# Результаты наблюдений океана из космоса по программе эксперимента «Диатомея» на РС МКС

П.О. Завьялов<sup>1</sup>, Л.И. Копрова<sup>1</sup>, П.В. Виноградов<sup>2</sup>, А.Ю. Калери<sup>2</sup>, Н.А. Арманд<sup>3</sup>, Ю.Г. Тищенко<sup>3</sup>, А.А. Грушин<sup>4</sup>, А.Н. Евгущенко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН 117997, Москва, Нахимовский проспект, 36 <sup>2</sup>РКК «Энергия» им. С.П. Королева 141070 Московская обл., г. Королев, ул. Ленина, 4а <sup>3</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН 141190 Московская обл., г. Фрязино, пл. акад. Введенского, 1 *E-mail: <u>tishchen@ire.rssi.ru</u>* <sup>4</sup>Центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина 141160 Московская обл., Звездный городок

Приведены результаты космического эксперимента (КЭ) «Диатомея» по изучению устойчивости географического положения и формы высокопродуктивных акваторий Мирового океана (МО), наблюдаемых из космоса по признаку цвета визуально-инструментальным методом, применительно ко всем биологическим сезонам года, полученные экипажами российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС) в 2003-2006 гг. Приводятся количественные и качественные показатели экспериментальных данных.

Одной из наиболее важных особенностей биопродуктивности океана является ее пространственно-временная изменчивость, определяемая протекающими в океане климатическими, гидрофизическими и гидробиологическими процессами. Крупномасштабный характер этих процессов предопределяет безусловную необходимость применения аэрокосмических средств для изучения характеристик пространственно-временной изменчивости высокопродуктивных акваторий Мирового океана.

Реализация такой возможности предусмотрена Программой эксперимента «Диатомея», нацеленной на получение информации о фоновых условиях, географическом положении и морфометрии биопродуктивных акваторий в океане, а также их изменениях во времени. Экипаж РС МКС получает данные о местоположении и форме полей планктона, решая относительно простую зрительную задачу поиска и пространственно-временной привязки цветоконтрастных образований в водах Мирового океана. Постоянное пребывание экипажей основных экспедиций на борту РС МКС открывает возможность получения разновременных, географически сопоставимых данных о развитии биопродукционных процессов в акваториях МО в поясе ±54° широты.

С 2001 г. в рамках КЭ «Диатомея» экипажами МКС выполнена обширная программа научных наблюдений и съемок акваторий Атлантики, Тихого и Индийского океанов, их морей и крупнейших заливов. Исходя из основной цели эксперимента, получен представительный массив данных, характеризующих фоновые условия, текущее положение и морфологию ряда высокопродуктивных акваторий. Наблюдались районы океанов, включающие в себя:

- динамически активные акватории;
- акватории со специфическим гидрологическим режимом;
- акватории интенсивных научных и научно-промысловых исследований.

В Таблице 1 представлено краткое океанографическое описание серии разновременных исследований, выполненных экипажами РС МКС в зонах действия четырех основных гидродинамических факторов биопродуктивности океана. Применительно к каждому из них в таблице приведен полный перечень районов проведенных наблюдений и съемок, а также значения кратности обсервации указанных районов. Это основной параметр, используемый при анализе устойчивости географического положения биопродуктивных акваторий и формы их границ. Максимальные значения упомянутого параметра представлены в последнем столбце таблицы с указанием соответствующего океанического района, откуда следует, что среди обследованных акваторий наиболее статистически обеспеченными (применительно к цели эксперимента) являются районы течения Гольфстрим, Северо-Атлантического подводного хребта, Бенгальского апвеллинга и Субполярного фронта Атлантики.

Одно из важных направлений экспериментальных исследований по программе «Диатомея» связано с отработкой методики непосредственного взаимодействия экипажей РС МКС с учеными судовых экспедиций, работающих на океанологических полигонах. Первоочередная цель такого взаимодействия - наведение исследовательских судов на изучаемые океанологические явления, хорошо наблюдаемые из космоса. В силу причин технического и организационного характера эта задача пока не решена в необходимом объеме. Но в процессе проведения эксперимента «Диатомея» экипажами РС МКС выполнена серия предварительных наблюдений и съемок ряда акваторий Мирового океана, используемых в настоящее время в качестве полигонов для проведения океанологических исследований традиционными судовыми методами.

В качестве примера на рис. 1 приведен один из снимков высокопродуктивной зоны на акватории Северной тропической конвергенции, наблюдаемой из космоса в секторе 130 - 132 з.д. Уверенно дешифрируются масштабы зоны, форма ее границ и океанический фон. Отснят район открытого океана, отличающийся вихревой изменчивостью, поэтому полученная фотоинформация важна не только для оценки масштабов и текущего положения зоны высокой биологической продукции, но и для изучения гидродинамической структуры района взаимодействия Южно-Пассатного (экваториального) и Межпассатного течений, влияния сложного горизонтального движения водных масс на динамику примеси (фитопланктона). Такая информация важна для построения теоретических моделей циркуляции вод открытого океана, используемых, в частности, для изучения процессов переноса пассивной примеси, флуктуации полей ее концентрации на поверхности и в приповерхностном слое океана.



Рис. 1. Высокопродуктивная зона на акватории Северной тропической конвергенции (130<sup>0</sup> - 132<sup>0</sup> з.д.)

Полученные снимки географически привязаны, систематизированы и пока используются для оценки информационных возможностей экипажей РС МКС с точки зрения наблюдений природной среды океана на акваториях научных полигонов и известных промысловых районов.

Представленная таблица отражает также океанографическую структуру серии наблюдений в акваториях интенсивных научных и научно-промысловых исследований. Такие наблюдения про-

ведены экипажами РС МКС с целью информационной поддержки судовых экспедиций, ведущих океанологические исследования традиционными контактными методами.

Особое внимание уделялось наблюдениям акваторий, отличающихся интенсивным биолюминесцентным свечением высокопродуктивных вод Тихого и Индийского океанов. Результаты подобных наблюдений имеют важное прикладное значение, обусловленное возможностью использования явлений свечения вод в качестве индикатора высокопродуктивных зон и источников интенсивного механического воздействия на водные массы (моретрясения, движение подводных и надводных судов, извержение подводных вулканов, взрывы и т. п.). Согласно данным из последнего столбца таблицы, наибольшей информационной обеспеченностью за счет эксперимента «Диатомея» на сегодняшний день отличаются акватории Большой Зондской дуги в Индийском океане, Западного сектора Тихого океана, Ирландского промыслового района и океанологического полигона «Титаник» в Атлантике.

Эксперимент еще не завершен, однако дешифрирование фотоснимков и видеофильмов, полученных в процессе визуально-инструментальных наблюдений указанных выше районов Мирового океана, а также оценка их океанологического содержания позволили отметить ряд наиболее значимых (по предварительным оценкам) результатов.

1. Впервые в практике пилотируемых космических полетов удалось реализовать программу регулярных наблюдений океана из космоса в пределах 6-летнего временного интервала, провести эти наблюдения применительно к общей научной цели, по единой методике и в сопоставимые сроки. Данный результат является важнейшей предпосылкой успешного достижения основной цели эксперимента «Диатомея».

2. Получен большой объем уникальной океанологической информации. В форме фотоизображений и видеофильмов, большей частью пригодных для тематического анализа, предоставлены разновременные натурные данные о состоянии природной среды океана в зонах действия основных гидрофизических, геологических и метеорологических факторов биопродуктивности океанических вод.

3. Кроме фундаментальной океанологии, значительная часть данных представляет интерес и для практики промысла морепродуктов, морской метеорологии, подводной навигации, разработки средств и методов дистанционного зондирования океана, специальной подготовки космонавтов и наземного персонала. К таким данным относятся, в первую очередь, сведения о географическом положении и масштабах полей планктона, о структуре облачности в центрах действия атмосферы, а также о районах интенсивных внутренних волн, айсберговых дислокаций и других навигационных опасностей.

4. Получены отдельные результаты, отличающиеся новизной.

• Решение задачи визуального обнаружения из космоса и регистрации явлений свечения биопродуктивных вод Индийского океана серийной видеокамерой. Полученный результат открывает возможность получения океанологических данных в полете на теневом участке орбиты с применением относительно недорогих серийных приборов без усилителя света..

• Решение задачи азимутальной привязки фотоизображения безориентирных акваторий, полученного с помощью ручной фотокамеры при произвольной ориентации видоискателя, задача решена с использованием видеокамеры, фиксированной в направлении надира и непрерывно снимающей подстилающую поверхность по всему фотосъемочному маршруту.

В процессе решения основных задач КЭ «Диатомея» получены дополнительные результаты, весьма полезные для практики океанологических исследований из космоса и нередко являющиеся основой при выборе объектов, условий и режимов космической съемки океана. К таким результатам относятся, например:

• получение новых данных о поверхностной неоднородности океанических вод, определение типа фотопленок, условий и режима фотографирования цветоконтрастных образований в океане, отражающих многие важные гидродинамические явления (течения, меандры, вихри, зоны апвеллинга и т.п.); • регистрация широкого набора дешифровочных признаков и космонавигационных ориентиров, хорошо наблюдаемых экипажами в малооблачных условиях, таких как отдельные острова, особенности береговой линии океанов, судоходные каналы, морские порты, крупные мосты, береговые отмели;

 цифровая видеосъемка крупномасштабных полей облачности над океаном, непрерывно выполняемая в процессе проведения каждого сеанса наблюдений по программе КЭ «Диатомея».
 Полученные при этом фильмы содержат видеоинформацию, существенно детализирующую ежедневные данные от метеорологических ИСЗ, получаемые, как известно, в узлах регулярной сетки размером 5° широты на 10° долготы;

 получение видеоинформации учебно-методического характера, использование которой в процессе специальной подготовки космонавтов значительно сокращает потери полетного времени на выполнение океанологических экспериментов в космосе.

Немаловажным является и то, что многообразие океанологических процессов и явлений, попутно и весьма успешно регистрируемых в процессе решения основных задач эксперимента «Диатомея», открывает возможность расширения предметной области экспериментальных исследований. Такое расширение может быть реализовано за счет придания статуса приоритетных не только заданиям регистрации полей планктона, но и целенаправленному и более детальному изучению гидрофизических, геологических, атмосферных и других факторов биологической продуктивности.

При реализации космического эксперимента «Диатомея» возникает ряд проблем.

Одна из них - отсутствие на борту РС МКС приборов, расширяющих возможности зрительного анализатора космонавта, а также научной аппаратуры, необходимой для получения количественных показателей собственного и рассеянного излучения системы «океан-атмосфера» в широком спектральном диапазоне.

Вторая проблема - это точная географическая привязка результатов визуальных наблюдений и фотосъемки океанологических объектов ручными камерами. Существующие способы привязки, основанные на вычислении координат подспутниковой точки по времени кадра, эффективны только для привязки результатов съемки в направлении надира и то при условии точного хода часов фотоаппарата. Приемлемых же способов привязки фотоснимков, получаемых «с рук» в режиме перспективной съемки акваторий, не имеющих ориентиров, в настоящее время не существует.

Обобщая сказанное, можно отметить, что в процессе реализации эксперимента «Диатомея» решен ряд научно-методических и технических вопросов, обусловливающих эффективное использование Международной космической станции в период ее полномасштабной штатной эксплуатации в интересах биоокеанологии.

Не все предусмотренные программой эксперимента вопросы решены, но основные предпосылки для этого созданы. На заключительном этапе реализации программы эксперимента «Диатомея» на борту PC МКС предполагается выполнение большого объема всесезонных фотосъемочных работ в наиболее репрезентативных районах Мирового океана, специально отобранных применительно к решению поставленных задач с учетом результатов предыдущих наблюдений.

По завершению упомянутых работ должна быть получена видеоинформация, в необходимой мере дополняющая массив уже имеющихся экспериментальных данных. Анализ такого массива с использованием тематических морских карт, архива сопоставимых с ним результатов судовых измерений, оперативных данных с океанографических ИСЗ должен дать аргументированный ответ на вопрос об устойчивости географического положения высокопродуктивных акваторий и их формы в контрастных зонах океана.

Гидродинамический фактор биопродук- тивности	РАЙОН НАБЛЮДЕНИЙ			Макси-	
	В Тихом океане	В Атлантике	В Индийском океане	мальная кратность наблюдений	
	Динамически активные акватории				
Поверхностные течения	Аляскинское (1), Кали- форнийское (7), Камчат- ское (1), Куросио (1), Перуанское (4), Северо- Тихоокеанское (2), Тече- ние Западных ветров (4), Южно-Пассатное (1)	Антильское (4), Бразиль- ское (4), Гвианское (2), Гольфстрим (19), Лабра- дорское (6), Северо- Атлантическое (8), Севе- ро-Пассатное (2), Течение Западных ветров (8), Фолклендское (5)	Агульяс (3), Сомалийское (1), Течение Западных вет- ров (3)	19 (Гольф- стрим): весна - 5; лето - 13; осень - 1	
Активное вихреобра- зование над подвод- ными хребтами	Восточно-Тихоокеанское поднятие (4)	Большая Ньюфаундленд- ская банка (4), Северо- Атлантический хребет (5), Южно- Атлантический хребет (4), Риу-Гранди (1)	Западно- Индийский (1), Кергелен (1), Мадага- скарский (2), Мозамбикский (1)	5 (Северо- Атлантиче- ский): весна - 2; лето - 2; осень - 1	
Прибрежный ветроуправляемый апвеллинг	Калифорнийский (7), Перуанский (5), Чилий- ский (8)	Бенгельский (10), Канар- ский (1), Марокканский (4)	-	10 (Бенгаль- ский): весна - 2; лето - 4; осень - 3; зима - 1	
Фронтальные зоны	Южно-Тропический фронт (2), Субантаркти- ческий фронт (2)	Северный Полярный фронт (2), Южный По- лярный фронт (3), Субан- тарктический фронт (5), Субполярный фронт (8)	Южный Тропический фронт (2), Субантаркти- ческий фронт (3)	8 (Субпо- лярный): весна - 3; лето - 2; осень - 2; зима - 1	
	Акватории интенсивных научных и научно-промысловых				
Биолюминесцентное свечение вод океана	Сейсмоопасный Курило- Камчатский район (2)	исследовании -	Сейсмоопас- ный район Большой Зондской дуги (3)	3 (Большая Зондская дуга)	
	Тайфуноопасный Запад- ный сектор (3)	-	Тайфуноопас- ная централь- ная область (2)	3 (Западный сектор Тихого океана: 10°- 50° с. ш.)	
Состояние морских экосистем	Панамский промысловый район (2), коралловые острова Океании (2)	Ирландский промысловый район (3)	Акватория юго-западной Австралии (2), акватория Большого Барьерного рифа (2)	3 (Ирланд- ский про- мысловый район)	
	Акватории комплек	сных океанологических исс	ледований	8.(0-	
	1 авайский полигон (Oaxy – 2002) (1)	Океанологические поли- гоны: - «Титаник» (8) - НИС «Академик Сергей Вавилов» - 2005 (1)	-	<ul> <li>8 (Океано- логический полигон «Титаник»)</li> </ul>	

Таблица.	Океанографическое	описание серии разновременных	исследований.
,	1 1		

# Вихревые течения в Черном море

### С.С. Каримова

Институт космических исследований РАН 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32 E-mail: <u>feba@list.ru</u>

В статье приведены результаты анализа спутниковых изображений, полученных с помощью радиометров AVHRR NOAA и MODIS AQUA в инфракрасном и видимом диапазонах спектра. В результате проведенного анализа уточнены сведения о вихревых элементах поверхностной циркуляции черноморских вод как квазистационарной (меандры, ринги, прибрежные антициклонические вихри), так и нестационарной (вихри, образующиеся из-за неоднородности береговой линии; вихревые цепочки и грибовидные течения) природы. Установлено, что прибрежная часть акватории, охваченная Основным черноморским течением, по всему периметру моря является областью повышенной гидродинамической неустойчивости, но при этом вдоль западного и восточного побережий активность нестационарных вихревых движений проявляется преимущественно в виде грибовидных течений, а вдоль северного и южного – в виде вихревых цепочек.

#### Введение

Особенности циркуляции поверхностных вод Черного моря и, в частности, вихревые элементы этой циркуляции относятся к разряду довольно хорошо изученных вопросов. В результате проведенных гидрологических исследований и разработки ряда численных моделей сложилась общепринятая, классическая картина образования вихревых структур в Черном море. Так, одним из основных источников вихреобразования в прибрежной зоне считается гидродинамическая неустойчивость Основного черноморского течения (ОЧТ), проявляющаяся в его меандрировании, образовании замкнутых кольцевых течений (рингов) с возможной последующей их трансформацией в вихри открытого моря [1]. Анализ межсезонных изменений ОЧТ показал, что усиленная мезомасштабная динамика и продуцируемый ею поперечный к берегу водообмен наблюдается летом в периоды ослабления ОЧТ [2].

Определенные районы прибрежной акватории Черного моря вследствие сочетания особенностей батиграфии и очертаний береговой линии настолько благоприятны для образования мезомасштабных вихрей, что последние наблюдаются там практически постоянно (так называемые квазистационарные вихри), и некоторые из них получили собственные имена (Кавказский, Батумский, Севастопольский и пр.) [3-5].

Другим, в некоторой степени эндемичным для Черного моря типом вихрей являются прибрежные антициклонические вихри (ПАВ), которые образуются в так называемой прибрежной зоне конвергенции между стрежнем ОЧТ и берегом [6-9].

Большой вклад в изучение крупно- и мезомасштабных вихревых течений вносят дрифтерные эксперименты. В частности, траектории дрифтеров подтвердили наличие в Черном море общего циклонического переноса вод с ОЧТ (хотя не очертили ни восточный, ни западный макромасштабный циклонический круговорот), а также наличие интенсивных мезомасштабных вихрей как в прибрежной, так и в центральной частях Черного моря [10].

Значительно хуже изучены особенности нестационарных вихревых образований, характерных для акватории Черного моря. К этому типу вихрей, в соответствии с [11], относятся вихревые цепочки; одиночные спиралевидные вихри; вихри, образующиеся вследствие неоднородности береговой линии; грибовидные течения и пр. В последнее время вихри этой категории, образующиеся в прибрежных водах российского сектора Черного моря, успешно изучаются с помощью данных спутниковой радиолокации, а также с применением мультисенсорного подхода [12-13].

В представленной работе на основе данных дистанционного зондирования инфракрасного и видимого диапазонов спектра был проведен анализ вихревых элементов поверхностной циркуляции черноморских вод как квазистационарной, так и нестационарной природы. К первым относятся ПАВ и кольцевые течения (ринги), а ко вторым – вихри, образующиеся из-за неоднородности береговой линии; вихревые цепочки и грибовидные течения.

# Данные и методика

В работе анализировались спутниковые изображения для акватории Черного моря, отражающие распределение следующих величин:

- температура поверхности моря (ТПМ), радиометры MODIS Aqua и AVHRR NOAA за период 09.2004-12.2007;

- нормализованная яркость восходящего излучения (MODIS Aqua, 551 нм) за период 04.2006-12.2007;

- концентрация хлорофилла a (MODIS Aqua) за период 04.2006-12.2007.

Как известно, спутниковые изображения, полученные в инфракрасном диапазоне, могут с успехом применяться для изучения мезомасштабной циркуляции поверхностных вод океана (см., например, [14, 15]). В качестве своеобразных трассеров движения вод в этом случае выступают контрасты температуры. На рис. 1 представлено распределение TПМ, полученное по данным AVHRR, спутник NOAA-15, 23.10.2005 г. На данном изображении прослеживаются самые разнообразные вихревые элементы поверхностной циркуляции вод.



Рис. 1. Элементы поверхностной циркуляции вод в поле ТПМ. AVHRR NOAA-15. 23.10.2005. 14:41 UTC

Применение данных по концентрации хлорофилла *а* и нормализованной яркости восходящего излучения базируется на тех же принципах, что и для TПМ, но необходимо отметить следующее. В поле температуры контрасты, достаточные для выделения отдельных элементов циркуляции вод, наблюдаются практически повсеместно и, следовательно, проследить траектории движения можно так же по всей акватории. В отличие от температуры, в поле концентрации хлорофилла *а* или нормализованной яркости восходящего излучения достаточные концентрации хлорофилла *а* или нормализованной яркости восходящего излучения достаточные концентрации трассирующих частиц присутствуют далеко не всегда. Однако в тех случаях, когда они все же присутствуют, они хорошо визуализируют «безвихревую» составляющую элементов циркуляции, таких как струи, меандры, ринги пр. В данном случае также существенно, что благодаря повышенным концентрациям фитопланктона в прибрежных водах в поле концентрации хлорофилла *а* хорошо отобразились прибрежные антициклонические вихри, которые достаточно сложно обнаружить в поле иных параметров. В поле температуры, как правило, наилучшим образом проявляются нестационарные вихревые структуры, имеющие ярко выраженный спиралевидный характер.

## Квазистационарные вихревые структуры

Самый крупномасштабный вихревой элемент циркуляции поверхностных вод Черного моря – это ОЧТ. К сожалению, достоверное выделение струи ОЧТ по спутниковым изображениям редко оказывается возможным. На рис. 2 представлены изображения, на которых отчетливо выделяется не только струя ОЧТ, но и антициклонические меандры этого течения.



Рис. 2. Меандрирование ОЧТ по данным: а – MODIS AQUA от 22.07.2006 (нормализованная яркость восходящего излучения); б – AVHRR NOAA-18 от 7.09.2006

Другим важнейшим типом квазистационарных вихревых структур, так же связанным с ОЧТ, являются прибрежные антициклонические вихри. В результате проведенного анализа спутниковых изображений было установлено, что наиболее часто ПАВ наблюдаются у тех участков побережья, где минимальна ширина шельфа, т.е. вдоль южного и северо-восточного побережий; у западного берега это участок к югу от Варны, у северного – южное побережье Крыма.

Как правило, ПАВ имеют эллипсовидную форму с большой осью, примерно параллельной береговой линии. Величина продольного диаметра обнаруженных ПАВ варьирует от 30 до 120 км с медианным значением около 70 км. В работе [7] указываются значения этих параметров 28, 93 и 54 км соответственно.

С течением времени может происходить еще большее вытягивание вихря вдоль берега. На рис. 3 показана эволюция одного из ПАВ за период с 02.10.2006 по 06.10.2006; за это время его продольный диаметр увеличился с 60 до 120 км. Более подробную информацию об этом вихре, почерпнутую из контактных подспутниковых наблюдений, можно найти в [16].



*Рис. 3. Эволюция прибрежного антициклонического вихря по данным MODIS AQUA: a* – 2.10.2006; *b* – 5.10.2006; *b* – 6.10.2006

Довольно часто ПАВ обнаруживаются не по одному, а парами; некоторые такие случаи приведены на рис. 4.



Рис. 4. Пары прибрежных антициклонических вихрей: a – AVHRR NOAA-15, 4.08.2006; б и в – MODIS AQUA (нормализованная яркость восходящего излучения), 24.11.2006 и 19.07.2006

## Нестационарные вихревые структуры

Одной из самых совершенных форм проявления нестационарных вихревых структур являются вихревые цепочки. В соответствии со спутниковыми изображениями, наиболее часто цепочки вихрей наблюдаются по периметру моря над бровкой шельфа. Цепочки могут образовываться как циклоническими, так и антициклоническими вихрями; размер обнаруженных вихрей составляет от 20 до 90 км. Самые протяженные цепочки отмечены вдоль северного побережья моря, как, например, на изображении от 14.05.2005 (рис. 5а). Цепочки, подобные изображенной на этом рисунке, образуются в районе к югу от Керченского пролива квазипериодически и, как правило, составлены из антициклонических вихрей, но могут состоять и из циклонических (рис. 5б). Вихри, образующие цепочку, могут отстоять на значительное расстояние друг от друга. На рис. 5в показана цепочка, составленная из трех циклонических вихрей, протянувшаяся вдоль Кавказского побережья на 400 км.



Рис. 5.Поля ТПМ, полученные по данным AVHRR NOAA: a – 14.05.2005; б – 22.10.2005; в – 13.03.2005

Типом вихревых структур, промежуточным между ПАВ и нестационарными вихрями, являются вихри, образующиеся вдоль восточной половины южного побережья моря из-за неоднородности береговой линии. Как правило, здесь образуются антициклонические вихри округлой спиралевидной формы с диаметром около 80 км (см. рис. 1).

Еще одной широко распространенной формой нестационарных вихревых движений являются грибовидные течения. Наибольшее количество грибовидных течений образуется в двух районах акватории Черного моря. Первый из них расположен вдоль Кавказского побережья, а второй – по линии Евпатория – Бургас. Ориентация обнаруженных грибовидных течений самая разнообразная. Почти у всех из них ширина «шляпки» на 15-30% превышает длину «ножки», как, например, у грибовидного течения, представленного на рис. ба. Линейные размеры этих структур варьируют от 60 до 240 км. В 60% случаев антициклоническая часть по занимаемой площади и степени развития преобладает над циклонической, т.е. имеет место асимметрия вихревого диполя (рис. 6б). На этом рисунке также можно заметить, что антициклоническая часть «гриба» входит в состав антициклонической цепочки вихрей.



Рис. 6. Грибовидные течения в поле ТПМ (AVHRR NOAA): a – 25.05.2006; б – 4.11.2004

В некоторых случаях удается обнаружить компактную «упаковку» вихревых диполей. На рис. 7 показаны два изображения, полученные со спутников NOAA-15 и NOAA-16 с интервалом в 6,5 часов. На первом из них отчетливо выделяется грибовидное течение, «ножка» которого ориентирована с северо-запада на юго-восток (рис. 7а). Однако при взгляде на второе изображение можно заметить, что антициклоническая часть грибовидного течения с предыдущего изображения входит в состав другого грибовидного течения, ориентированного перпендикулярно к первому (рис. 7б).



Рис. 7. Компактная «упаковка» грибовидных течений. AVHRR NOAA, 8.11.2004. a – 04:32 UTC; б – 10:57 UTC

### Заключение

Как было наглядно продемонстрировано выше, изображения, полученные по данным радиометров AVHRR NOAA и MODIS TERRA/AQUA, могут нести важную информацию о вихревых структурах самого различного происхождения, при условии, что размер последних превышает 20 км. С помощью этих данных были уточнены статистические параметры некоторых типов вихрей. В частности, было показано, что

- продольный диаметр ПАВ может достигать 120, а не 90 км, как утверждалось ранее;

- в отдельных случаях может происходить довольно стремительное растяжение ПАВ вдоль побережья;

- распространенной формой ПАВ являются их цепочки, составленные из двух (и, возможно, более) вихрей;

- наиболее часто ПАВ наблюдаются вдоль восточного побережья моря – от Керченского пролива до Батуми (рис. 8);

- грибовидные течения наиболее часто образуются вдоль западного и восточного побережий моря над бровкой шельфа, что указывает на совместное влияние преобладающих над акваторией ветров и неустойчивости ОЧТ;

- вихревые цепочки, обусловленные сдвиговой неустойчивостью – как циклонические, так и антициклонические – проявляются не только в мелких масштабах, но и в масштабах всего моря;

- часть акватории моря к югу от Керченского пролива между 44 и 45° с.ш. является областью повышенной гидродинамической неустойчивости, проявляющейся в квазирегулярном появлении здесь вихревых цепочек, составленных, как правило, из циклонических вихрей;

- южная периферия моря так же является областью квазирегулярного образования вихревых цепочек, но на характер проявления гидродинамической неустойчивости в этом районе большое влияние оказывает неоднородность береговой линии.

Таким образом, можно заключить, что прибрежная часть акватории, охваченная ОЧТ, по всему периметру моря является областью повышенной гидродинамической неустойчивости течений, но при этом вдоль западного и восточного побережий активность нестационарных вихревых движений проявляется преимущественно в виде грибовидных течений, а вдоль северного и южного (и частично восточного) – в виде вихревых цепочек (рис. 8).



Рис. 8. Ареалы распространения отдельных форм вихревой динамики поверхностных вод Черного моря. Значками ГТ отмечены области преобладания грибовидных течений, ВЦ – вихревых цепочек, × – области образования ПАВ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №06-05-65177-а. Спутниковые данные получены на портале Морского гидрофизического института НАН Украины.

## Литература

1. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Костяной А.Г., Кривошея В.Г., Скирта А.Ю., Соловьев Д.М., Станичный С.В., Шеремет Н.А., Шиганова Т.А., Якубенко В.Г., Грегуар М. Антициклонические вихри в глубоководной восточной части Черного моря летом-осенью 1999 г. (спутниковые и судовые наблюдения) // Исследование Земли из космоса, 2001. №5. С. 3-11.

2. Зацепин А.Г., Голенко Н.Н., Корж А.О., Кременецкий В.В., Пака В.Т., Поярков С.Г., Стунжас П.А. Влияние динамики течений на гидрофизическую структуру вод и вертикальный обмен в деятельном слое Черного моря // Океанология, 2007. Т. 47. №3. С. 327-339.

3. Гинзбург А.И., Контарь Е.А., Костяной А.Г., Кривошея В.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В., Лаптев С.Ю. Система синоптических вихрей над свалом глубин в северо-западной части Черного моря летом 1993 г. (спутниковая и судовая информация) // Океанология, 1998. Т. 38. №1. С. 56-63.

4. Stanev E.V. Understanding Black Sea Dynamics: Overview of recent modeling // Oceanography. Vol.18, No.2, June 2005. Pp. 56-75.

5. Staneva J.V., Dietrich D.E., Stanev E.V., Bowman M.J. Rim current and coastal eddy mechanisms in an eddy-resolving general circulation model // J. Mar. Systems. 2001. V. 31. P. 137-157.

6. Кривошея В.Г., Титов В.Б., Овчинников И.М., Москаленко Л.В., Скирта А.Ю., Монахов В.В. Новые данные о режиме течений на шельфе северо-восточной части Черного моря // Океанология, 2001. Т. 41. №3. С. 325-334.

7. Титов В.Б. Морфометрические параметры и гидрофизические характеристики прибрежных антициклонических вихрей в Черном море // Метеорология и гидрология, 2002. №4. С. 67-73.

8. Титов В.Б. Годовая изменчивость динамических параметров Кольцевого циклонического течения в северо-восточной части Черного моря // Метеорология и гидрология, 2003. №8. С. 80-88.

9. Титов В.Б., Прокопов О.И. Характерные черты динамики и структуры вод прибрежной зоны Черного моря // Метеорология и гидрология, 2002. №5. С. 59-67.

10. Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В., Еремеев В.Н., Кременецкий В.В., Мотыжев С.В., Поярков С.Г., Пулейн П.-М., Станичный С.В., Соловьев Д.М. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрифтерным данным // Океанология, 2004. Т. 44. №1. С. 34-48.

11. Гинзбург А.И. Нестационарные вихревые движения в океане // Океанология, 1992. Т. 32. Вып. 6. С. 997-1003.

12. Lavrova O., T. Bocharova. Satellite SAR observations of atmospheric and oceanic vortex structures in the Black Sea coastal zone. Advance in Space Research, 38 (10), Pages 2162-2168, 2006.

13. Lavrova, O., M. Mityagina, T. Bocharova, and M. Gade. Multisensor observation of eddies and mesoscale features in coastal zones. In "Remote sensing of the European Seas", V. Barale & M. Gade Eds., Springer Verlag, 2008. Pp. 463-474.

14. Sur H.I., Ilyin Y.P. Evolution of satellite derived mesoscale thermal patterns in the Black Sea // Prog. Oceanog. Vol. 39. Pp. 109-151. 1997.

15. Taupier-Letage I. On the use of thermal infrared images for circulation studies : applications to the eastern Mediterranean basin. In "Remote sensing of the European Seas", V. Barale & M. Gade Eds., Springer Verlag, 2008. Pp. 153-164.

16. Серебряный А.Н., Лаврова О.Ю. Антициклонический вихрь на шельфе северо-восточной части Черного моря: совместный анализ космических снимков и данных акустического зондирования толщи моря // Настоящий сборник.