

# СЛИКИ КАК ИНДИКАТОРЫ ВИХРЕВОЙ АКТИВНОСТИ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ

О.Ю. Лаврова

*Институт космических исследований РАН,  
117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32  
E-mail: olavrova@iki.rssi.ru*

Обсуждается возможность изучения вихревых структур в прибрежной зоне по отображению на космических радиолокационных и оптических изображениях сликовых полос. Стики образуются в результате наличия в прибрежных водах большого числа поверхностно активных веществ (ПАВ), 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 радиолокационных изображениях. Средства радиолокации позволяют регистрировать вихри малых масштабов, играющие огромную роль в локальной циркуляции. В качестве исходных данных использовались данные ERS-2 SAR, Envisat ASAR и данные MODIS Aqua/Terra в оптическом диапазоне.

## Введение

Возникновение на морской поверхности видимых пятен и полос с пониженной интенсивностью коротких поверхностных волн (ряби) называют выглаживанием, а сами эти пятна и полосы – сликами. Обычно они наблюдаются при относительно слабом ветре (до 3-5 м/с) и становятся видимыми из-за изменений отражательных свойств взволнованной морской поверхности при перестройке спектра ветрового волнения [1]. Выглаживание поверхности и образование сликов создаются различными явлениями в атмосфере и океане – течениями (в том числе вихрями и водоворотами), внутренними волнами, циркуляциями Ленгмюра, проходящими судами, неоднородностями поля ветра и др. Но основной вклад в образование сликов вносят пленки поверхностно-активных веществ (ПАВ) как естественного, так и искусственного происхождения. Вследствие высокой биологической активности, в прибрежных зонах на поверхности воды постоянно присутствует большое количество ПАВ, которые, меняя поверхностное натяжение, гасят рябь и тем самым влияют на рассеяние электромагнитного сигнала. Под действием локальных гидродинамических процессов они могут образовывать структуры, которые хорошо проявляются на радиолокационных и ИК изображениях. Исследованию процессов в прибрежной зоне на основе информации, получаемой по дистанционному зондированию сликов, посвящен международный проект SIMP (“Slicks as Indicators for Marine Processes: Novel Tools for Marine Remote Sensing of the Coastal Zone”). Подробную информацию о данном проекте можно найти на сайте: <http://www.soc.soton.ac.uk/lso/simp>. Одной из задач данного проекта является исследование вихревых процессов в прибрежной зоне, чему и посвящена настоящая статья.

Как известно, циркуляционные движения в океане включают круговороты общей циркуляции океана, циркуляции синоптических масштабов (ринги и вихри открытого океана) и мелкомасштабные циркуляции. Основной вклад в циркуляцию прибрежной зоны вносят синоптические и мелкомасштабные вихревые структуры. Синоптические вихри по способам их образования можно разделить на следующие категории: фронтальные, или ринги, образующиеся путем отсечения меандров от струйных течений; свободные, или вихри открытого океана, порождаемые бароклинной неустойчивостью крупномасштабных течений; топографические, или вихри, образующиеся при обтекании рельефа дна; вихри, индуцированные атмосферными воздействиями – полями вихря напряжения трения ветра и атмосферного давления на поверхности океана.

Мелкомасштабные вихри имеют диаметры несколько десятков километров, а на их периферии могут развиваться вихри еще меньших размеров. Подобные вихри, как правило, имеют спиралеобразный вид, за что получили название «вихри закручивания» (“spin-off eddies”). Они часто образуются в бухтах и заливах, а также в узких проливах. По направлению вращения вихри делят на циклонические и антициклонические. Мелкомасштабные вихри в прибрежной зоне образуются как того, так и другого типа.

Постоянный спутниковый радиолокационный мониторинг прибрежных зон северо-восточной части Черного моря и юго-восточной части Балтийского моря позволил пронаблюдать вихревые структуры разных масштабов на радиолокационных образах сликов.

## Вихри в северо-восточной части Черного моря

Основным элементом циркуляции Черного моря является Основное Черноморское течение (ОЧМ). Оно охватывает все море по его периферии и характеризуется высокой гидродинамической нестабильностью. Эта нестабильность под влиянием синоптической изменчивости ветра и особенностей рельефа дна приводит к меандрированию ОЧТ и образованию вихрей различных знаков с обеих сторон от основного стержня течения: циклонических – со стороны открытого моря, и антициклонических прибрежных вихрей. Как правило, вихревые структуры в Черном море изучались с помощью ИК изображений, полученных со спутников серии NOAA и данных контактных измерений [2-4]. Пространственное разрешение таких изображений, составляющих 1 км, наиболее приемлемо для изучения мезомасштабных вихревых структур размерами несколько сот километров и только в безоблачную погоду. Данные, получаемые с помощью спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой, позволяют выявлять мелкомасштабные вихревые структуры в любое время суток и независимо от погодных условий. Поэтому для изучения вихрей малых масштабов были использованы данные радиолокаторов ERS-2 SAR и Envisat ASAR, пространственное разрешение которых составляет 25 метров. Регулярный спутниковый мониторинг в районе Новороссийск-Геленджик проводится Лабораторией аэрокосмической радиолокации Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) в летне-осенний период, начиная с 1999 года. Анализ накопленных данных позволяет утверждать, что вихри масштабов от нескольких километров до нескольких десятков километров постоянно зарождаются в 20-30 км от берега на траверсе или несколько западнее Геленджикской бухты и со средней скоростью 0,3 м/с распространяются в северо-западном направлении, совпадающим с направлением ОЧТ в этом районе. Пример радиолокационного изображения вихря, диаметр которого составляет 13 км, представлен на рисунке 1. Как правило, подобные вихри являются антициклоническими, что вызвано особенностями ОЧТ и характером основных ветров. В летне-осенний период в районе наблюдений максимальная повторяемость ветра (порядка 32%) отмечается со стороны восточного сектора.

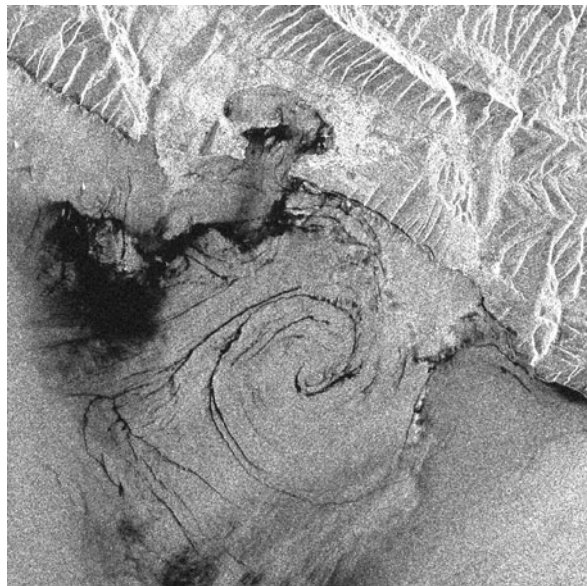


Рис. 1. Фрагмент радиолокационного изображения (25x25 км), полученного с помощью ERS-2 SAR 16 октября 1998. Антициклонический вихрь диаметром 13 км

Определить продолжительность жизни таких вихрей не представлялось возможным. На снимках, полученных с минимальным интервалом, который и для ERS-2 и для Envisat составляет 12 часов, обнаруженные вихри больше не наблюдались. Это может быть вызвано несколькими причинами. Либо подобные мелкомасштабные вихри в отличие от прибрежных антициклонических вихрей короткоживущие, либо, что более вероятно, за 12 часов усиливался ветер, а подобные вихри проявлялись на радиолокационных снимках благодаря сликам, которые хорошо наблюдаются только при слабых ветрах.

Интересный случай вихревых структур, так называемое грибовидное течение, представлен на рис.2. Грибовидные течения могут образовываться как в атмосфере, так и в океане. Они представляют собой квазисимметричные структуры, состоящие из узкой струи с двумя вихрями разных знаков на конце. Как правило, длина струи имеет тот же порядок, что и вихри, в то время как ее ширина не превосходит 10-25% ее длины. Такие океанические грибовидные течения проявляются на радиолокационных изображениях посредством сликовых полос.



Рис. 2. Фрагмент ERS-2 SAR изображения (50x25 км), полученного 04.08.2004. Грибовидное течение проявляется на радиолокационном изображении посредством сликовых полос

Грибовидные течения в атмосфере возникают при локальном кратковременном приложении импульса к поверхности воды за счет локальных источников кинетической энергии. 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 [5]. В пользу того, что представленный на рис.2 вихрь являлся океаническим, а не атмосферным свидетельствует также то, что он распространялся с востока на запад, в то время как ветер был юго-западным со скоростью 2-3 м/с. Для атмосферных грибовидных течений характерно наличие сильных ветров и направление ветра должно совпадать с направлением распространения струи.

### Вихри в юго-восточной части Балтийского моря

Регулярный спутниковый мониторинг юго-восточной части Балтийского моря осуществляется силами Лаборатории аэрокосмической радиолокации ИКИ РАН совместно с коллегами из Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова, Геофизического центра РАН, Морского гидрофизического института НАНУ начиная с июля 2004 года. Основой наблюдений служат данные, получаемые с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой, установленных на европейских спутниках Envisat и ERS-2, канадского спутника RADARSAT, а также с помощью прибора MODIS спутников AQUA и TERRA. Прием информации ведется практически в реальном времени в оперативном режиме.

Штилевая погода, которая преобладала в апреле-мае 2005 года, и большое количество естественных поверхностно-активных веществ, которые выгладили морскую поверхность, дали возможность пронаблюдать на радиолокационных снимках сложную структуру течений в прибрежной зоне, которая выражается в наличии большого количества вихрей разных масштабов и знаков. На рис. 3 представлен фрагмент of Envisat ASAR image (60x40 км), на котором хорошо видны 2 грибовидных вихря – один 25 км, другой – 6 км в диаметре, и большое количество вихревых структур самых разных масштабов.



Рис. 3. Фрагмент Envisat ASAR изображения (60x40 км), полученного 28.05.2005 в районе Балтийского канала. Два грибовидных вихря, «прорисованные» сликами

## Вихри в бухтах и заливах

Особый интерес вызывает циркуляция в более-менее замкнутых областях прибрежной зоны, таких как заливы и бухты. Как правило, локальный ветер здесь несколько слабее, а в воде содержится повышенное количество поверхностно-активных веществ, в первую очередь искусственного происхождения. Это создает благоприятные условия для изучений вихрей посредством наблюдений за сликовыми полосами. Такими «тестовыми» районами являлись Цемесская и Геленджикская бухты Черного моря и Гданьский залив в южной Балтике. Цемесская бухта (длина 15 км, ширина у входа 9 км, глубина 21-27 м) является крупнейшим Российским портом на Черном море, где в частности происходит перекачка нефти на танкеры, а на рейде на якорной стоянке стоят суда, ждущие погрузки. Вследствие этого в водах бухты постоянно присутствуют нефтепродукты, которые создают поверхностные пленки. Они не только хорошо видны на радиолокационных снимках, но и дают характерный эффект – «радужку» на оптических снимках, получаемых с вертолета.

Геленджикская бухта – полузамкнутая бухта, ширина у входа составляет всего 3,6 км. Наряду с Сочи Геленджик является крупнейшим российским курортом на Черном море. В летне-осенний период, в связи с наплывом огромного числа отдыхающих, бухта испытывает тяжелейшие антропогенные нагрузки. Основным поставщиком загрязнения является река Су-Аран, водосборный бассейн которой расположен в черте города Геленджик. Река собирает в себя большую часть ливневого стока с территории города, и в результате состав ее приближается к составу неочищенных хозяйственно-бытовых стоков. Большое количество поверхностно-активных веществ, в частности нефтепродуктов, поступает и с судов, постоянно курсирующих в бухте. Процесс замещения воды в бухте занимает от 1 до 10 суток в зависимости от силы и направления ветра. Основную роль в циркуляционных процессах в бухте играют вихри, которые при юго-восточном ветре проникают из открытого моря. Они играют также большую очищающую роль, принося с собой относительно чистую воду открытого моря. При неблагоприятной гидрометеорологической ситуации (интенсивный ливневой сток при отсутствии ветра и слабых течениях в прилегающей акватории открытого моря) происходит накопление вредных веществ в воде и донном осадке вблизи источников загрязнения [6].



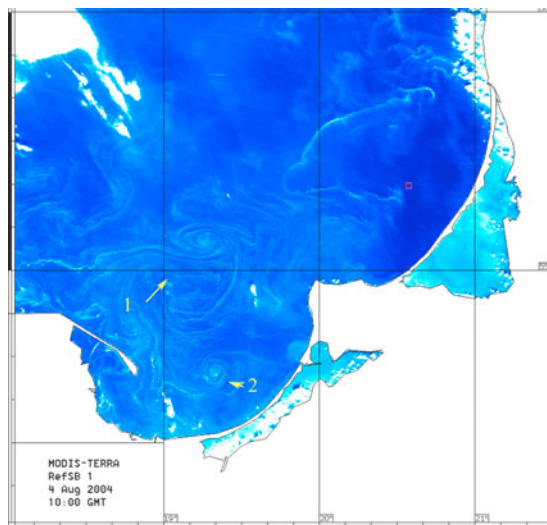
Рис. 4. Фрагмент ERS-2 SAR изображения, полученного 27.07.2001.  
Циклонический вихрь в Геленджикской бухте

На рис. 4 представлен фрагмент радиолокационного изображения, на котором хорошо виден циклонический вихрь в Геленджикской бухте. Как правило, такие вихри, попадая в бухту с диаметрами 2-3 км, увеличиваются в размерах, заполняя все пространство бухты и при благоприятных гидрометеорологических условиях «живут» там несколько суток. В Цемесской бухте, которая более открытая, и в которой довольно часто дуют сильные ночные бризы с берега, устойчивые вихри образуются значительно реже, и их обычно сносит в направлении ОЧТ.

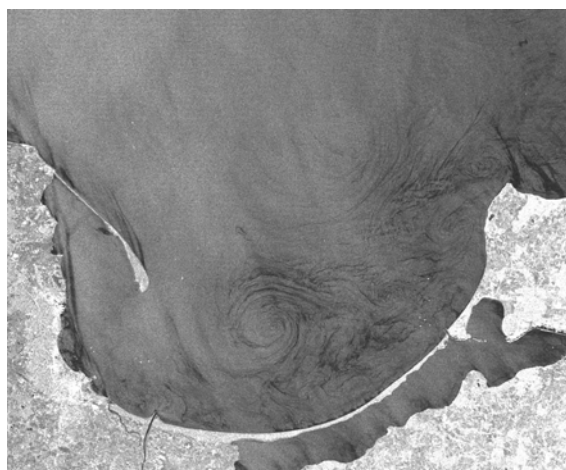
В южной части Гданьского залива ситуация несколько напоминает то, что происходит в Геленджикской бухте. В залив впадает несколько рукавов крупнейшей польской реки Вислы, на берегах которой много населенных пунктов. На берегу залива расположены крупнейшие порты Гданьск и Гдыня. Естественно, в водах залива присутствует большое количество ПАВ искусственного происхождения, способствующих образованию сликов. В заливе регулярно образуются устойчивые вихри, которые хорошо видны как на изображениях, полученных с помощью MODIS Terra/Aqua (рис. 5 а), так и на радиолокационных снимках, полученных с помощью Envisat ASAR (рис. 5 б). Данные изображения получены с разницей

практически в сутки. Видно, что они отражают один и тот же циклонический вихрь, который за сутки увеличился в размере.

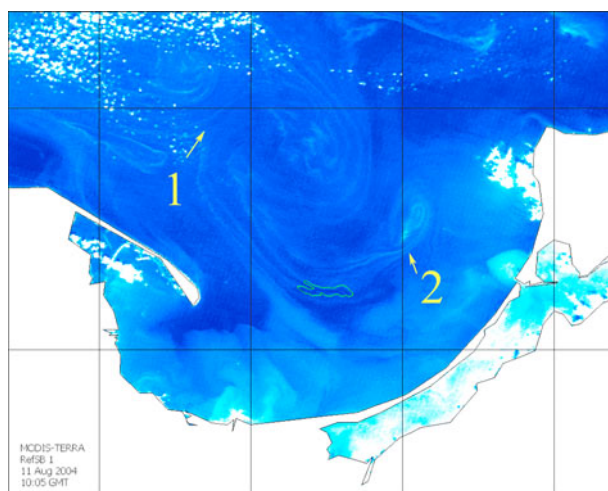
Как показывает анализ данных, полученных в период с 28 июля по 11 августа 2004 года, в данном районе сосуществовали одновременно два вихря – один грибовидный, а другой циклонический. Грибовидный вихрь со временем увеличивался в размерах, медленно перемещался в западном направлении, а циклонический вихрь наоборот уменьшался (рис.5 в). Похоже, вся энергия передалась грибковидному вихрю, который как бы «всосал» в себя циклонический.



(а)



(б)



(в)

Рис. 5. Грибовидный (1) и циклонический (2) вихри в Гданьском заливе. MODIS Terra изображение получено 04.08.2004 (а) и 11.08.2004 (в); Envisat ASAR изображение получено 05.08.2005 (б)

## Заключение

Анализ спутниковых радиолокационных данных, полученных в северо-восточной части Черного моря и юго-западной части Балтийского моря, подтвердил их высокую информативность для изучения динамических процессов в приповерхностном слое. Прибрежные воды богаты поверхностно-активными веществами, которые при слабом ветре выглаживают морскую поверхность, образуя слики, которые могут при определенных условиях служить индикаторами течений и вихревых структур. На основе радиолокационных образов сликов была выявлена интенсивная вихревая активность в непосредственной близости от берега и в бухтах. Были изучены вихри малых масштабов, диаметрами несколько десятков километров, которые играют огромную роль в локальной циркуляции и перемешивании вод, способствуя самоочищению.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-02-16629), и международного проекта INTAS 03-51-4987. Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством (ESA) в рамках проектов C1P.1027, АОЗ.224 и Bear 2775.

## Литература

1. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана // Л.: Гидрометеиздат, 1985. 375 с.
2. 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 наблюдения) // Исследование Земли из космоса, 2001. №5. С.3-11.
3. Титов В.Б. Морфологические параметры и гидрофизические характеристики прибрежных антициклонических вихрей в Черном море // Метеорология и гидрология, 2002. №4. С.67-73.
4. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А. Мезомасштабная изменчивость Черного моря по альтиметрическим данным TOPEX/POSEIDON и ERS-2 // Исследование Земли из космоса, 2001. №5. С.34-46.
5. Бочарова Т.Ю., Лаврова О.Ю. Наблюдение атмосферных и океанических вихревых структур в прибрежной зоне Черного моря с помощью спутниковой радиолокации // Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса. Сборник научных статей под ред. Е.А. Лупяна и О.Ю. Лавровой, М.: , Полиграф-сервис, 2004. С. 104-114.
6. Крыленко В. В., Есин Н.В. Загрязнение Геленджикской бухты ливневым стоком // Экология моря, 2001, вып.58. С.69-73.