

# НАБЛЮДЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ И ОКЕАНИЧЕСКИХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

*Т.Ю. Бочарова, О.Ю. Лаврова*

*Институт космических исследований РАН  
E-mail: tabo@iki.rssi.ru*

Анализ данных, полученных с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой, установленных на спутниках ERS-2 и ENVISAT, показал, что характерной особенностью северо-восточной прибрежной зоны Черного моря является высокая интенсивность динамических процессов в море и атмосфере. Экспериментальные работы 1999–2003 гг., проведенные ИКИ РАН в районе Новороссийска – Геленджика, были направлены на изучение возможности наблюдения этих процессов. Особое внимание уделялось изучению океанических вихревых структур небольших размеров (порядка 2–20 км), которые, как правило, не могут быть обнаружены ни корабельными контактными измерениями, ни спутниковыми оптическими средствами. В то же время они играют большую роль в процессах перемешивания и циркуляции вод в прибрежной зоне. В классе атмосферных вихревых структур рассматриваются вихри синоптического масштаба, а также локальные грибовидные течения.

## Введение

Сочетание особенностей топографии берега, дна, циркуляции морских вод и воздушных потоков в районе северо-восточного побережья Черного моря определяют высокую интенсивность динамических процессов в море и атмосфере, характерных для этого района. Вдоль всего побережья тянется хребет Кавказских гор. Береговая гряда имеет большое количество скальных выступов, а также узких расщелин, «спускающихся» к морю. Основное черноморское течение (ОЧТ) — главный элемент циркуляции вод Черного моря — имеет в этом районе северо-западное направление и обладает неустойчивым характером. Воздушные потоки также характеризуются неустойчивостью, особенно в осенние периоды, когда с берега дует сильный северо-восточный ветер.

Динамические процессы в море и атмосфере, обусловленные этими факторами, зачастую приводят к генерации вихревых структур. Их изучение имеет большое значение для понимания локальных механизмов перемешивания и циркуляции воды и атмосферы. Эти механизмы в большой мере определяют экологическое, гидродинамическое и метеорологическое состояние прибрежной зоны, постоянный мониторинг которого является насущной необходимостью для этого густонаселенного района с развитой промышленностью, сельским хозяйством и быстро растущим туристическим сектором.

Экспедиционные работы, проведенные ИКИ РАН на базе Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова в 1999–2003 гг., имели своей целью изучить возможность мониторинга процессов в прибрежной зоне с помощью средств спутниковой радиолокации [1]. В настоящее время исследования океана при помощи радиолокации являются одним из самых перспективных направлений спутниковой океанографии. Для решения научных задач наиболее доступными и высококачественными являются радиолокационные изображения, получаемые с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой, установленных на европейских спутниках ERS-2 и ENVISAT.

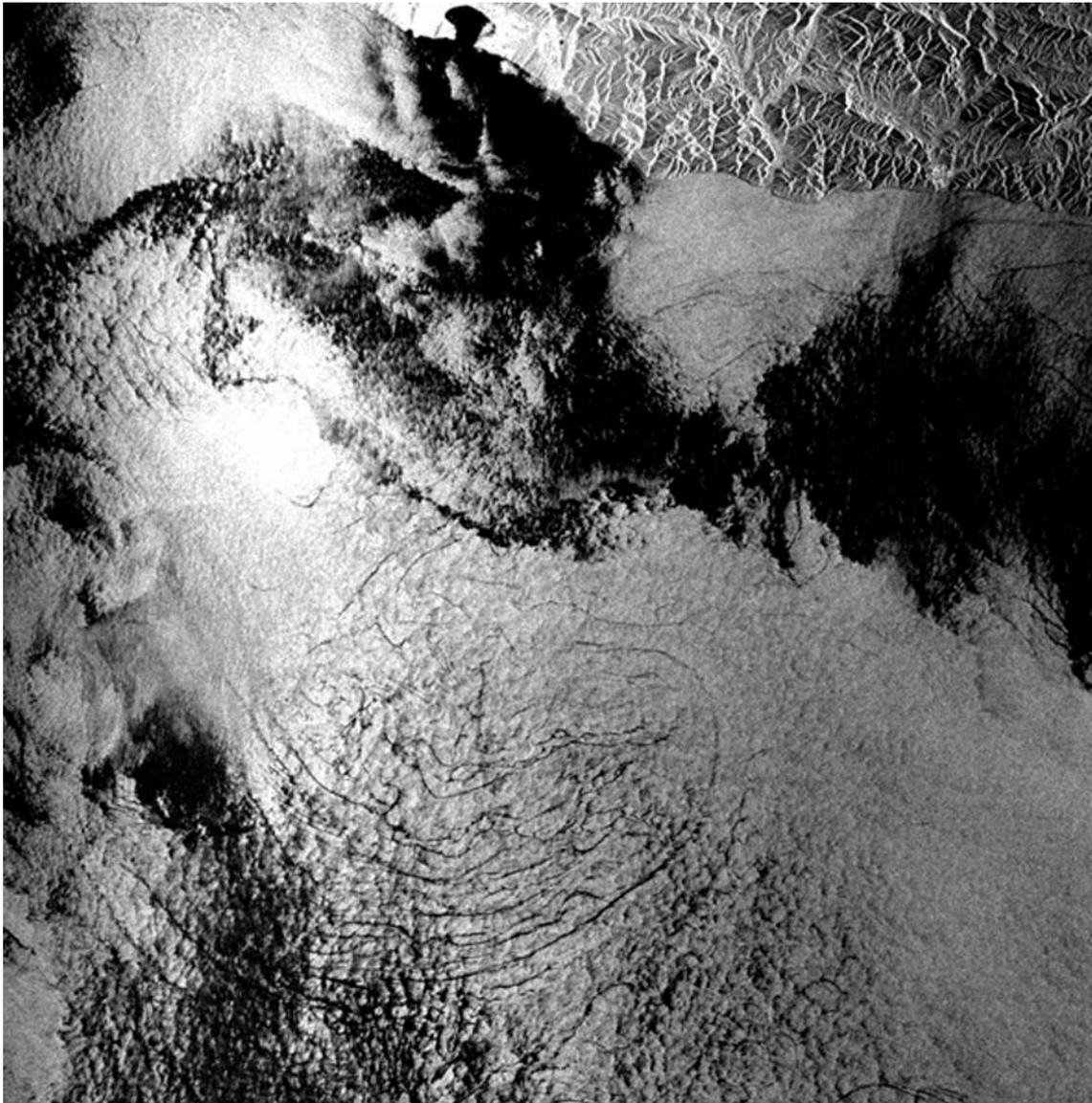
За период 1999–2003 гг. было получено более 40 спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ) северо-восточной акватории Черного моря в районе Новороссийска – Геленджика в различные сезоны и при разных метеорологических условиях. Квазисинхронно со съемкой прибрежной акватории данного района радиолокатором с синтезированной апертурой спутников ERS-2 и ENVISAT, радиометрами AVHRR в инфракрасном диапазоне спутников NOAA производились оптическая съемка и измерения основных гид-

рометеорологических параметров с берега и буя. Совместный анализ всех накопленных данных позволил изучить многие динамические процессы в море и атмосфере, в том числе вихревые структуры, которые являются предметом рассмотрения в данной работе.

## 1. Океанические вихревые структуры

Образование вихревых структур различных масштабов регулярно происходит в шельфовой зоне Черного моря. Эти процессы подробно изучались в течение многих лет сотрудниками Южного отделения Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова с помощью заякоренных автономных буйковых станций и акустических измерителей течений 3D — АСМ [3]. В их работах было показано, что Основное черноморское течение (ОЧТ) является главным элементом циркуляции вод Черного моря. Между стержнем ОЧТ и берегом существует зона антициклонической завихренности поля течений. Здесь формируются прибрежные антициклонические вихри (ПАВ). Формированию ПАВ способствует гидродинамическая неустойчивость ОЧТ, проявлением которой является его меандрирование. ПАВ зарождаются обычно в ложбинах антициклонических меандров. ОЧТ и ПАВ играют исключительно важную роль в гидродинамике и экологии прибрежной зоны. Под воздействием орбитального движения воды в ПАВ направление прибрежного течения эпизодически (при прохождении каждого ПАВ) изменяется на противоположное, в результате чего формируется бимодальный режим течения. В экологическом аспекте ПАВ, обладая свойством конвергентности, являются своеобразным аккумулятором загрязненных прибрежных вод, способствуя их самоочищению.

Спутниковые наблюдения ПАВ в восточной части Черного моря обычно проводились с помощью ИК-изображений с ИСЗ серии NOAA [4, 5]. В данных работах оценивались пространственные размеры ПАВ, прослеживалось их распространение и время жизни. Разрешающая способность изображений, получаемых с NOAA, позволяет изучать мезомасштабные вихревые структуры с диаметрами более 40 км при отсутствии облачного покрова. Использование РЛИ с ИСЗ ERS-2 и ENVISAT, имеющих пространственное разрешение 25 м, позволяет выявлять вихревые структуры значительно меньших масштабов и при любых метеорологических условиях. Эти структуры играют не меньшую, а, возможно, даже большую роль в процессах перемешивания и циркуляции прибрежных вод, чем мезомасштабные вихри. На РЛИ вихри в море визуализируются благодаря полосам снимков, т. е. зон выглаживания морской поверхности. Снимки образуются в результате наличия в прибрежных водах большого числа поверхностно активных веществ, как естественного, так и искусственного происхождения. Поверхностно активные вещества, меняя поверхностное натяжение, гасят рябь и тем самым уменьшают сечение обратного рассеяния. Они вовлекаются в орбитальные движения и, таким образом, как бы «прорисовывают» вихри на РЛИ. На рис. 1 показан пример проявления на РЛИ циклонического вихря, визуализированного на фоне поверхностных проявлений конвективных процессов в атмосфере благодаря снимковым полосам. Снимок получен 16 августа 2002 г. в 8:17 GMT в районе Геленджикской бухты с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) спутника ERS-2. Диаметр данного циклонического вихря составляет порядка 40 км, что сравнимо с размерами наблюдаемых на ИК-изображениях прибрежных антициклонических вихрей. Анализ двух ИК-изображений AVHRR, полученных с NOAA-16 за 8 ч до и через 15 ч после съемки РСА, показал, что южнее данного места находился больших размеров (порядка 120 км в диаметре) хорошо развитый долгоживущий антициклонический вихрь, на периферии которого и образовался коротко живущий циклонический вихрь меньших размеров. Заметим, что на ИК-изображениях от 16 августа 2002 г. циклонический вихрь не выявляется.

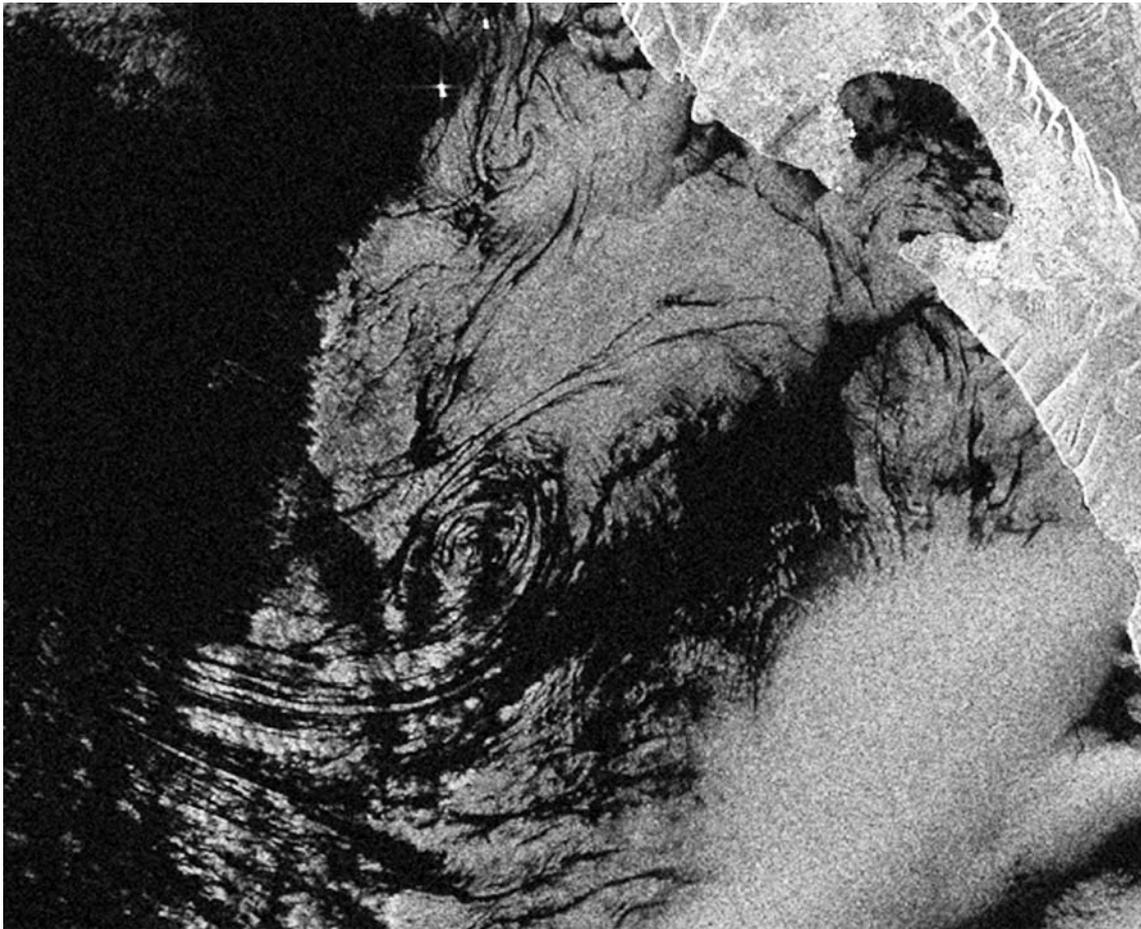


**Рис. 1.** Снимок ERS-2 SAR 16.08.2002 г. Крупный океанический циклонический вихрь

Ветер является одним из основных факторов, возбуждающих циклоническую циркуляцию в Черном море, включая и ОЧГ. Воздействие ветра на течение прямо пропорционально как продолжительности его действия, так и скорости. Для образования вихрей небольших масштабов воздействие ветра является определяющим. Так как для восточной части Черного моря наблюдается преобладание ветров восточного и северо-восточного направлений, то, как правило, наблюдаемые на радиолокационных снимках вихри масштабов 10–30 км также носят антициклонический характер. На рис. 2 представлен фрагмент РЛИ, полученного 16 октября 1998 г. в районе Геленджика. Темные полосы, соответствующие сликам поверхностно-активных веществ очерчивают антициклонический вихрь, диаметр которого составляет примерно 13 км. Восточнее него располагается циклонический вихрь (вместе они составляют диполь), который проявляется на РЛИ в виде зоны пониженного рассеяния. На рис. 3 и 4 приведены примеры радиолокационных образов активной циклонической деятельности как в районе Геленджикской бухты, так и в самой бухте. Диаметры наблюдаемых вихрей составляют от 3 до 15 км.



**Рис. 2.** Снимок ERS-2 SAR 16.10.1998 г., фрагмент 20×20 км. Океанический антициклонический вихрь. Диаметр вихря около 13 км



**Рис. 3.** Снимок ERS-2 SAR 18.09.2000 г., фрагмент 20×25 км. Два океанических циклонических вихря диаметром около 6 и 4 км



**Рис. 4.** Снимок ERS-2 SAR 27.07.2001 г., фрагмент 15×15 км. Два океанических вихря: антициклонический диаметром около 12 км и циклонический диаметром около 3 км (в Геленджикской бухте)

## 2. Атмосферные вихревые структуры

Радиолокационные изображения могут нести информацию о процессах в приповерхностном слое атмосферы в том случае, если связанные с ними вариации скорости и направления ветра модулируют шероховатость морской поверхности, что, в свою очередь, проявляется в модуляции сечения обратного рассеяния радиолокационного сигнала.

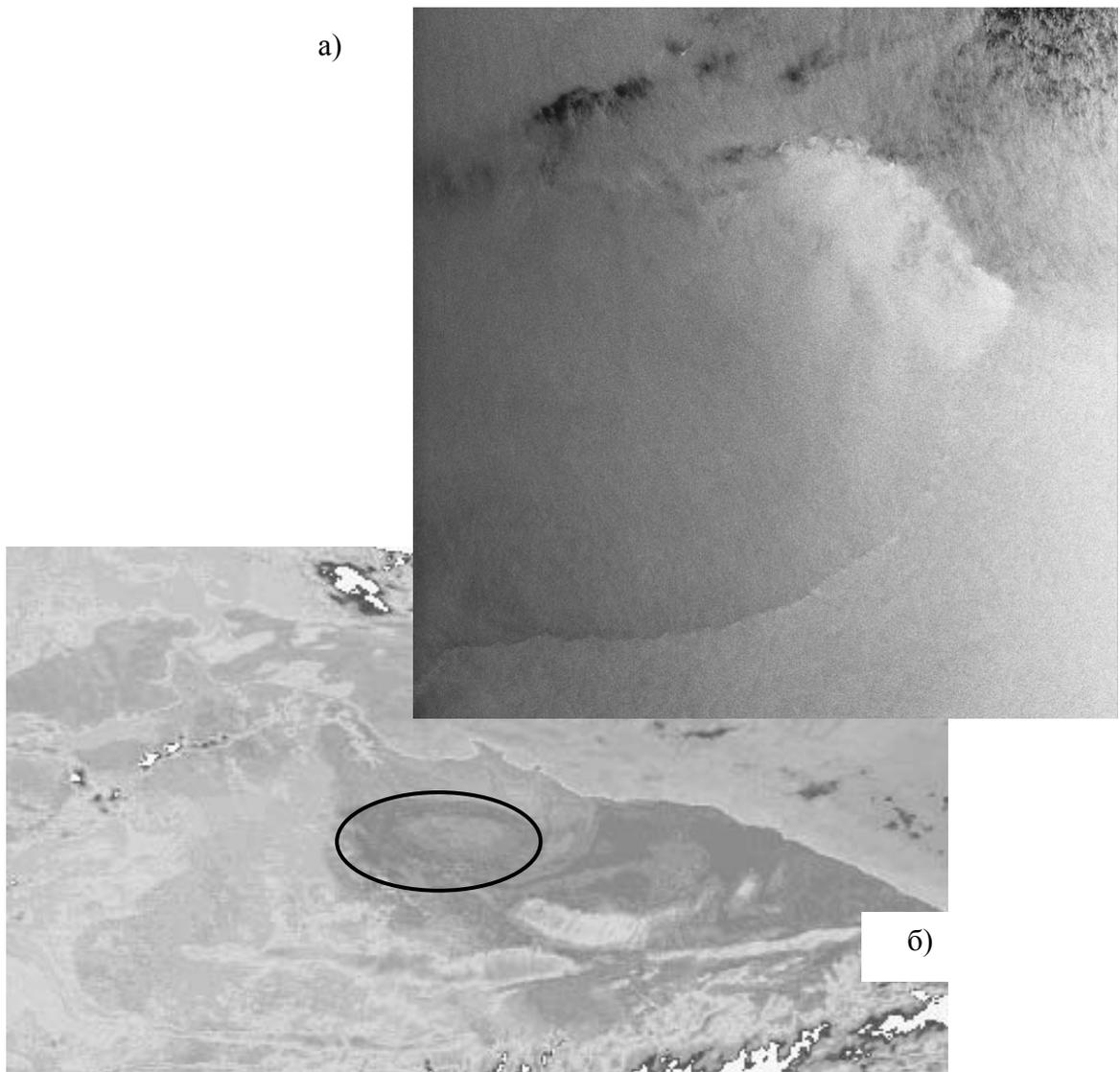
Атмосферные вихревые структуры распознаются на РЛИ по резко выраженному фронту по границе вихря и областям высокого контраста характерной завихренной формы. Иногда эти признаки дополняются пятнами пониженного контраста, соответствующими центру вихря.

Модуляции шероховатости морской поверхности подобного рода являются, как правило, результатом воздействия очень мощных, устойчивых атмосферных потоков с большими скоростями. Такие вихри обычно имеют размеры от 200 км в диаметре и более. Поэтому на РЛИ ERS-2 (100×100 км) мы можем наблюдать их только частично, и приходится привлекать другие источники информации для подтверждения гипотезы о наличии атмосферного вихря. Сигнатуры РЛИ ERS-2, приведенного на рис. 5а, по всем признакам являются проявлением части большого атмосферного вихря. Эта версия находит подтверждение при анализе близких по времени снимков NOAA ИК-диапазона, на которых четко идентифицируется большой антициклонический вихрь (рис. 5б).

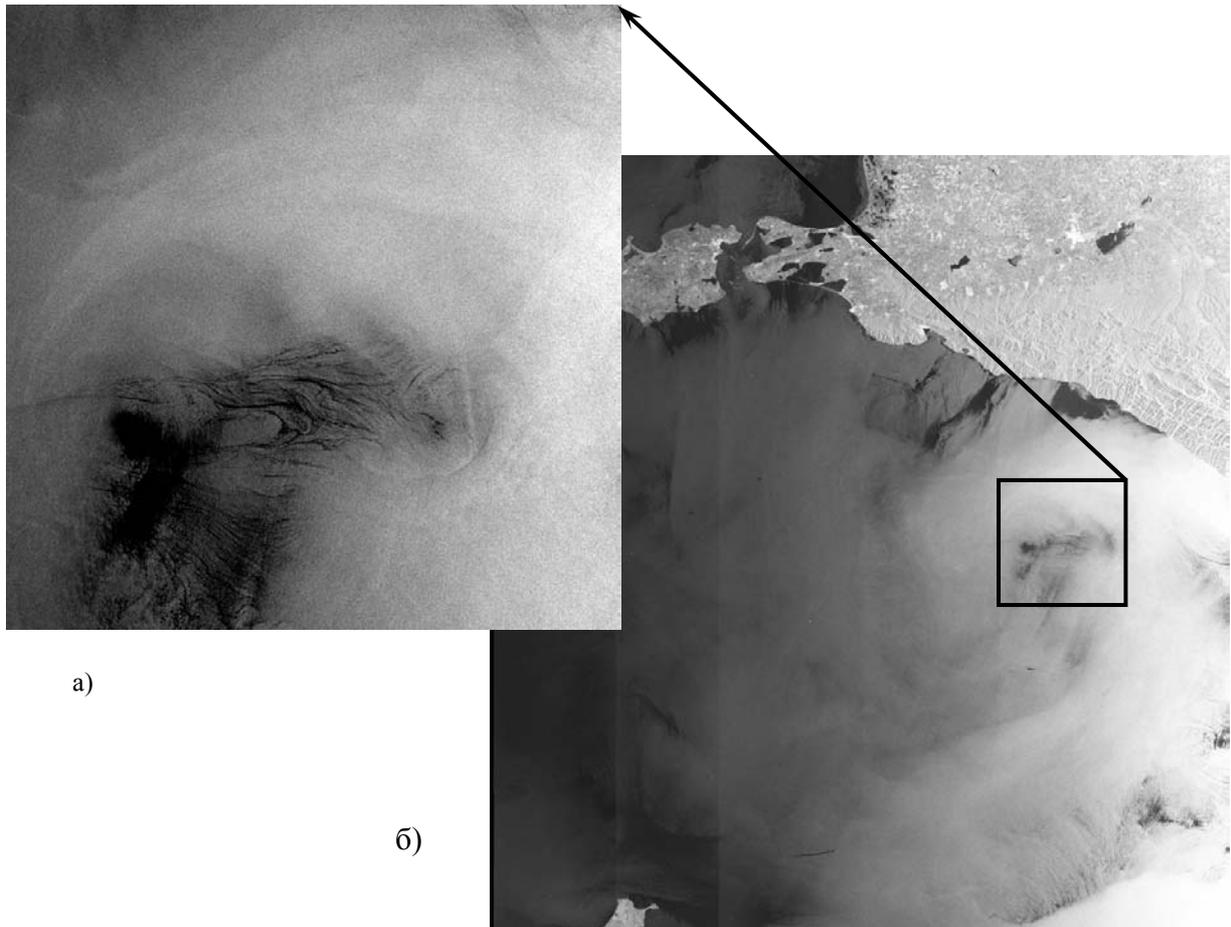
Для выявления синоптических атмосферных вихрей лучше использовать широкополосные РЛИ со спутника Envisat (400×430 км), которые могут полностью охватить подобные вихри. На рис. 6 представлены два РЛИ, ERS-2 и ENVISAT, полученные с получасовой разницей во времени. Первый снимок, рассматриваемый в отдельности, может быть неоднозначно интерпретирован. Подобные радиолокационные образы могут быть связаны и с наличием нефтяных загрязнений на поверхности моря. Наличие широкополосного изображения, полученного со спутника ENVISAT, не оставляет сомнений в том, что мы наблюдаем сигнатуры атмосферного вихря.

Помимо атмосферных вихрей большого размера, на РЛИ со спутника ERS-2 удалось идентифицировать так называемые грибовидные течения в атмосфере. Они относятся к специфическому виду хорошо развитых струйных течений. Данные течения представляют собой квазисимметричные пространственные структуры, являющиеся комбинацией узкой струи с парой вихрей противоположного знака на конце, так что структура в целом напоминает гриб в разрезе. В большинстве случаев длина струи  $L$  и размер вихревой части  $B$  — величины близкие, а ширина струи не превышает 10–25 % ее длины (рис. 7б).

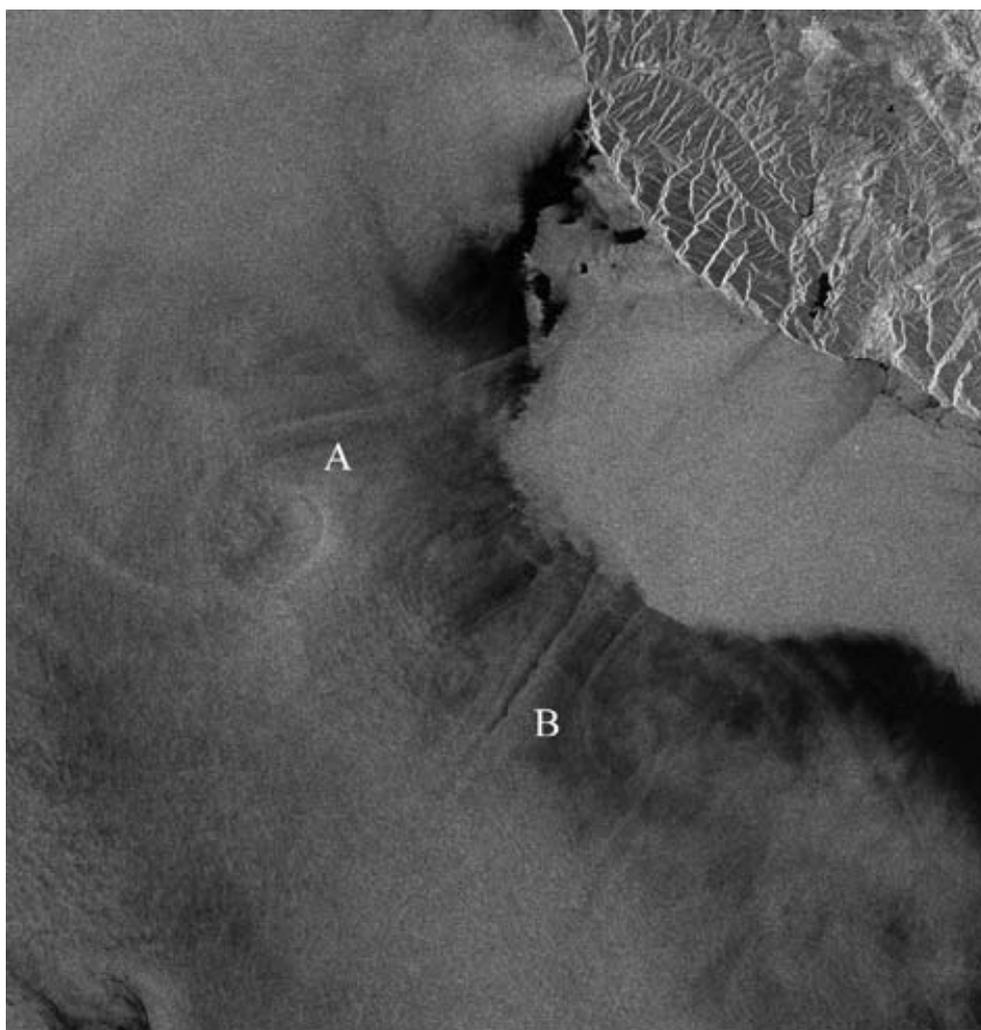
Грибовидные течения возникают при локальном кратковременном приложении импульса к поверхности или приповерхностному слою воды за счет локальных источников кинетической энергии различной природы [6]. В прибрежных зонах — это местные ветры, приобретающие струйный характер под влиянием геометрии берега. Высокие скорости, которых достигает ветер в таком течении, обуславливают наличие резкого фронта по всей внешней границе течения. Эти контрастные фронтальные структуры и наблюдаются на радиолокационных изображениях. На РЛИ на рис. 7 видны сигнатуры двух грибовидных течений. Длина струи течения 'А' составляет около 30 км, диаметры вихрей — порядка 25 км.



**Рис. 5.** Снимки ERS-2 SAR (а) и NOAA ИК 15.09.99 (б). Атмосферный циклонический вихрь (выделен черным овалом)



**Рис. 6.** Снимок ERS-2 SAR 17.08.03, 8:12 GMT (а). Центр атмосферного циклонического вихря. Снимок Envisat ASAR Wide Swath (широкополосный) 17.08.03, 7:43 GMT (б). Атмосферный циклонический вихрь виден полностью



**Рис. 7.** Снимок ERS-2 SAR 04.10.99, фрагмент 75×75 км. Грибовидные течения в приповерхностном слое атмосферы обозначены буквами 'А' и 'В'

### **Заключение**

Проведенный анализ спутниковых РЛИ северо-восточной прибрежной зоны Черного моря подтверждает их высокую информативность с точки зрения мониторинга динамических процессов в приповерхностном слое моря и атмосферы.

Океанические вихревые структуры проявляются на РЛИ посредством сликовых полос, вовлекаемых в орбитальные движения вихрей. Помимо хорошо изученных прибрежных вихрей большого размера, РЛИ позволяют обнаруживать океанические вихри средних и малых масштабов. Такие вихри играют существенную роль в циркуляции и перемешивании вод, однако их невозможно зарегистрировать другими средствами дистанционного зондирования.

Атмосферные вихри проявляются на РЛИ в результате характерной модуляции шероховатости морской поверхности их полем ветра. Вихри больших масштабов целесообразно наблюдать с помощью широкополосных РЛИ со спутника ENVISAT. Проявления атмосферных вихрей среднего и малого масштабов довольно редки на РЛИ. Тем не менее, удается зарегистрировать небольшие по масштабу, но мощные грибовидные течения.

Работа проведена при поддержке CRDF (проект N° RG1-2341-MO-02) и РФФИ (проект № 01-05-64464). Радиолокационные изображения PCA ERS-2 и ENVISAT предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проектов АОЗ-224, 451 и С1Р-1027.

### Литература

1. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Кузьмин А.В., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Раев М.Д., Скворцов Е.И. Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне (Геленджик 1999–2002) // М.: КДУ, 2003. 143 с.
2. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Раев М.Д., Сабинин К.Д., Трохимовский Ю.Г., Чурюмов А.Н., Шуган И.В. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // УФН. 2003. Т. 173. № 1. С. 69–87.
3. Титов В.Б. Характеристики Основного черноморского течения и прибрежных антициклонических вихрей в Российском секторе Черного моря // Океанология. 2002. Т. 42. № 5. С. 668–676.
4. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Костяной А.Г. и др. Антициклонические вихри в глубоководной восточной части Черного моря летом–осенью 1999 г. (спутниковые и судовые измерения) // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 5. С. 3–11.
5. Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Под ред. Зацепина А.Г., Флинта М.В. М.: Наука, 2002. 476 с.
6. Федоров К.Н., Гинзбург А.И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 303 с.