морского гидрофизического института, пгт.Кацивели

***Морской гидрофизический институт, г.Севастополь*

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЙ У ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИГОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

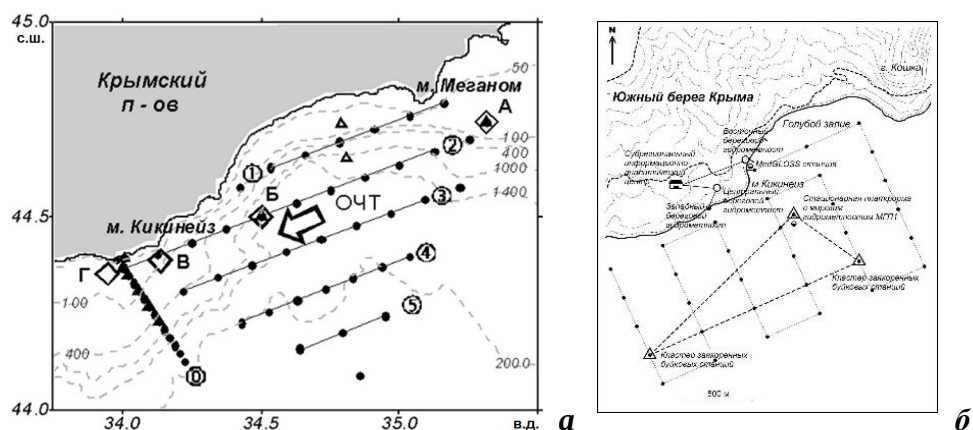
Предоставлены результаты многолетнего натурного эксперимента по исследованию динамики прибрежных течений на Черноморском экспериментальном полигоне, полученные по новой информационной технологии как совокупности перспективных измерительных средств, способов постановки натурного эксперимента, мониторинга качества натурных данных и комплексной обработки векторной информации. Внедрение новой технологии позволило расширить знания о динамике прибрежных течений, организовать на современном уровне развитие базы оперативной океанографии и опорного контрольно-калибровочного полигона для перспективных дистанционных аэрокосмических и гидролого-акустических исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *динамика морских течений, информационная технология, натурный эксперимент, полигонные исследования, измеритель течений, контроль качества, оперативная океанография.*

Бурное развитие геоинформационных технологий связано с реальным возрастанием зависимости человечества от природных условий. Совершенствование возможностей контроля и прогнозирования основных компонентов геосистемы является актуальной проблемой. Информация о состоянии окружающей среды становится стратегическим продуктом. В обеспечении прогнозов состояния окружающей среды особое место занимает стимулирование развития технических средств региональных наблюдательных систем за состоянием атмосферных процессов, динамики морских потоков энергии и вещества, методов обработки, анализа и интерпретации информации для эффективного решения прикладных задач, в том числе кризисного мониторинга, предотвращения чрезвычайных ситуаций др.

Фундаментальный задел Морского гидрофизического института (МГИ) в области оперативной океанографии позволил создать базовые элементы регионально-адаптированной комплексной системы контроля состояния прибрежных вод Черного моря, состоящей из ряда самостоятельных и взаимодействующих между собой подсистем, определяющих характеристики наиболее информативных компонентов морской среды различными перспективными методическими и техническими средствами.

Создание специально оборудованных стационарных наблюдательных полигонов – проверенная многолетней практикой информационная технология надежного получения и эффективного использования контактных натурных данных *in situ* для обеспечения контроля дистанционных аэрокосмических средств и средств гидролого-акустической томографии, разработки, сертификации и тестирования перспективных методик решения прикладных задач [1 – 3].



Р и с. 1. Схема гидролого-акустического томографического полигона (а) [1], на базе Черноморского экспериментального полигона (б) [2].

Технология натурального эксперимента. Важнейшей информативной характеристикой при исследованиях динамики морской среды является энергетическое состояние поля морских течений. Вычисления статистически достоверных оценок энергетического состояния и изменчивости морских потоков энергии и вещества *in situ* возможны при длительных измерениях пространственно-временного распределения модуля скорости и направления течения водных масс. Необходимые для такого эксперимента условия исторически созданы, технически обеспечены и существуют на стационарной океанографической платформе Черноморского полигона климатических и междисциплинарных исследований на базе Экспериментального отделения (ЭО) МГИ (пгт. Кацивели) в Голубом заливе у мыса Кикинеиз (рис.1, б). МГИ имеет богатый многолетний опыт натурных исследований динамики морских течений с использованием традиционных, контактных *in situ*, измерительных комплексов, таких как автономные эйлеровые измерители, лагранжевые дрейфтерные измерители, профилометры (типа ADCP), а также – перспективных дистанционных аэрокосмических методов и средств гидролого-акустической томографии. В условиях прибрежной и шельфовой зон на фоне деградации энергии крупномасштабных колебаний основного черноморского течения (ОЧТ) формируются специфические совокупности интенсивных (существенно нелинейных) средне- и мелкомасштабных движений вод, вергентных и турбулентных образований. В таких пограничных и барьерных зонах существенно снижается точность и статистическая достоверность как традиционных, так дистанционных методов измерений течений из-за неконтролируемого возрастания суммарных погрешностей измерений (методических и инструментальных), благодаря возникновению ряда принципиальных динамических погрешностей.

Сравнительный анализ погрешностей различных видов и типов существующих аппаратных комплексов измерителей течений с учетом современных возможностей и погрешностей позиционирования этих измерителей, позволяет утверждать, что наименьшие суммарные погрешности в условиях натурального эксперимента, очевидно, имеют эйлеровые измерения течений с неподвижного измерительного основания.

Разработана и внедрена в практику натурного эксперимента новая информационная технология мониторинга динамики течений [4] эйлеровыми измерителями в условиях открытого моря с неподвижного свайного измерительного основания в составе морской наблюдательной системы Черноморского экспериментального полигона у южного берега Крыма. Информационная технология контроля динамики прибрежных вод реализована как совокупность перспективных измерительных средств, способов организации и поддержки натурного эксперимента, мониторинга качества натурных данных и комплексной обработки набора векторных рядов динамики.

В качестве технических средств контроля динамики морской среды использован приборный комплекс автономных эйлеровых измерителей течений типа МГИ-1308 [5], векторно-интегрирующих измеряемые компоненты поля в заданных пространственно-временных пределах апертур. Вертикальная измерительная антенна из пяти векторно-усредняющих измерителей течений типа МГИ-1308 размещена от поверхности до дна на гидрологических горизонтах 5, 10, 15, 20 и 25 м со стационарной океанографической платформы, расположенной на удалении 500 м от берега при глубине места 30 м. В качестве вспомогательного горизонта для метрологического сличения показаний измерителей периодически используется измерительный горизонт в слое 10 – 15 м. Базовый временной интервал векторного осреднения измерителей выбран равным 5 мин. что, согласно алгоритму работы встроенного микропроцессора измерителя, соответствует фактической дискретности первичных измерений равной 15 сек. В этом варианте за один календарный год накопленный объем набора векторно-усредненных данных одного измерителя достигает 104 тыс. значений, которые вычислены по 2,08 млн. первичным отсчетам измерителя. На отдельных стадиях эксперимента устанавливался ежесекундный режим первичных измерений. В период эксплуатации измерители в установленном порядке проходили периодический метрологический контроль в лабораторных условиях. В период межповерочного интервала для проверки качества работы приборов в натурных условиях регулярно проводились сличения показаний триады измерителей на горизонтах 5, 10 и 15 м по специальным эмпирическим критериям с учетом фактических погрешностей измерителей.

Программно-математический технологический модуль реализован на базе персонального компьютера и обеспечивает контроль качества первичной векторной информации на основе комплексного анализа интегральных статистических и спектральных характеристик наборов данных, полученные синхронно по глубине на горизонтах измерительной антенны с фиксированной пространственной апертурой.

На предварительном этапе контроля качества информации в исходных реализациях выявлялись и удалялись из дальнейшей обработки наборы первичных векторных данных с аномальными значениями контролируемых интегральных характеристик. В качестве основных сопоставляемых характеристик использованы текущие, статистически обеспеченные, эмпирические функции распределения плотности вероятности модуля скорости и направления течений по глубине, а также спектральные характеристики плотности кинетической энергии скоростей и соответствующих ускорений течений. В качестве числового критерия для выявления спектральных аномалий

выбраны значения границ доверительных интервалов, рассчитанные по натурным данным. Выявленные при таком оперативном контроле отдельные измерители направлялись в лабораторию для дополнительной проверки качества измерений и работоспособности. Во всех выявленных аномальных случаях (в среднем до 4 % за год) проверкой достоверно установлено наличие механических повреждений или блокировки чувствительных элементов первичных измерителей, либо отказ или нештатная работа отдельных комплекствующих электронных узлов аппаратуры.

На последующих этапах обработки первичных данных технологический набор базовых расчетных модулей реализуют процедуры: выделения и замещения отдельных случайных ошибок, сбоев и пропусков информации; формирование скорректированных наборов векторно-осредненных синхронных рядов динамики течений в заданных временных и энергетических интервалах; традиционные и специальные виды обработки и анализа пространственно-временных наборов векторных данных.

Процедура получения и обработки натуральных векторных данных по предложенным алгоритмам позволила выявить скрытые аппаратные возможности измерителя типа МГИ-1308 и найти технологические возможности повысить на порядок точность измерений усредненных компонентов векторного поля течений до уровня чувствительности первичного измерительного преобразователя модуля скорости, достигающей величины $\pm 0,1$ см/с. Это преимущество новой информационной технологии позволяет повысить точности проводимых долгосрочных измерений, достоверно выделять вертикальной антенной измерителей когерентные компоненты региональных интенсивных гидродинамических процессов и явлений, что делает возможным репрезентативное исследование структуры и изменчивости характеристик поля слабых средних течений в прибрежной зоне эйлеровыми измерителями течений типа МГИ-1308 (1309).

Современная организация эксперимента и новая информационная технология получения репрезентативных характеристик векторных полей позволила существенно расширить возможности и пополнить базу натурных данных на основе долгосрочных наблюдений энергетического состояния и изменчивости потоков энергии и вещества окружающей природной среды прибрежного экотона суши и моря Черноморского экспериментального полигона у мыса Кикинеиз. Выполнено формирование репрезентативных характеристик текущих оперативных и архивных долгосрочных (2009 – 2014 гг.) векторных рядов динамики течений, полученных эйлеровыми измерителями при использовании новой информационной технологии для усвоения этих данных в субрегиональной ресурсно-ориентированной информационно-аналитической системе [6]. На основании исходной векторной информации, полученной измерительной антенной, сформированы репрезентативные наборы среднечасовых, среднесуточных, среднемесячных и среднегодовых векторных рядов динамики и проведен их анализ.

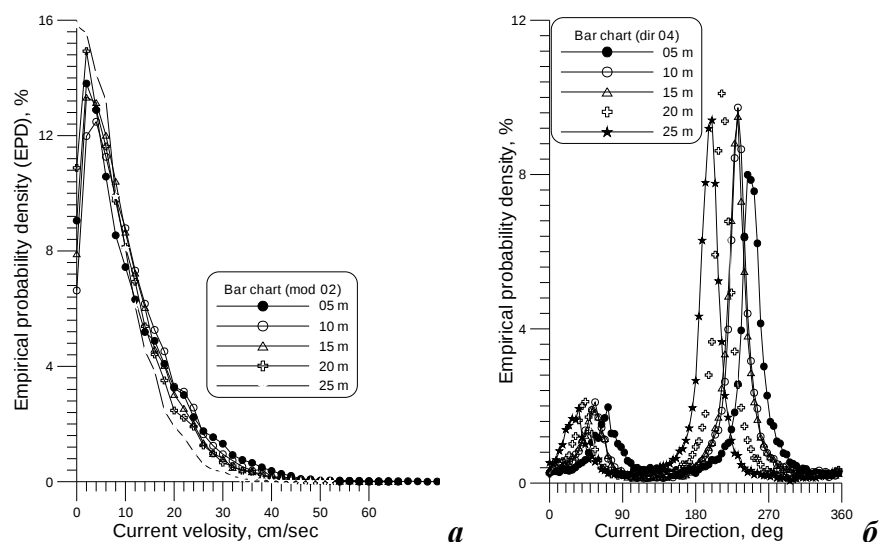
Обсуждение результатов эксперимента. По данным анализа многолетних (2009 – 2013 гг.) антенных измерений течений выявлена устойчивая фоновая структура средних течений в прибрежной зоне Черноморского гидрофизического полигона, а также выделены доминирующие интервалы и энергетические характеристики временной изменчивости течений, включая

сезонный, синоптический и мезомасштабный диапазоны.

Средние за 5 лет остаточные течения имеют очевидные закономерности и отличия в вертикальной структуре и изменчивости распределения модуля скорости и направления течения по глубине от приповерхностного до придонного слоя. В верхнем слое от 5 до 10 м значения модуля скорости среднего течения практически не изменяются и имеют максимальные значения около 8,5 см/с, спадая до величины около 6,5 см/с на глубине 25 м. При этом относительные уменьшения нормированного модуля скорости с глубиной, при нормировке на его максимальное значение, на пяти указанных гидрологических горизонтах соотносятся в пропорциях 1,00/1,00/0,95/0,88/0,78. В верхнем слое 5 м направление среднего за пять лет течения устойчиво в запад – юго-западном направлении вдоль берега и имеет значение около 252°. С глубиной наблюдается достоверный разворот направления течений по спирали против часовой стрелки от приповерхностного до придонного слоя. На глубине 25 м среднее течение устойчиво уже в юг – юго-западном направлении при значении около 194°. При этом суммарный разворот направления течения между горизонтами 5 и 25 м достигает величины около 60°, что составляет в среднем 15° на 5 м. Факты наблюдений подобного разворота течений по глубине в натурных экспериментах у южного берега Крыма отмечался ранее в ряде работ, например, [7]. В ходе нашего локального эксперимента достоверно установлено, что сдвиг среднего течения между горизонтами 5 и 10 м имеет значения около 16°. Однако, в слое между горизонтами 10 и 15 м сдвиг направлений средних течений фактически не выделен, т.к. различия не превышают значений 1,5° и сопоставимы с погрешностью измерений направления. В нижних слоях от 15 до 25 м достоверно установлено, что устойчивый угловой сдвиг направления среднего течения между горизонтами имеет значения около 20° на 5 м. Таким образом, достоверно установлен факт циклонического разворота направления средних течений с глубиной при устойчивом уменьшении значений модуля скорости и установлена структурная неоднородность углового сдвига направления средних течений по глубине.

Эмпирические функции распределения плотности вероятности модуля и направления течений, вычисленные из пятилетних наборов экспериментальных (первичных) данных пяти гидрологических горизонтов 05, 10, 15, 20 и 25 м, предоставлены на рис.2. Гистограммы модуля скорости построены в интервале ± 1 см/с, гистограммы направления течения – в интервале $\pm 2^\circ$. Анализ структуры гистограмм наглядно подтверждает выводы об определенном снижении энергетики течений и устойчивом развороте направления течений по глубине, что определено из анализа средних за пять лет характеристик. Исходя из формы гистограмм, направление движения вод по основному потоку, особенно на глубинах 10, 15 и 20 м, имеет выраженный узкополосный характер. Практически коллинеарный поток водных масс обратного основному потоку направления существует статистически в 4 – 5 раз реже основного.

При анализе структуры среднегодовых рядов динамики течений выделены те же, что и при анализе средних за пять лет, закономерности и отличия в вертикальной структуре и изменчивости распределения модуля скорости и направления течения по глубине. При этом межгодовые изменения и флуктуации модуля скорости среднего течения не превышают значений $\pm 0,4$ см/с,

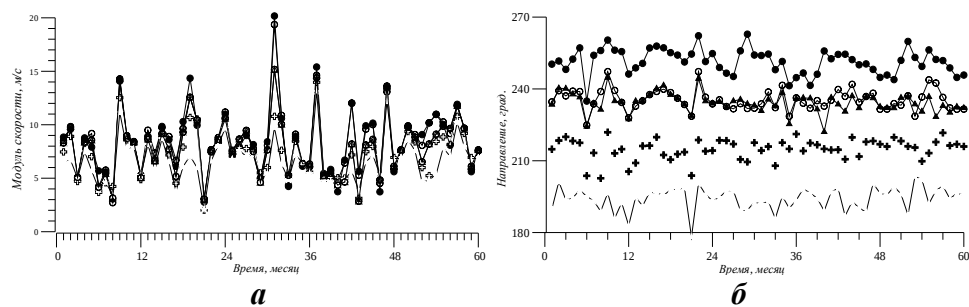


Р и с . 2 . Эмпирические функции распределения плотности вероятности (EPD) компонентов течений: модуля (а) и направления (б).

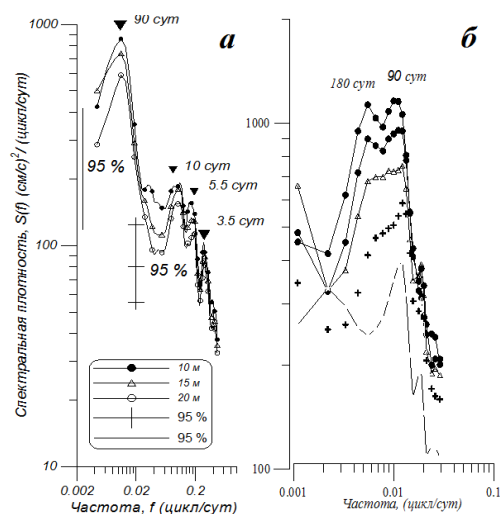
изменения направлений не превышают $\pm 7^\circ$.

При анализе среднемесячных рядов динамики течений выделяются те же универсальные закономерности и синхронные по глубине отличия в вертикальной структуре и изменчивости распределения модуля скорости и направления течения. Наличие в вертикальном распределении течений таких специфических слоев с квазипостоянным значением модуля скорости в слое 5 – 10 м, а также слоя практически без сдвига направления течения (10 – 15 м), позволяет использовать показания триады измерителей на глубинах 5, 10, 15 м для сличений с целью контроля качества работы измерителей непосредственно в натурных условиях при учете фактических погрешностей измерителей.

Флуктуации значений модуля скорости и направления среднемесячных течений, предоставленных на рис.3, происходят в широком диапазоне значений. Эти флуктуации носят выраженный характер, особенно четко в значениях модуля скорости. С целью выделения доминирующих энергетических интервалов пространственно-временной изменчивости течений был выполнен спектральный анализ подготовленных рядов динамики. На рис.4 предоставлены результаты спектрального анализа среднесуточных реализаций



Р и с . 3 . Среднемесячные реализации рядов динамики компонентов течений: модуля (а) и направления (б) по глубине. Обозначение горизонтов согласно рис.2.



Р и с . 4 . Спектральная плотность кинетической энергии колебаний течений на горизонтах 10, 15 и 20 м в диапазоне периодов колебаний 2 – 200 суток (а). Спектр кинетической энергии колебаний течений в диапазоне периодов колебаний 30 – 900 суток (б) при обозначении горизонтов согласно рис.2.

рядов динамики течений по глубине. В низкочастотной области колебаний на рис.4, а достоверно выделяется энергетический пик на доминирующем периоде около 90 суток. С целью детализации структуры этого энергетического пика был

проведен дополнительный спектральный анализ рядов динамики в диапазоне периодов колебаний 30 – 900 суток, что позволило уточнить энергетическую структуру в этом диапазоне изменчивости течений. На рис.4, б демонстрируются спектры плотности кинетической энергии колебаний течений на пяти гидрологических горизонтах, рассчитанные по пятилетним среднемесячным реализациям. Спектральные пики носят выраженный сезонный характер на периодах колебаний от 90 – 180 суток при спадании кинетической энергии колебаний по глубине.

На спектрах колебаний кинетической энергии течений (рис.4, а), рассчитанным из среднесуточных рядов динамики по пятилетним реализациям, присутствует совокупность разделяемых спектральных максимумов в диапазоне колебаний с периодами около 10 и 5,5 суток, а также регулярные колебания с периодом 3,5 суток. На этом обобщающем спектре выделенный пиковый участок по своим энергетическим уровням спектральной плотности в целом превышает пределы 95 % доверительной вероятности.

На спектрах колебаний кинетической энергии прибрежных течений (рис.5), рассчитанным из среднесуточных рядов по годовым реализациям за 2010 (рис.5, а), 2011 (рис.5, б) и 2012 гг. (рис.5, в), присутствуют те же достоверные пики, что и на обобщающем спектре (рис.4, а). Наряду с этим выделена временная изменчивость структуры пиков и их энергетической насыщенности, так спектр на рис.5, а (2010 г.) практически подобен по структуре и энергетике обобщающему спектру при относительно повышенной энергетике колебаний с периодом около 5,5 суток. На спектре рис.5, б (2011 г.) четко выражены пики на периодах около 10 и 3,5 суток, при этом пик с периодом около 5,5 суток очевидно не выявлен. На спектре рис.5, в (2012 г.) четко выражена иная совокупность пиков на периодах около 10; 5,5 и 3,5 суток. На этих спектрах, рассчитанным из среднесуточных рядов по годовым реализациям, отмеченные пики по своим энергетическим уровням спектральной плотности превышает пределы 95 % доверительной вероятности.

На спектрах колебаний кинетической энергии прибрежных течений, рассчитанным из среднечасовых рядов по годовым реализациям, отсутствуют какие-либо выраженные пики на более высоких частотах колебаниях,

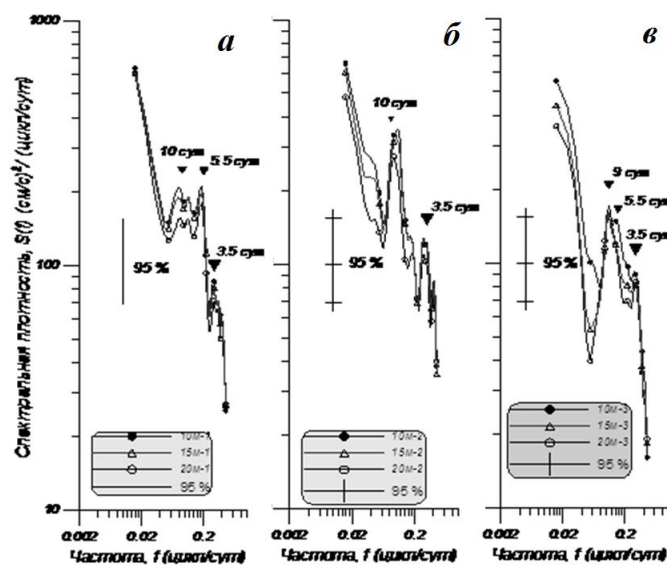


Рис. 5. Спектральная плотность кинетической энергии колебаний прибрежных течений на горизонтах 10, 15 и 20 м в диапазоне периодов колебаний 2 – 100 суток по годам: 2010 (а); 2011 (б) и 2012 (в) гг.

включая суточный, инерционный и полу-суточный диапазоны. При этом достоверно выделяется спадание уровня кинетической энергии колебаний по глубине. Инерцион-

ные колебания течений на средних за год временных энергетических спектрах достоверно не выделяются, но периодически по сезонам принимают регулярный характер, а в отдельных недельных реализациях инерционные пики на периодах колебаний около 17 часов, становятся четко выраженными, регулярными и по своим энергетическим уровням спектральной плотности превышают пределы 95 % доверительной вероятности.

На спектрах колебаний кинетической энергии прибрежных течений, рассчитанным по 5-ти и одно минутным реализациям различной продолжительности, колебания течений на частотах выше инерционной частоты, в том числе в гравитационном диапазоне внутренних волн, носят сложный характер и пространственно-временную структуру, зависящую от многих факторов, в том числе от конкретных гидрологических и региональных аномобарических условий.

Заключение. Комплексный анализ многолетних наборов сформированных рядов динамики векторных полей позволил достоверно исследовать состояние, энергетику, вертикальную структуру и пространственно-временную изменчивость прибрежных течений на Черноморском полигоне климатических и междисциплинарных исследований, оценить эволюционную направленность гидродинамических процессов и явлений. Существенно расширены знания о динамике прибрежных течений, новые факты позволили достоверно выявить их структуру и динамические особенности, количественно оценить доминирующие энергетические диапазоны изменчивости.

Внедрение новой информационной технологии позволило организовать на современном уровне развитие базы оперативной океанографии и инфраструктуры опорного контрольно-калибровочного полигона для перспективных дистанционных аэрокосмических исследований.

Дальнейший специальный анализ эмпирического материала по динамике течений совместно с гидрометеорологическими данными субрегиональной информационно-аналитической системы [6] позволяют установить природные закономерности и выявить причинно-следственные связи исследуемых процессов и явлений в регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов В.А., Сабинин К.Д., Кузнецов А.С.* Основы создания информационной технологии акустического мониторинга вод Черного моря // Физические проблемы экологии (экологическая физика) № 6.– М.: Физфак. МГУ, 2001.– С.50-57.
2. *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: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып.19.– С.19-35.
3. *Иванов В.А., Терехин Ю.В., Пустовойтенко В.В., Кузнецов А.С.* Концептуальные основы и современная стратегия построения морского подспутникового полигона / Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014.– С.7-28.
4. *Kuznetsov A.S.* Technology for Marine Environment Dynamics Control in the Coast Area // IC Marine Research Horizon 2020.– Varna, Bulgaria, 2013.– P.43.
5. *Кузнецов А.С., Иванов В.А., Зима В.В.* Методические аспекты совместного использования измерителей течений МГИ-1301 и МГИ-1308 // Морской гидрофизический журнал.– 2000.– № 6.– С.67-75.
6. *Иванов В.А., Долотов В.В., Казаков С.И., Кузнецов А.С.* Развитие субрегиональной информационно-аналитической системы научного центра междисциплинарных исследований НАН Украины на базе Черноморского экспериментального полигона «Кацивели» // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып.21.– С.10-24.
7. *Богуславский С.Г., Казаков С.И., Кузнецов А.С.* Особенности режима течений у южного берега Крыма // Труды на Института по океанологии.– Варна, Българска академия по науките, 2005.– т.5.– С.25-34.

Материал поступил в редакцию 02.12.2014 г.

АНОТАЦІЯ Представлені результати багаторічного натурного експерименту з дослідження динаміки прибережних течій на Чорноморському експериментальному полігоні, отримані за новою інформаційною технологією як сукупності перспективних вимірювальних засобів, способів постановки натурного експерименту, моніторингу якості натурних даних і комплексної обробки векторної інформації. Впровадження нової технології дозволило розширити знання про динаміку прибережних течій, організувати на сучасному рівні розвиток бази оперативної океанографії та опорного контрольно-калібрувального полігону для перспективних дистанційних аерокосмічних і гідролого-акустичних досліджень.

ABSTRACT The results of long-term field experiment to study the dynamics of coastal currents on the Black experimental polygon are given. They were obtained by the new information technology as a set of advanced measurement tools, methods of natural experiment setting, monitoring of in situ data quality and complex processing of vector information. Introduction of new technology has allowed to expand knowledge about coastal currents dynamics, to arrange on the current level of the base of operational oceanography and control calibration test site for advanced aerospace remote sensing and hydrological-acoustic research.