Сравнительный анализ поверхностных проявлений внутренних волн в морях без приливов на основе данных спутникового мониторинга Каспийского, Черного и Балтийского морей

Митягина М.И., Лаврова О.Ю.

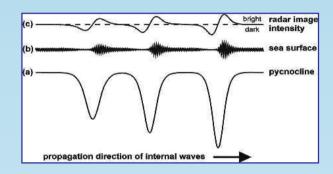
Институт космических исследований РАН

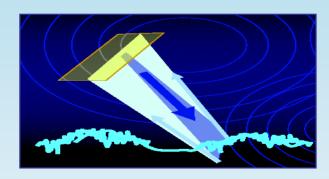


Основная форма поверхностных проявлений ВВ –широкие параллельные полосы выглаженной морской поверхности – слики, а также зоны заметного повышения наклонов поверхности, взывающих частые обрушения волн – сулой.

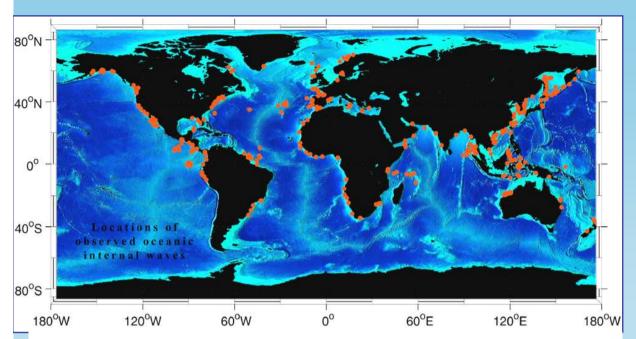
depth approximately 100 m sea floor

Поверхностные проявления ВВ в океане визуализируются на радиолокационных изображениях (РЛИ) морской поверхности в виде чередующихся полос усиления ослабления обратно-рассеянного сигнала, обусловленных модуляцией мелкомасштабной составляющей спектра переменными поверхностного волнения течениями, создаваемыми B приповерхностном слое внутренними волнами.

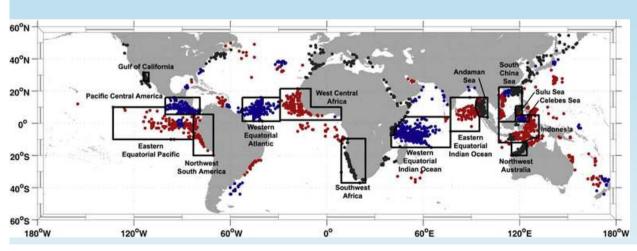








Jackson, C.R. & Apel, J.R. (2002). An atlas of internal solitary-like waves and their properties. Global Ocean Associates. (Second Edition (May 2002)



C. Jackson "Internal wave detection using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)" JGR, v.112, C11012, 2007.

✓ Накоплен большой объем данных спутниковых наблюдений, как радиолокационных, так и оптических, поверхностных проявлений внутренних волн (ВВ) в различных районах Мирового океана. Считается установленным, что один из наиболее важных источников генерации связан с приливами, в этом случае приливные внутренние волны возбуждаются в результате взаимодействия баротропных приливов с наклонным дном вблизи кромки шельфа. Поэтому и листанционные методы в последнее десятилетие развивались в основном в приложении к изучению тех внутренних гравитационных волн в океане, генерация которых на материковом склоне связана с приливоотливными течениями и внутренними приливами в шельфовой зоне.

√На основе данных дистанционного зондирования морской поверхности даже составлен постоянно обновляющийся атлас поверхностных проявлений внутренних волн, содержащий на данный момент более 300 случаев наблюдения ВВ в 54 районах Мирового океана.

√К сожалению, волны неприливного происхождения к настоящему моменту изучены слабее. Публикаций, наблюдениям спутниковым посвященных поверхностных проявлений внутренних волн в морях без приливов, нам не удалось найти. Зарождение внутренних волн в бесприливных морях возможно при протекании активных динамических процессов, связанных релаксацией возникновением прибрежного апвеллинга, вихрями различных масштабов. сгонно-нагонными явлениями. осцилляциями гидрологических фронтов и пр. Существует ряд работ, посвященных натурным наблюдениям и численному моделированию процессов распространения короткопериодных генерации и внутренних волн бесприливных морях, базирующихся на экспериментальных данных,

полученных с помощью ког

Школа-семинар «Спутниковые методы исследования Земли». Таруса, 15-20 февраля 2011 г.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

			• • • • • • • • • • • • • • • • • • •		ренних волн ых данных
внутренн	их вол	н неприлив	ного прои	схождения	ространения я и провести р-временных
характер	истик				
□ Прове	сти ср	авнительні	ый <mark>ана</mark> ли	з <mark>радио</mark> л	окационных
проявлеі морях	ний вну	/тренних в	олн в раз	зличных н	еприливных
□ Оцени	ть во	зможности	ИСПОЛЬ	зования	данных
_	•	диолокаци н в различн		7.7	и изучения рях
J . P • · · ·		paomi m			P****



РАЙОНЫ НАБЛЮДЕНИЙ











❖ Существенным образом отличаются по своим физикогеографическим признакам, по структуре основных течений, по особенностям гидрологического режима и формирования сезонного термоклина, по направлению главенствующих ветров и состоянию приводного слоя атмосферы.



КАСПИЙСКОЕ МОРЕ



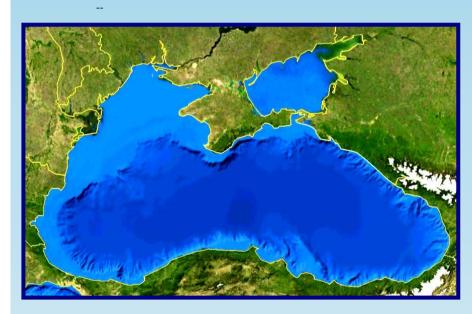


- ✓ Полностью изолированное и на тысячи километров удаленное от Мирового океана Каспийское море по своему географическому положению, замкнутости и своеобразию вод относится к типу «море-озеро».
- ✓ Главная характерная особенность рельефа обширное мелководье на севере и глубокие разделенные подводным порогом впадины в центре и на юге
- ✓ Море бесприливное. Хорошо выражены сгонно-нагонные явления (до 2-3 м)
- ✓ Сейшеобразные колебания (амплитуда до 35 см; период от 8-10 минут до нескольких часов)



YEPHOE MOPE





- ✓ Сообщается с водами Мирового океана через ряд узких проливов. Надёжно защищено от приливной волны.
- ✓ Колебания уровня воды под влиянием приливов менее 10 сантиметров
- ✓ Главный элемент циркуляции Основное черноморское течение (ОЧТ), характеризующееся высокой гидродинамической неустойчивостью
- ✓ Высокая вихревая активность
- ✓ Одно из самых глубоких внутренних морей. Содержит в 6 раз больше воды, чем Каспийское море, и в 16 раз больше, чем Балтийское, хотя площади всех трех водоемов примерно одинаковы



БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ





✓ Теоретические расчёты показывают, что амплитуда колебания высоты уровня воды в Балтике равна приблизительно 10 сантиметрам, но увидеть эти приливы практически невозможно, так как они полностью стираются колебаниями уровня воды под влиянием ветра или изменениями атмосферного давления.

✓ Средняя глубина - 51 м. В районах отмелей - до 12 м. Несколько котловин –до 200 м

Сгонно-нагонные колебания уровня происходят быстро и достигают значительных величин. В открытых районах моря до 0,5 м

Совместное действие ветра и резкого изменения атмосферного давления (при прохождении циклонов) вызывает ритмические колебания уровня — сейши



СЕНСОРЫ

- Радиолокаторы с синтезированной апертурой ASAR ИСЗ Envisat, SAR ИСЗ ERS-2, пространственное разрешение 12, 5 -75 м;
- Спектрометр Envisat MERIS разрешение 260 м
- ИК-радиометры AVHRR ИСЗ серии NOAA разрешение 1 км;
- Сканирующие спектрорадиометры MODIS ИСЗ Terra/Aqua; разрешение 250 м
- При мониторинге Каспийского моря дополнительно использовались данные сканирующего радиометра ETM+ ИСЗ Landsat 7. Enhanced Thematic Mapper









СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ

Всего за время работ по проекту получено и обработано более 2300 спутниковых изображений морской поверхности районов интереса.

За 2010 г. получено и обработано
•почти 800 радиолокационных изображений морской поверхности районов интереса, из них:
250 - для Черного моря
164- для Каспийского моря
380 – для Балтийского моря

• более 450 изображений MERIS Envisat и MODIS Terra/Aqua и 12 информативных (безоблачных) снимков сканирующего радиометра ETM+ ИСЗ Landsat-7 в восьми диапазонах.

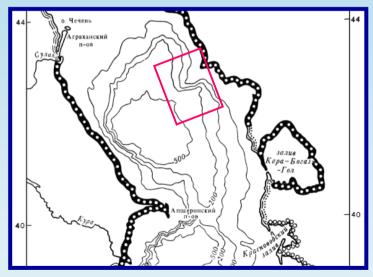
Статистическая достоверность результатов обеспечивается, таким образом, большим объемом накопленного экспериментального материала.





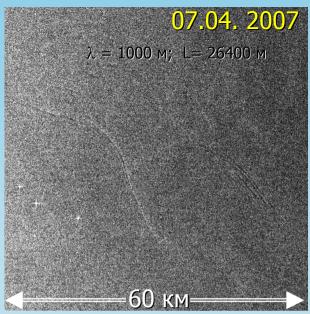
Envisat ASAR WSM, 75 m 06.08.09, 18:14 UTC

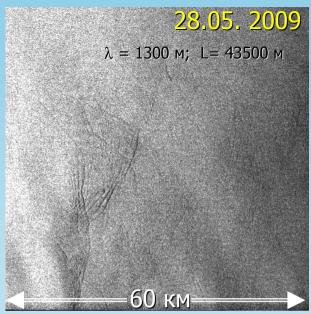
Поверхностные проявления внутренних волн в Каспийском море достаточно часто регистрируются в данных спутниковой радиолокации в теплый период и отличаются большим разнообразием. На одном РЛИ (ширина полосы обзора 400 км), как правило, выявляется несколько цугов ВВ, число которых доходит до шести. Это свидетельствует о наличии нескольких пространственно разнесенных источников генерации

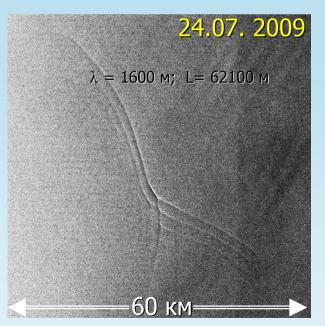


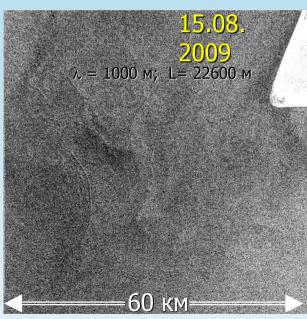


- •Длина фронта ведущей волны достигает десятков километров, изменяясь в пределах от 15 до 65 км.
- •Ширина пакетов в зависимости от количества волн в цуге варьируется от 1 до 6 км
- •Длина максимальной волны в цуге от 370 до 1500 м.
- •Фронт ведущей волны в подавляющем большинстве случаев проявлялся в виде сулоя, т.е. полосы усиления поверхностного волнения.

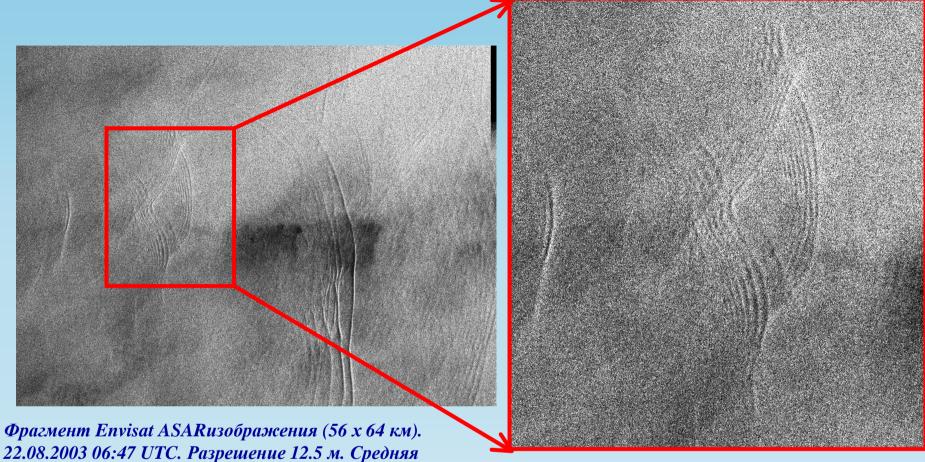








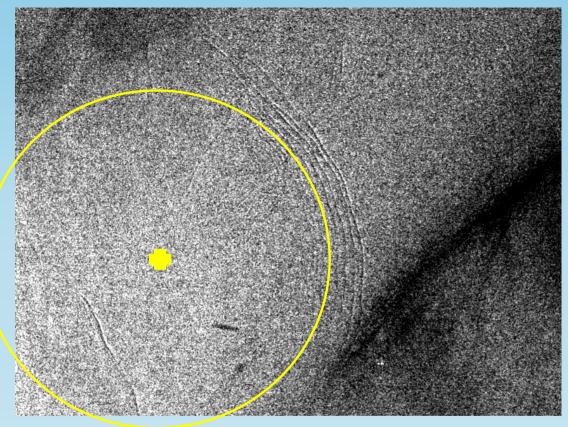




22.08.2003 06:47 UTC. Разрешение 12.5 м. Средняя длина волны в пакетах 300 - 500 м. Глубина места проявления - 80 т

- ≻Пакеты имеют вид классических цугов солитонов.
- ➤ Наблюдаются характерные для нелинейных взаимодействий искривления фронтов, фазовые сдвиги и пр.



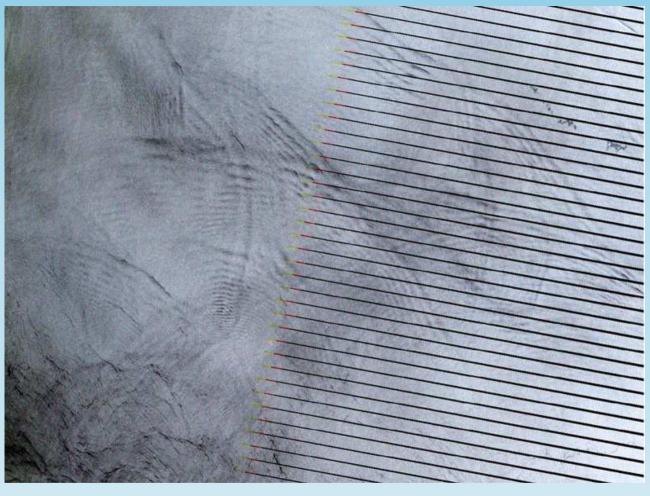


Достаточно часто фронты в цуге представляют собой концентрические дуги, что позволяет с определенной точностью выявить источник генерации данного цуга.

Как правило, это неоднородности рельефа, банки, резкие поднятия дна, все это характерно именно для восточного склона Среднего Каспия.

Фрагмент Envisat ASAR WSM изображения (67 x 45 км) 24.07.09 18:23 UTC. Разрешение 75 м. Глубина места проявления 50 – 70 м Средняя длина волны 800 м. Проявления пакетов внутренних волн в виде концентрических окружностей. Крестиком обозначен центр окружности, имеющей ту же кривизну, что и пакет OBB





Множественные проявления пакетов внутренних волн распространяющихся в виде концентрических окружностей.

Фрагмент Landsat ETM+ изображения (42х35 км) 31.05.09.

Разрешение 30 м.

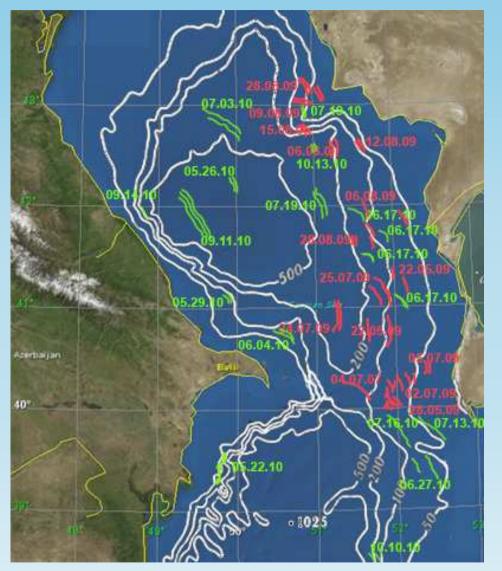
Средняя длина волны - 750 м.

Глубина места 50 - 100 м

Возможное место генерации пакетов – банка 20 м



Межгодовая изменчивость ППВВ в Каспийском море



Районы локализации пакетов изменяются при сохранении относительно постоянных пространственные характеристиках пакетов (длины волн, протяженность фронтов, количество волн в цуге и др.).

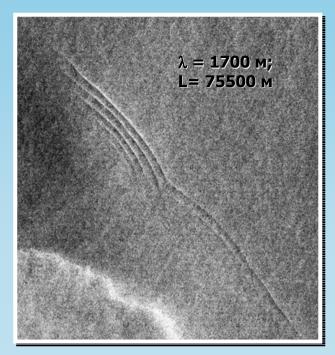
Преимущественно восточное направление распространения

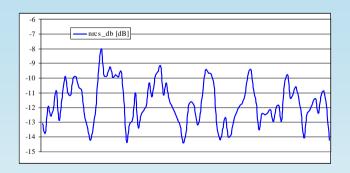
Основные источники генерации ВВ, выявленных в Каспийском море: - продольные одноузловые сейши, узел которых находился вблизи Апшеронского порога; -апвеллинг, часто проявляющийся вблизи восточного побережья; --зарегистрирован случай возбуждения внутренних волн в море непосредственно перед границей движущегося атмосферного фронта (11 сентября 2010, 06:52 UTC).

Обобщенная карта-схема распределения ППВВ, выявленных по данным спутниковой радиолокации в центральной части Каспийского моря









Envisat ASAR WSM, 75 m 2010-09-11 06:52





Envisat ASAR WSM, 75 m 2010-09-11 06:52 ASAR MERIS, 260 m 2010-09-11 06:48



РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

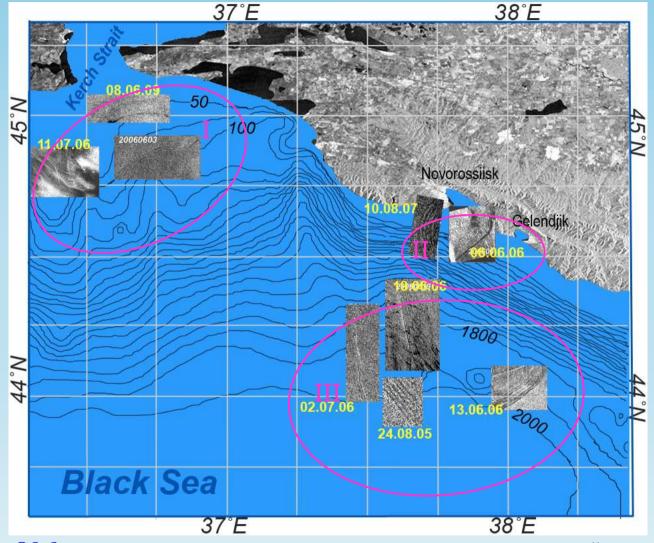
1999- 2005 гг. Натурные эксперименты – летний период

2006-2008 гг. Участие в проекте «Спутниковый мониторинг состояния и загрязнения вод Российского сектора Азово-Черноморского бассейна 9 апрель-ноябрь. Прием и обработка РЛИ-изображений сенсоров ASAR Envisat и SAR ERS-2 высокого разрешения (12,5-75 м) со всех пролетов этих спутников над акваториями Азовского и северо-восточной части Черного морей (периодичность пролетов составляет 12-72 часа). (Примерно 140 РЛ-изображений за сезон)

2009-2010 гг Прием и обработка всех съемок сенсоров ASAR Envisat и SAR ERS-2, производящихся ЕКА в оперативном режиме – разрешение 75 м



РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

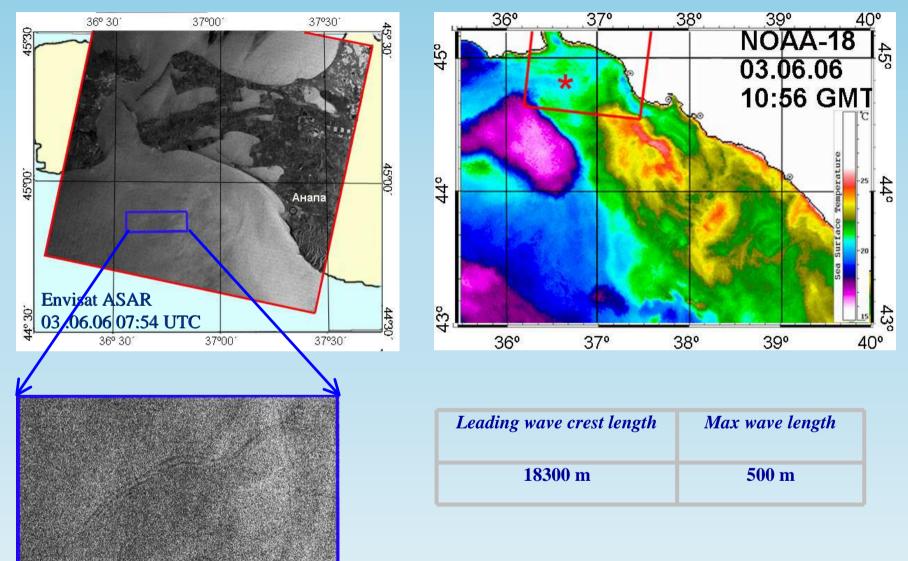


- I. Район Керченского предпроливья над изобатами 50 100 м.
 Возможна генерация внутренних волн фронтами сгонно-нагонного происхождения
- II. Вблизи Цемесской бухты над изобатами 40-50 м. Источником внутренних волн могут быть выходящие на шельф внутренние сейши, распад апвеллинга и прибрежные мезомасштабные вихри
- III. На расстоянии 25-28 миль к юго-западу от участка береговой черты в районе Новороссийск-Туапсе над изобатами 1800 2000 м. В этом районе поверхностные проявления внутренних волн локализованы вблизи границы мезомасштабного вихря или вихревого диполя

Обобщенная карта схема распределения поверхностных проявлений внутренних волн, выявленных по данным спутниковой радиолокации в северо-восточном секторе Черного моря

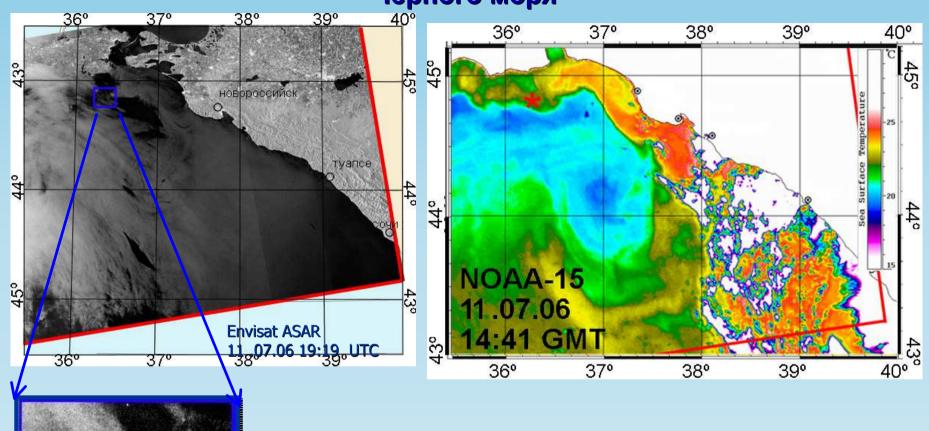


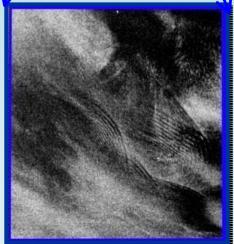
Поверхностные проявления ВВ в северо-восточной части Черного моря





Поверхностные проявления ВВ в северо-восточной части Черного моря



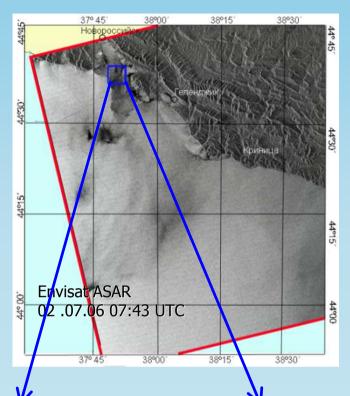


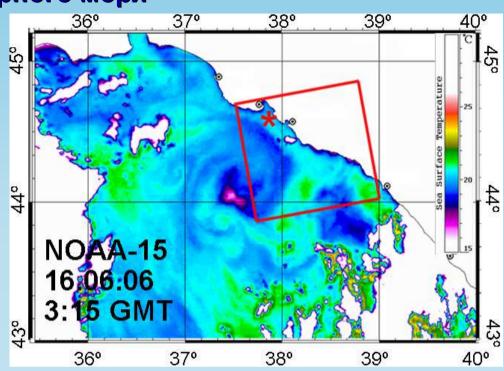
Leading wave crest length	Max wave length
12500 m	500m



Школа-семинар «Спутниковые методы исследования Земли». Таруса, 15-20 февраля 2011 г.

Поверхностные проявления ВВ в северо-восточной части Черного моря





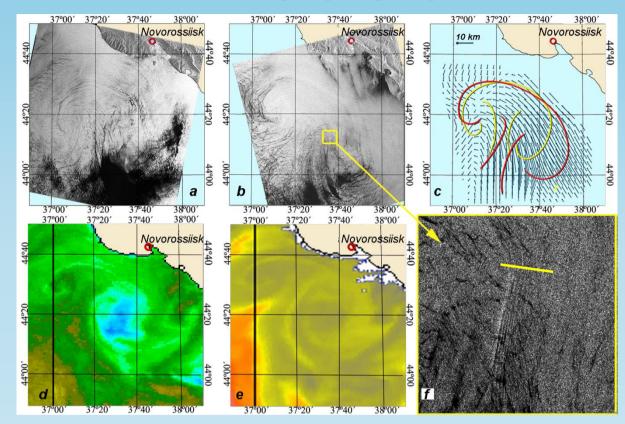
	PROPERTY OF THE PROPERTY OF TH
Carte Charles and Control Carte	AND THE RESERVE OF THE PROPERTY OF THE PROPERTY OF THE PARTY OF THE PA
The state of the s	
	2000年1月1日 N 1965 (1977年 - 1978日 1974日 - 1978日 1月 1日
THE REPORT OF THE PARTY OF THE	
FEED TO SEE STATE OF THE PARTY	是"我们是是1993年间的,公司的第一条的工程从内部的证据的。"
THE CONTROL OF THE STREET	NCMMP200000000000000000000000000000000000
THE PROPERTY OF THE PARTY OF TH	
AND COLUMN TO THE PARTY OF THE	
A STATE OF THE PARTY OF THE PAR	图 100 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
A STATE OF THE PARTY OF THE PAR	
PROFESSION STATES	
国内区域的对于国际区域的国际	
" 阿尔克斯·阿拉德斯·阿塞尔尔克"	
CONCRETE CONTRACTOR	SECURIOR SECURIOR AND RESIDENCE OF SECURIOR SECU
PLANT CONTROL OF THE PARTY OF T	
一种的技术的现在分类的现在分类的	
A PROPERTY OF STREET	
THE RESIDENCE AND ADDRESS OF	
A CONTRACTOR OF THE STATE OF TH	
1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.	
TO STATE OF THE PARTY OF THE PA	
17-12-14-15-15-15-15-15-15-15-15-15-15-15-15-15-	的现在分词 经股份的 医中央性 医甲基甲基甲基甲基甲基甲基甲基甲基甲基甲基甲基甲基甲基甲基甲基甲基甲基甲基甲基
PARTY SERVICE SERVICES	
1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1	
(1) 工作的 图 图 图 图 图 图 图 图 图 图 图 图 图 图 图 图 图 图 图	
The Control of the Co	
	NOT THE OWNER THE PARTY OF THE
19-4 (HISTORY HISTORY	
LANGE TO SERVICE AND ADMINISTRATION OF THE PARTY OF THE P	THE RESIDENCE OF THE PROPERTY
A SECURITION OF SECURITION	
THE RESERVE OF THE PARTY OF THE	
STATE OF THE PARTY	
THE RESERVE OF THE PARTY OF THE	
THE PARTY OF THE P	THE RESIDENCE OF THE PARTY OF T

Leading wave crest length	Max wave length
7200m	285 m





РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

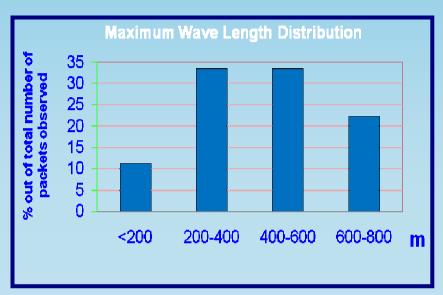


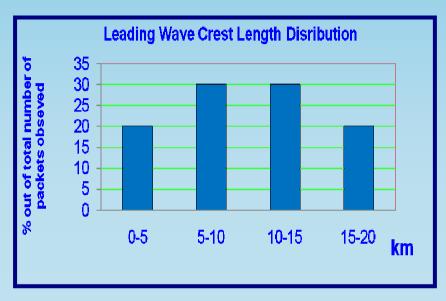
Дата и время (UTC)наблюдения	Координаты центра пакета волн	Длина фронта ведущей волны (м)	Глубина места проявления (м)	Максимальна я длина волны (м)	К-во волн в пакете
19/06/2006 19:10	44°13'56" N 37°34'46" E	5600	1800	220	6

- **a)** ASAR Envisat изображение, полученное 19.06.2006 в 07:52 UTC:
- **b**) ASAR Envisat изображение, полученное 19.06.2006 в 19:10 UTC:
- с) карта –схема перемещения вихревого диполя Рассчитанная скорость перемещения циклонической составляющей диполя составляет 0.05-0.1 м/сек на, антициклонической 0,2-0,3 м/сек в юго-восточном направлении.
- **d**) поле поверхностной температуры, восстановленное из данных AVHRR NOAA от 20.06.2006 03:20 UTC;
- **e**) карта WLR, восстановленная из данных MODIS Aqua от 20.06.2006 11:10 UTC;
- f) Поверхностные проявления морских внутренних волн неприливного происхождения в непосредственной близости от холодной части вихревого диполя



Гистограммы распределения пространственных характеристик ППВВ для северо-восточной части Черного моря



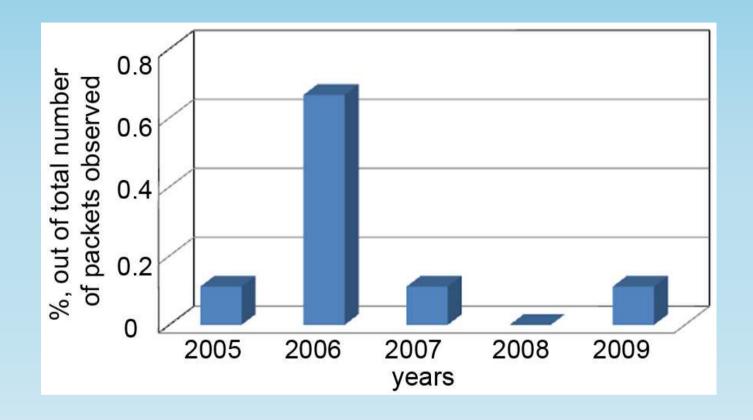


- •Проявляются в виде изолированных цугов, содержащих до 20 волн,
- Максимальная длина волны в цуге не превышает 800 м.
- •Фронт ведущей волны, как правило, существенно искривлен, длина его варьируется в пределах от 7 до 18 км.

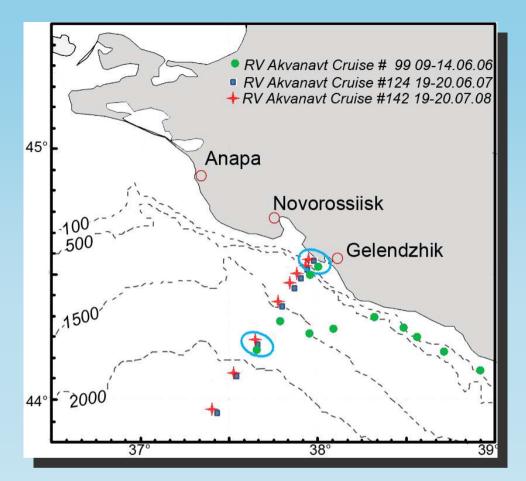
Факт регистрации ППВВ на радиолокационных изображениях северо-восточной части Черного моря является относительно редким событием.



Межгодовая изменчивость встречаемости ППВВ в северо-восточной части Черного моря в данных спутниковой радиолокации морской поверхности

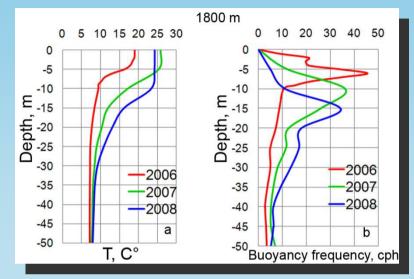


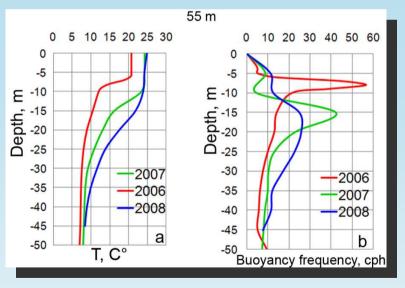




Максимальная встречаемость ППВВ соответствует наличию резкого и неглубокого пикноклина. Такие условия благоприятствуют как зарождению внутренних солитонов, так и выраженному проявлению их на морской поверхности, поскольку способствуют развитию сильных орбитальных течений в приповерхностном слое, что приводит к модуляции спектра ветрового волнения и проявлению внутренних волн в РЛИ морской поверхности

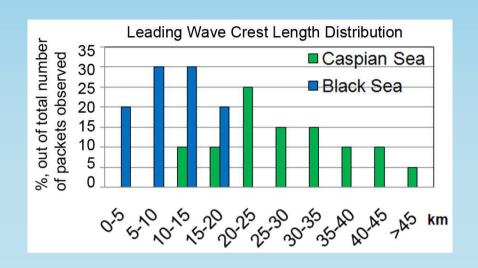
Вертикальные разрезы температуры воды по данным контактных измерений (a) и частоты плавучести (δ) над изобатами 1800 и 50 м

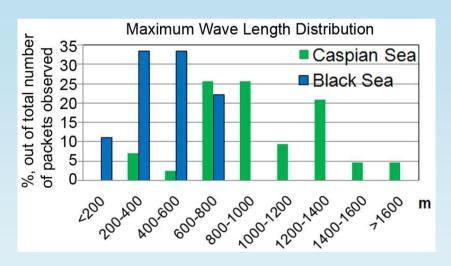






Гистограммы распределения пространственных характеристик ППВВ для регионов Черного и Каспийского морей



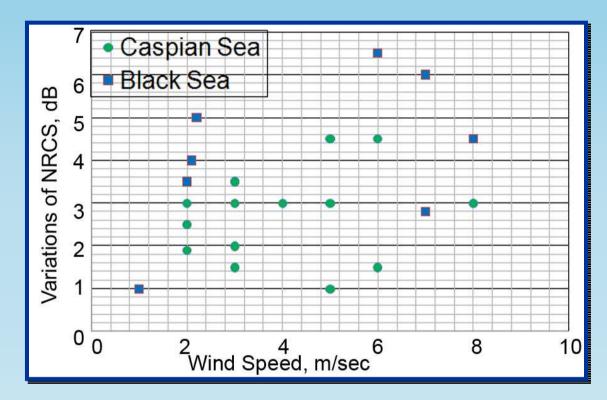


ППВВ, выявленные в северо-западной части Черного моря, отличаются меньшими пространственными масштабами, чем ППВВ в Каспийском море.

Выявление ППВВ, обладающих относительно малыми пространственными масштабами, стало возможным благодаря привлечению к исследованиям данных спутниковой радиолокации, обладающих высоким пространственным разрешением



Зависимость наблюдаемых вариаций интенсивности радиолокационного сигнала, рассеянного на поверхностных проявлениях внутренних волн, от скорости ветра для Каспийского и Черного морей



Относительные вариации интенсивности радиолокационного сигнала, рассеянного на ППВВ, при различных скоростях приводного ветра для акваторий Черного и Каспийского морей. (Использовались значения скорости ветра по данным наземных наблюдений метеорологических станций, ближе всего расположенных к району радиолокационной съемки.)

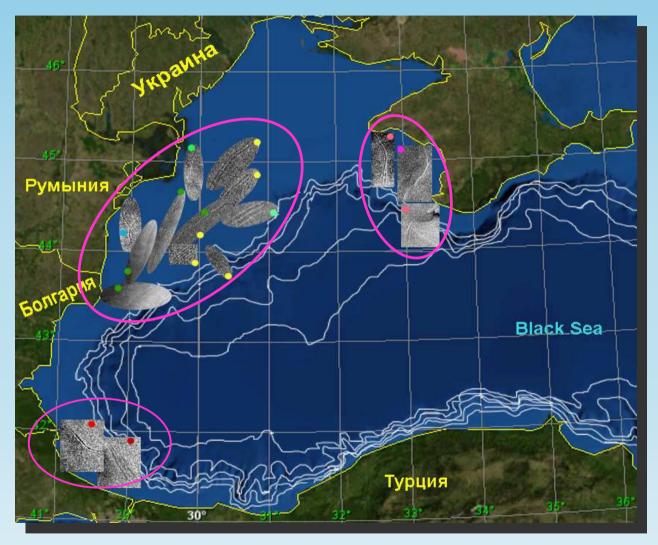
Наблюдаемые вариации интенсивности радиолокационного сигнала для ППВВ в Черном море как правило выше.

Возможно, это связано с тем, что в условиях более мелкого, чем в Каспийском море пикноклина, в приповерхностном слое здесь развиваются более сильные орбитальные течения, связанные с внутренними волнами



Школа-семинар «Спутниковые методы исследования Земли». Таруса, 15-20 февраля 2011 г.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ (2009-2010 гг)



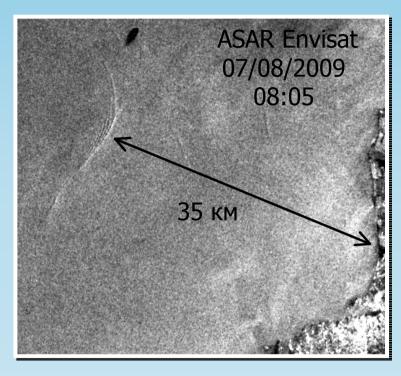
Три района локализации ППВВ:

- вблизи южной оконечности Крымского полуострова;
- на Румынском шельфе;
- -в Босфорском предпроливье

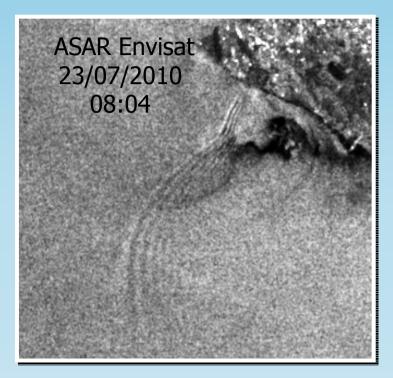
Обобщенная карта схема распределения поверхностных проявлений внутренних волн, выявленных по данным спутниковой радиолокации в западной части Черного моря (2009-2010 гг)



Поверхностные проявления ВВ вблизи Крымского п-ва



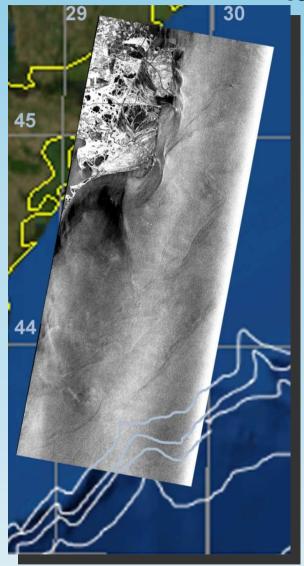
Длина фронта ведущей волны (м)	Максимальная длина волны (м)	К-во волн в пакете
21800	370	5



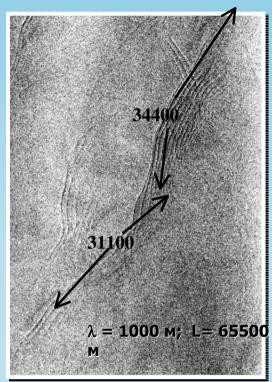
Длина	Максимальная	К-во волн
фронта	длина волны (м)	в пакете
ведущей		
волны (м)		
17500	600	4

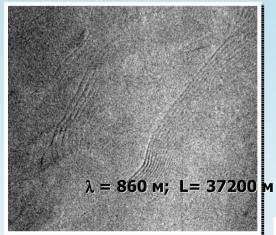


Поверхностные проявления ВВ на западном шельфе Черного моря



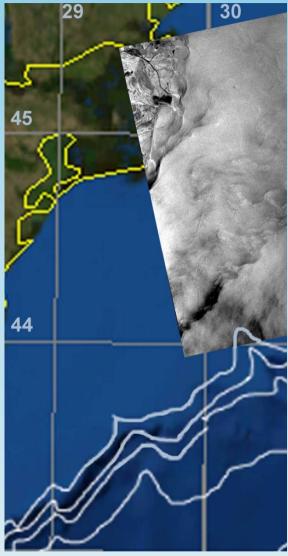
Envisat ASAR IMM, 75 m 2010-06-08 08:18







Поверхностные проявления ВВ на западном шельфе Черного моря



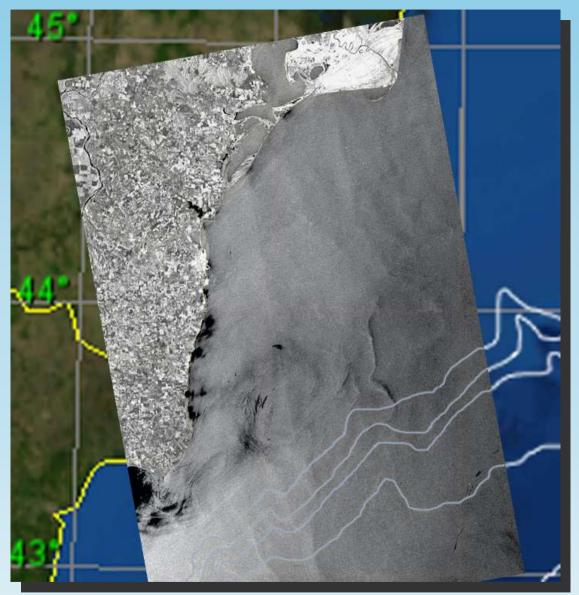
Envisat ASAR IMM, 75 m 2010-06-08 19:38

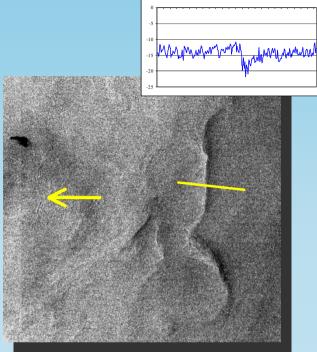


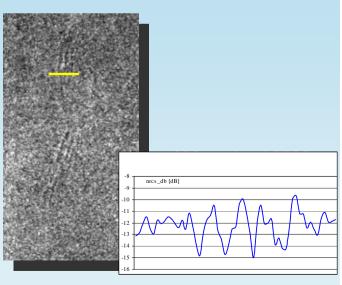
ASAR MERIS, 260 m 2010-06-08 08:19



Поверхностные проявления ВВ на западном шельфе Черного моря



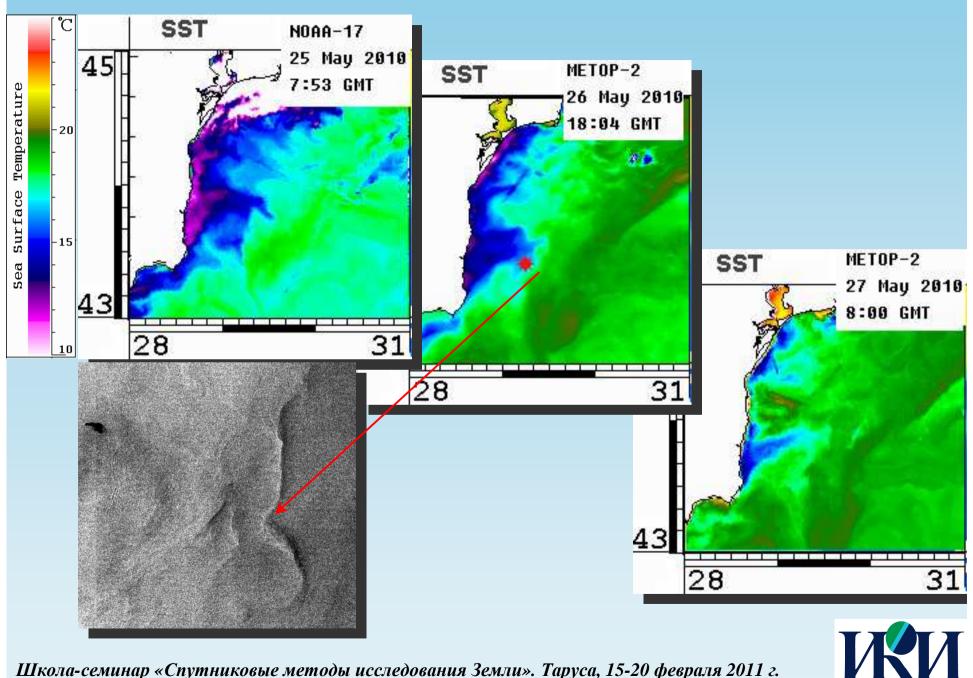










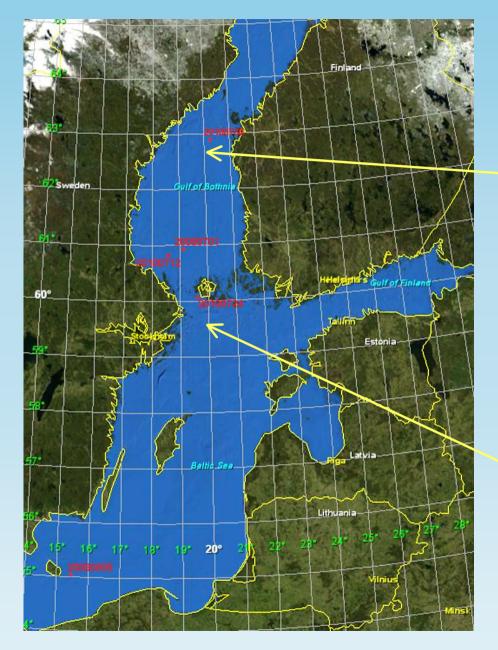


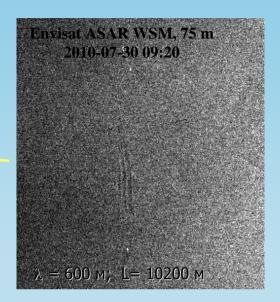
Возможные механизмы генерации ВВ в западной части Черного моря:

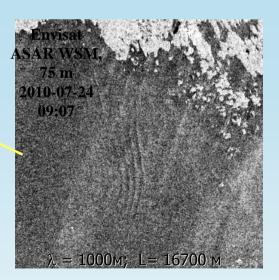
- •сгонно-нагонные явления
- •релаксация прибрежного апвеллинга
- •осцилляции гидрологического фронта, возникающего при выносе пресных вод Дунаем
- •пульсации приповерхностного ветра.



Поверхностные проявления ВВ в Балтийском море (2009-2010 гг)

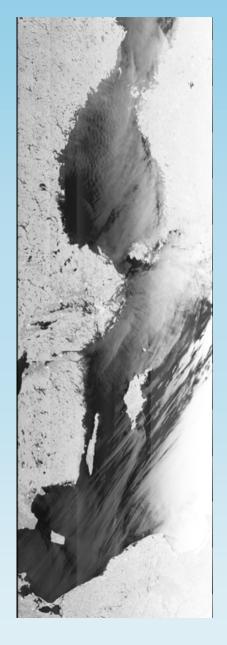








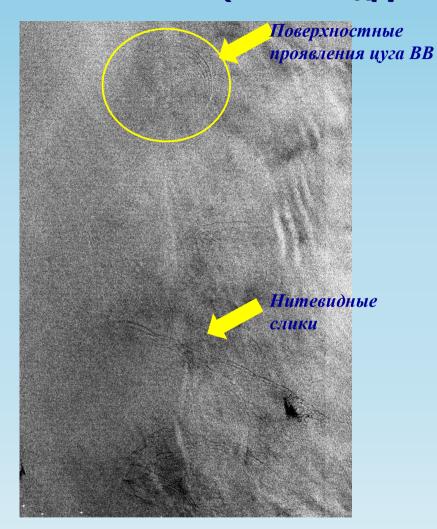
ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ НАБЛЮДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ВВ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ СРЕДСТВАМИ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ



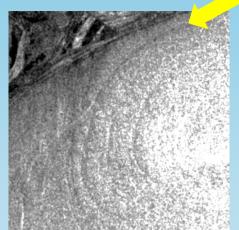
- Усложнение гидрометеорологических условий усиление или ослабление приводного ветра (штиль, ветровая тень), развитие волнения, цветение водорослей, выпадение интенсивных осадков, прохождение резких атмосферных и ветровых фронтов, появление внутренних волн атмосфере все это затрудняет распознавание ППВВ.
- ✓ Пространственные вариации мелкомасштабных ветровых волн, связанные с аэродинамическими возмущениями, проявляются в РЛИ в виде пространственных неоднородностей в распределении интенсивности рассеянного сигнала.
- Наши наблюдения показали. что радиолокационные образы атмосферных явлений в этом регионе занимают большую часть площади практически каждого РЛИ, а обусловленные ими радиолокационного вариации интенсивности высоки, сигнала достаточно что зачастую приводит к невозможности идентификации ППВВ.



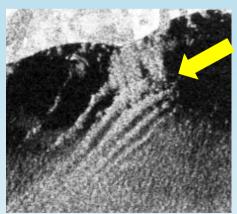
Поверхностные проявления ВВ в море и их подобия (ложные друзья интерпретатора)



Envisat ASAR WSM, 75 m 2010-05-23 06:52 Каспийское море



Envisat ASAR WSM, 75 m 2010-01-03 06:52 Северо-западная часть Черного моря



Envisat ASAR WSM, 75 m 2010-10-14 06:52 Азовское море



Мелкомасштабный

Атмосферные структуры



ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

	На основе данных спутниковой радиолокации морской
	поверхности получены статистически обоснованные данные о
	пространственной изменчивости поверхностных проявлений
	внутренних волн неприливной природы в Каспийском и
	Черном морях.
	Отмечено наличие сезонной и межгодовой изменчивости как
	волновой активности, так и ее проявлений в РЛИ морской
_	поверхности.
ш	Продемонстрировано, что ВВ в бесприливных морях
	отличаются разнообразием источников их возбуждения.
	Подтверждена связь между встречаемостью поверхностных
	проявлений пакетов внутренних волн в радиолокационных
	изображениях и положением слоя скачка плотности.
	Получены также единичные результаты относительно ППВВ в
	Балтийском море, и определены основные факторы,
	затрудняющие наблюдение поверхностных проявлений
	внутренних средствами спутниковой радиолокации в этом
	регионе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 08-05-00831-а и 10-05-00428-а).

Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством (ЕКА) в рамках проектов C1P.6342, Bear 2775 and C1P.1027.

В презентации использованы цветосинтезированные изображения сенсоров MODIS ИСЗ Terra/Aqua, любезно предоставленные нашими коллегами из МГИ НАНУ (Севастополь)



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ