

Пространственно-временная изменчивость поверхностных проявлений внутренних волн неприливной природы в различных морях

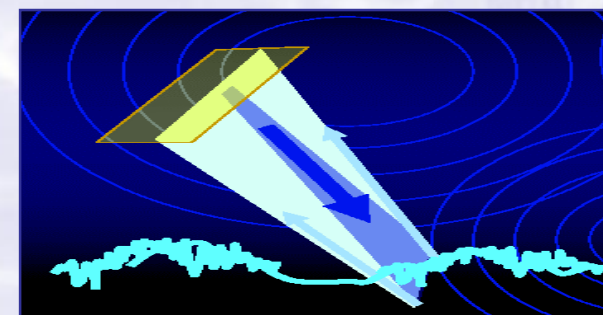
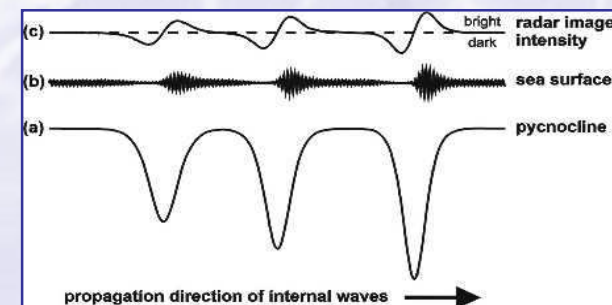
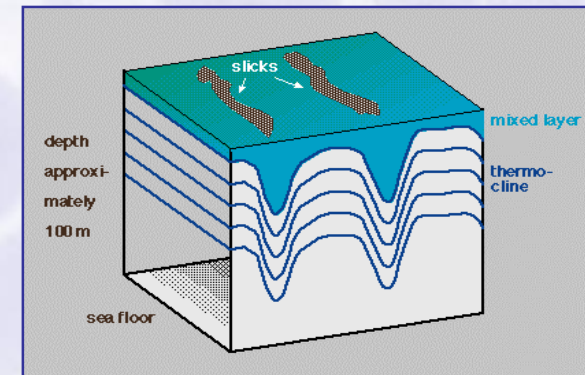
Митягина М.И., Лаврова О.Ю.

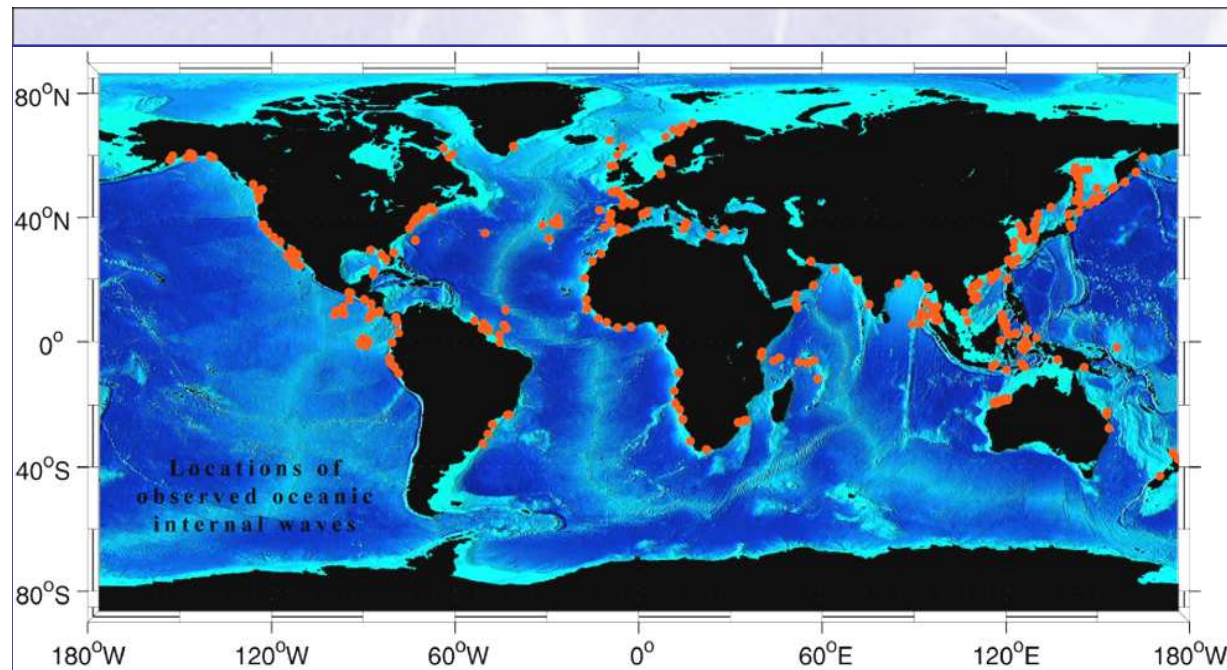
Институт космических исследований РАН



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

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



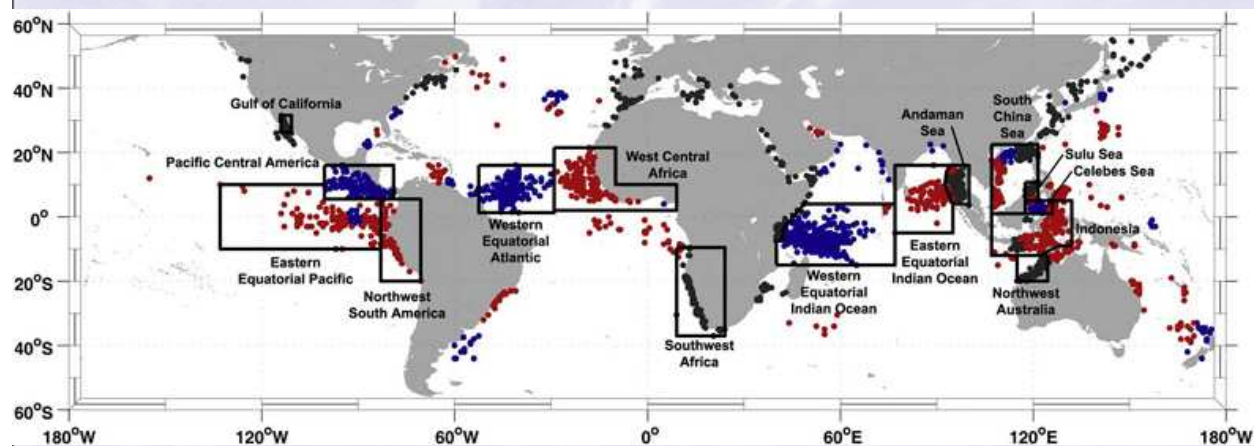


Jackson, C.R. & Apel, J.R. (2002). An atlas of internal solitary-like waves and their properties. Global Ocean Associates. (Second Edition (May 2002))

✓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 дистанционные методы в последнее десятилетие развивались в основном в приложении к изучению тех внутренних гравитационных волн в океане, генерация которых на материковом склоне связана с приливо-отливными 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.

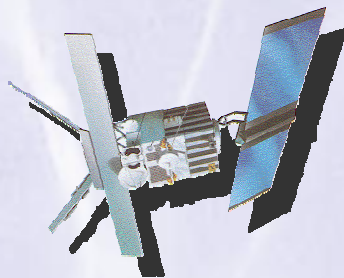
✓К сожалению, волны неприливного происхождения к настоящему моменту изучены слабее. Публикаций, посвященных спутниковым наблюдениям поверхностных проявлений внутренних волн в морях без приливов, нам не удалось найти. Зарождение внутренних волн в бесприливных морях возможно при протекании активных динамических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



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

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

- ☐ Идентифицировать случаи проявлений внутренних волн в бесприливных акваториях в радиолокационных данных
- ☐ Выявить районы генерации и распространения внутренних волн неприливногo происхождения и провести восстановление их основных пространственно-временных характеристик
- ☐ Провести сравнительный анализ радиолокационных проявлений внутренних волн в различных неприливных морях
- ☐ Оценить возможности использования данных спутниковой радиолокации для наблюдения и изучения внутренних волн в различных неприливных морях



РАЙОНЫ НАБЛЮДЕНИЙ

- ❖ Относятся к классу бесприливных морей
- ❖ Существенным образом отличаются по своим физико-географическим признакам, по структуре основных течений, по особенностям гидрологического режима и формирования сезонного термоклина, по направлению главенствующих ветров и состоянию приводного слоя атмосферы.

ЧЕРНОЕ МОРЕ



- ✓ 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

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».

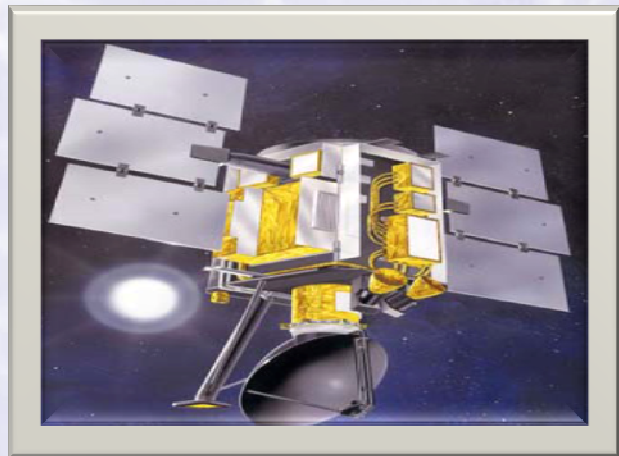
✓ Главная характерная особенность рельефа — обширное мелководье на севере и глубокие разделенные подводным порогом впадины в центре и на юге

✓ 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)

СЕНСОРЫ

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



РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

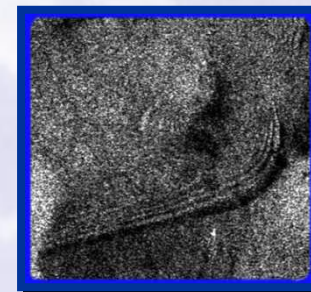
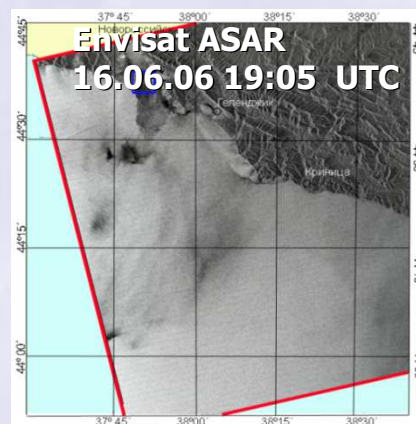
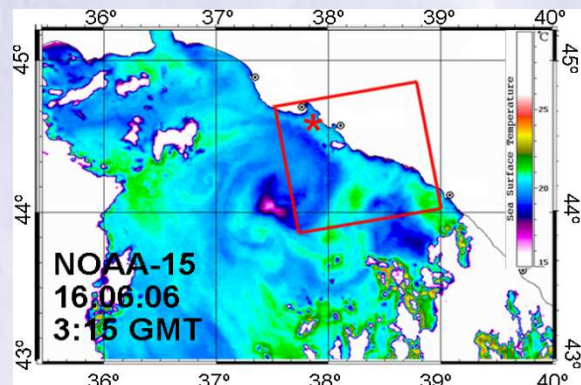
1999- 2005 гг. Натурные эксперименты – летний период

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)

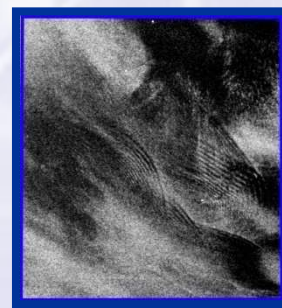
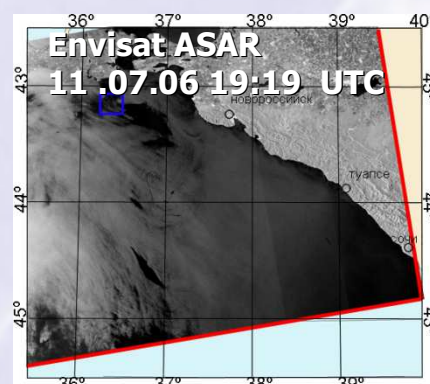
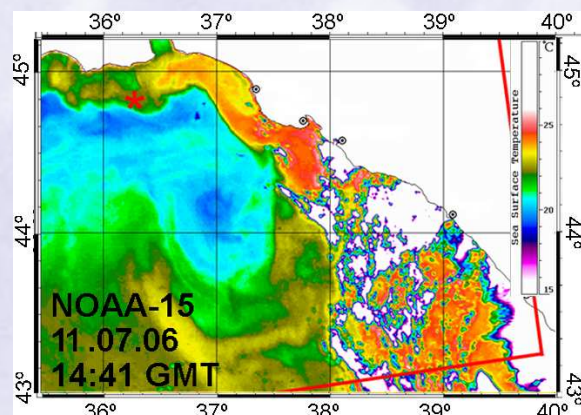
2009-2010 гг Прием и обработка всех съемок сенсоров *ASAR Envisat* и *SAR ERS-2*, производящихся ЕКА в оперативном режиме – разрешение 75 м



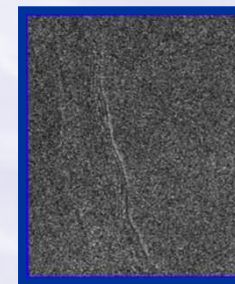
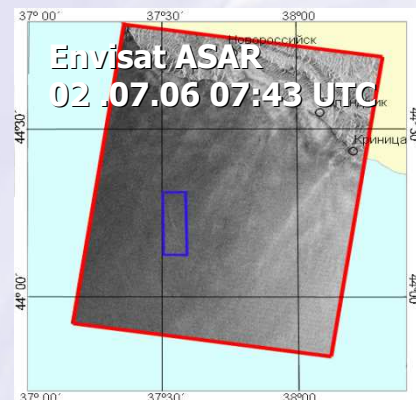
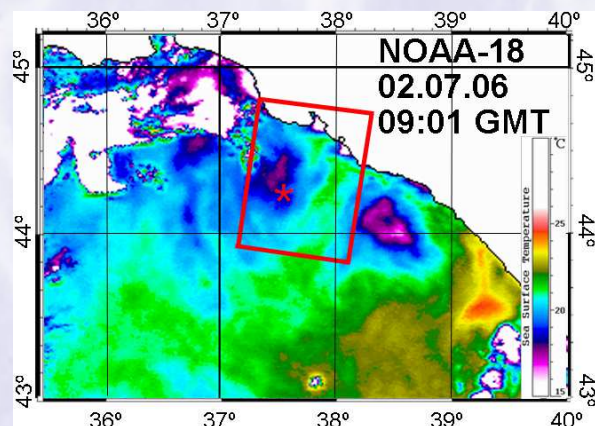
Поверхностные проявления ВВ в северо-восточной части Черного моря



Leading wave crest length	Max wave length
7200m	285 m



Leading wave crest length	Max wave length
12500 m	500m

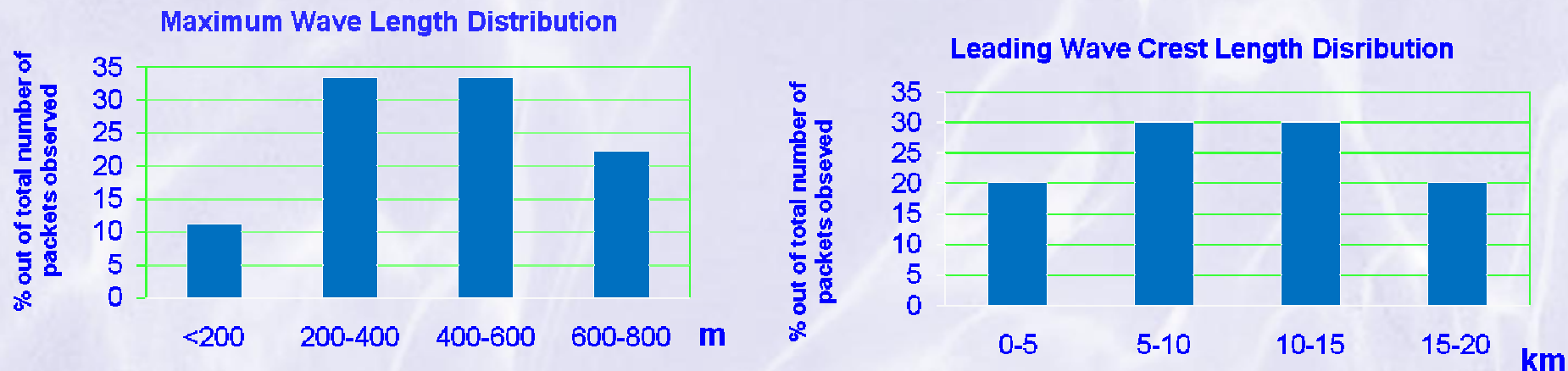


Leading wave crest length	Max wave length
13800 m	175m

http://www.iki.rssi.ru/asp/iw_images/index.html



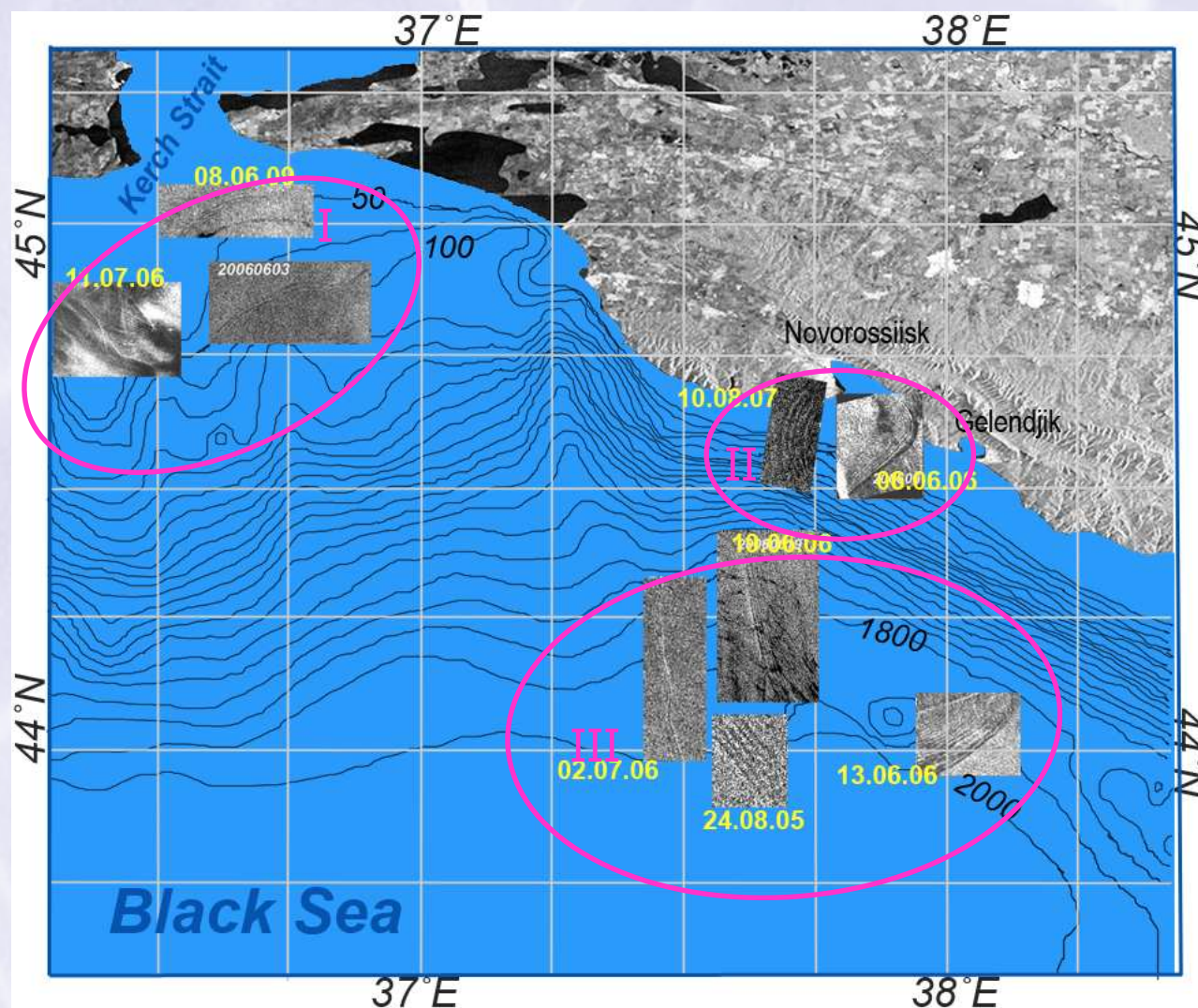
Гистограммы распределения пространственных характеристик ППВВ для северо-восточной части Черного моря



- 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.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ



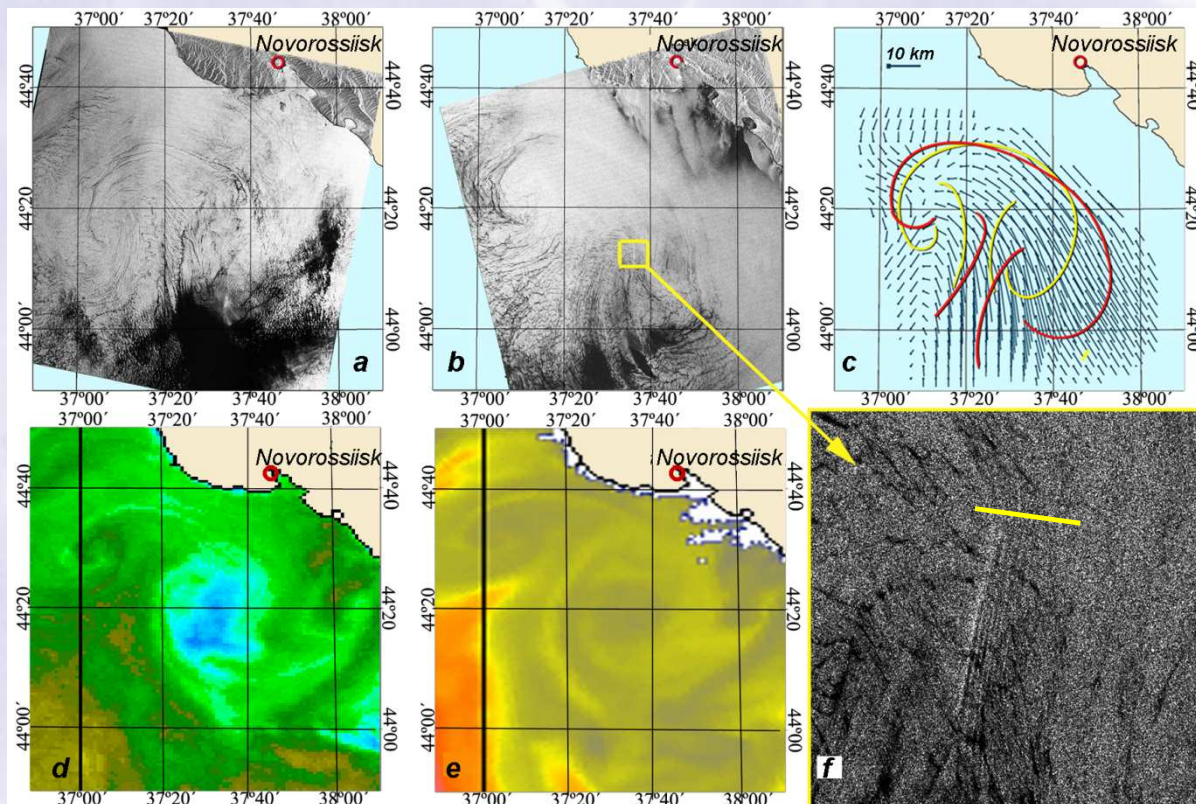
I. Район Керченского пролива над изобатами 50 – 100 м. Возможна генерация внутренних волн фронтами сгонно-нагонного происхождения

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 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

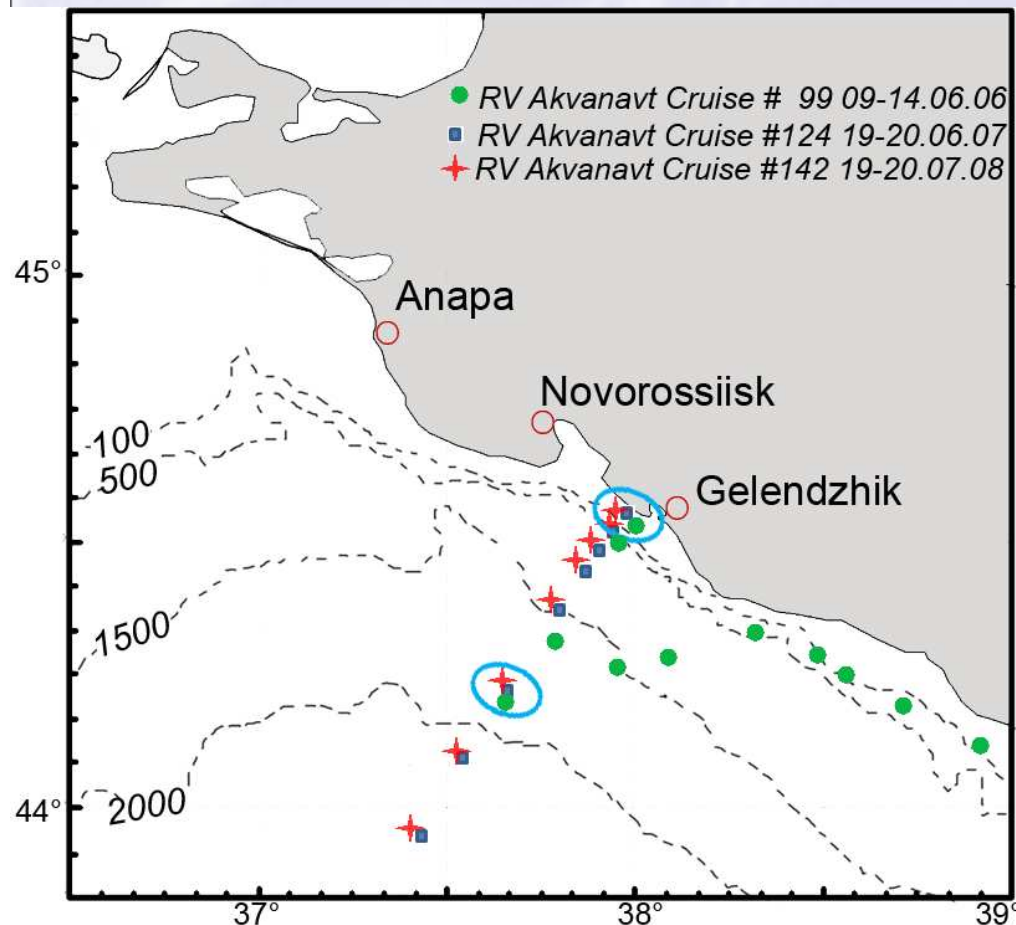
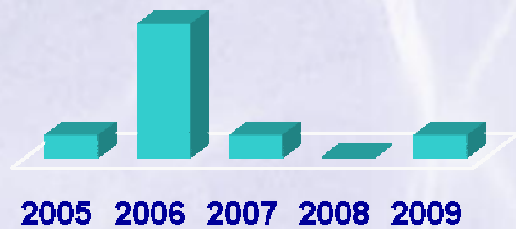
РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ



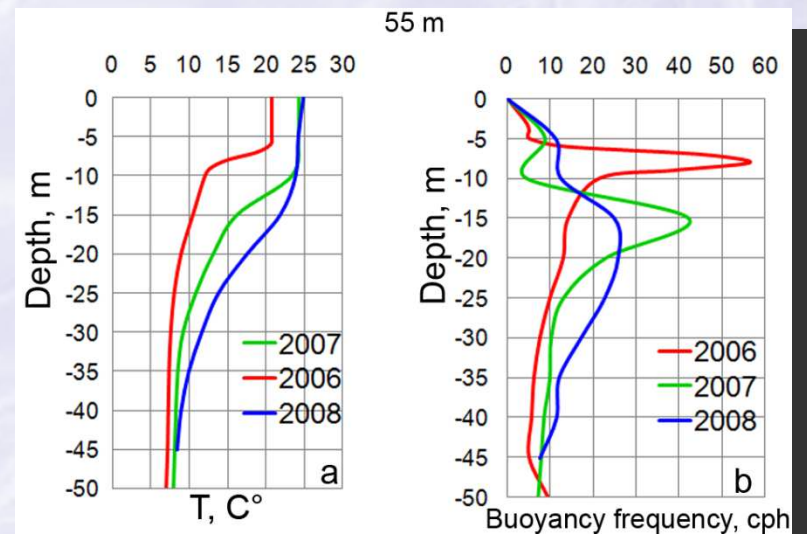
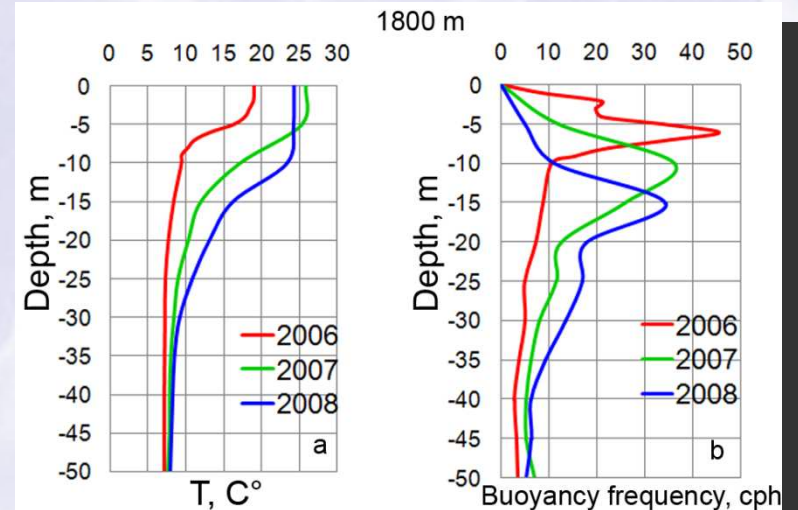
- a)** ASAR Envisat изображение, полученное 19.06.2006 в 07:52 UTC;
- b)** ASAR Envisat изображение, полученное 19.06.2006 в 19:10 UTC;
- c)** карта –схема перемещения вихревого диполя Рассчитанная скорость перемещения циклонической составляющей диполя составляет 0.05-0.1 м/сек на, антициклонической – 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

Дата и время (UTC)наблюдения	Координаты центра пакета волн	Длина фронта ведущей волны (м)	Глубина места проявления (м)	Максимальная 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

Межгодовая изменчивость встречаемости ППВВ в северо-восточной части Черного моря в радиолокационных данных

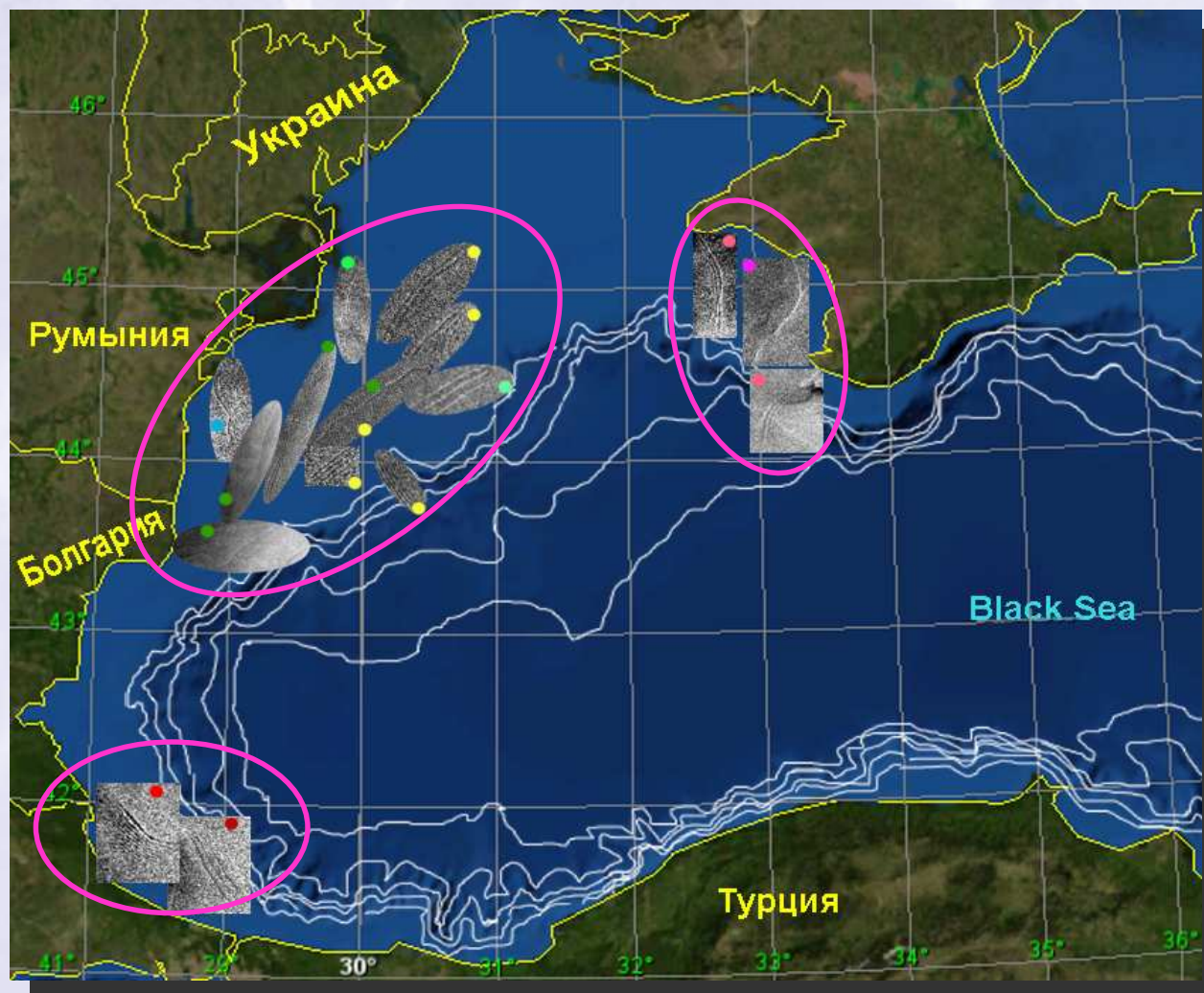


Вертикальные разрезы температуры воды по данным контактных измерений (а) и частоты плавучести (б) над изобатами 1800 и 50 м



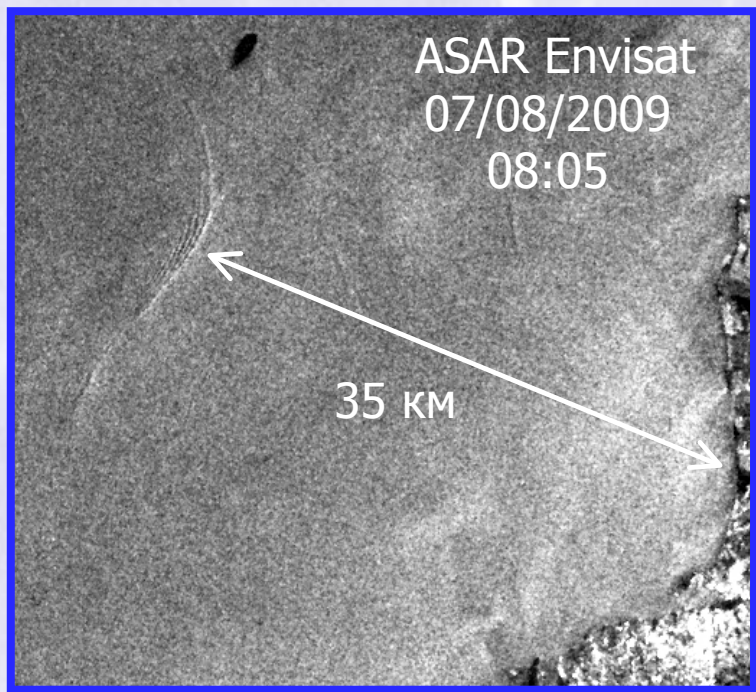
$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}$$

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

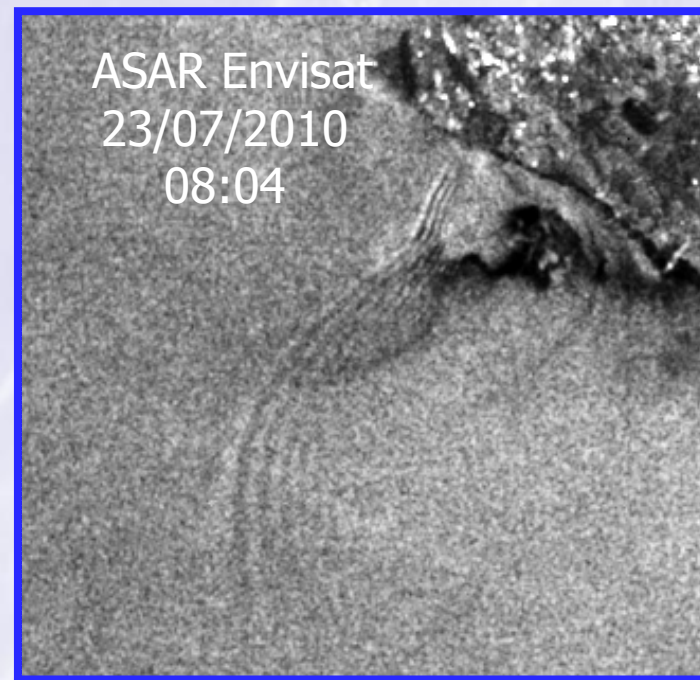


Обобщенная карта схема распределения поверхностных проявлений внутренних волн, выявленных по данным спутниковой радиолокации в западной части Черного моря (2009-2010 гг)

Поверхностные проявления ВВ вблизи Крымского п-ва

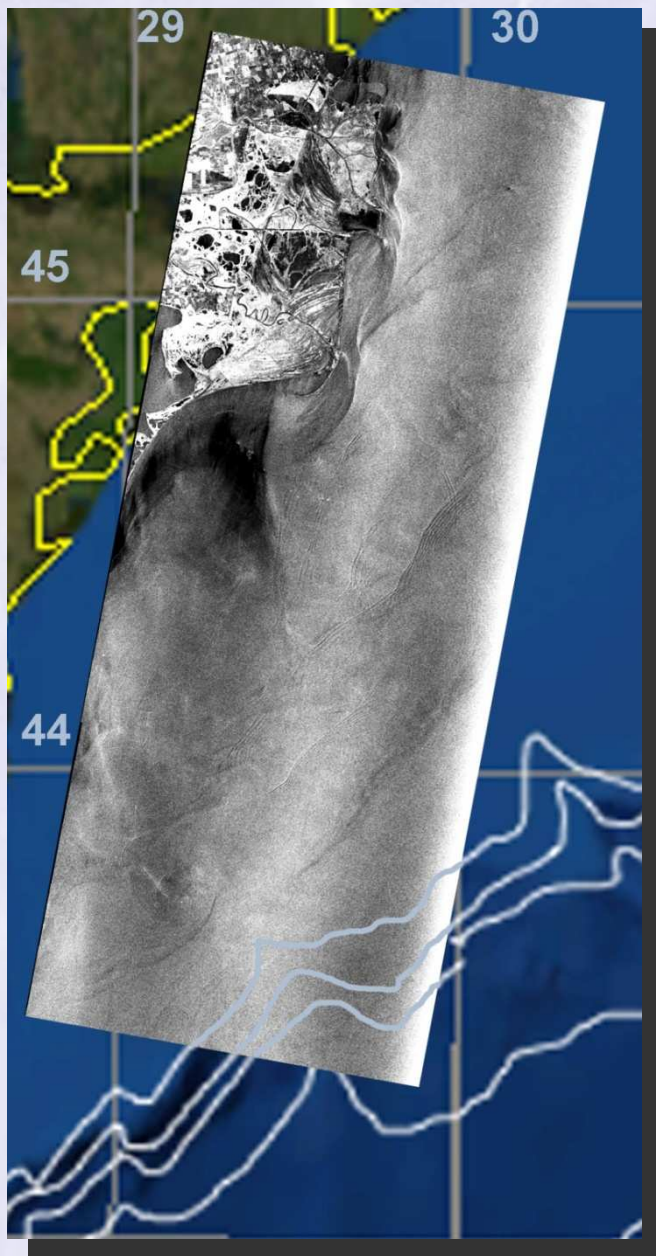


Длина фронта ведущей волны (м)	Максимальная длина волны (м)	К-во волн в пакете
21800	370	5

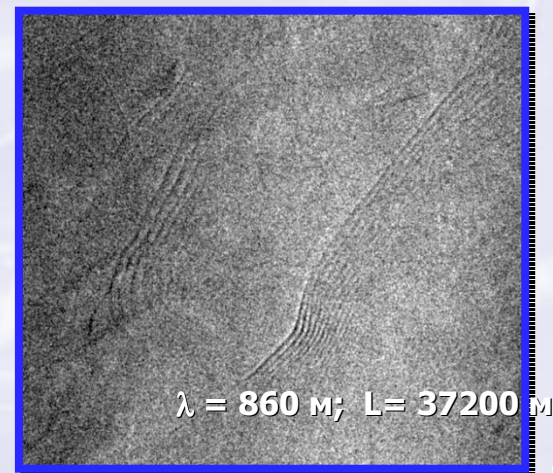
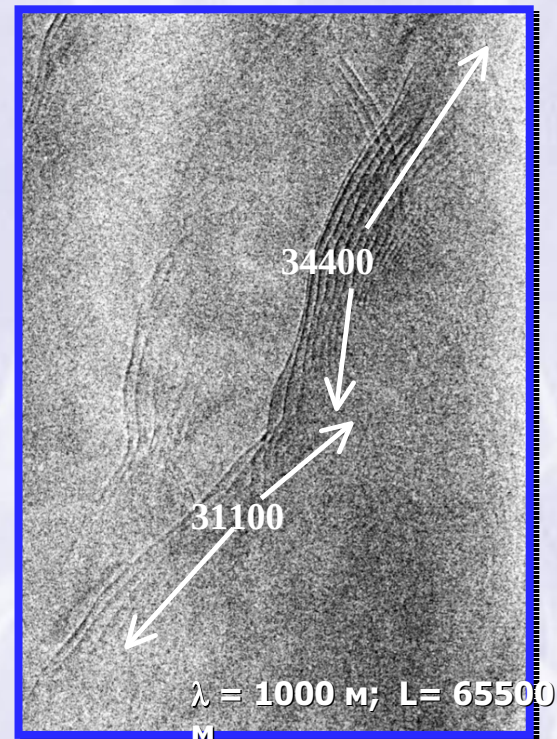


Длина фронта ведущей волны (м)	Максимальная длина волны (м)	К-во волн в пакете
17500	600	4

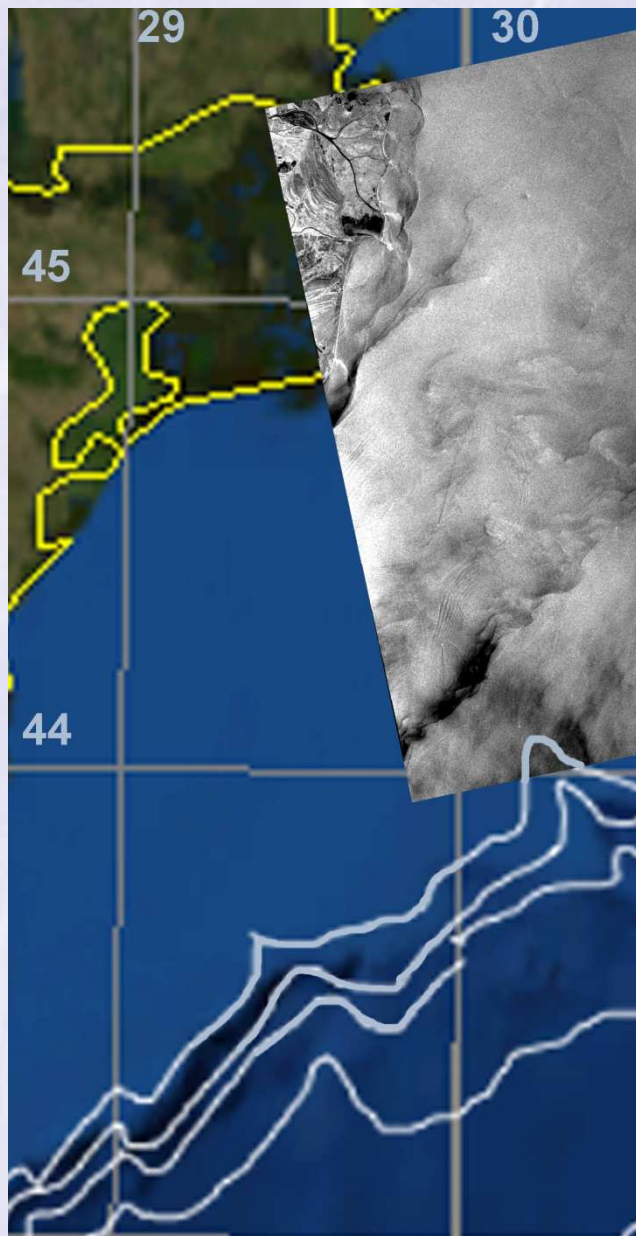
Поверхностные проявления ВВ на западном шельфе Черного моря



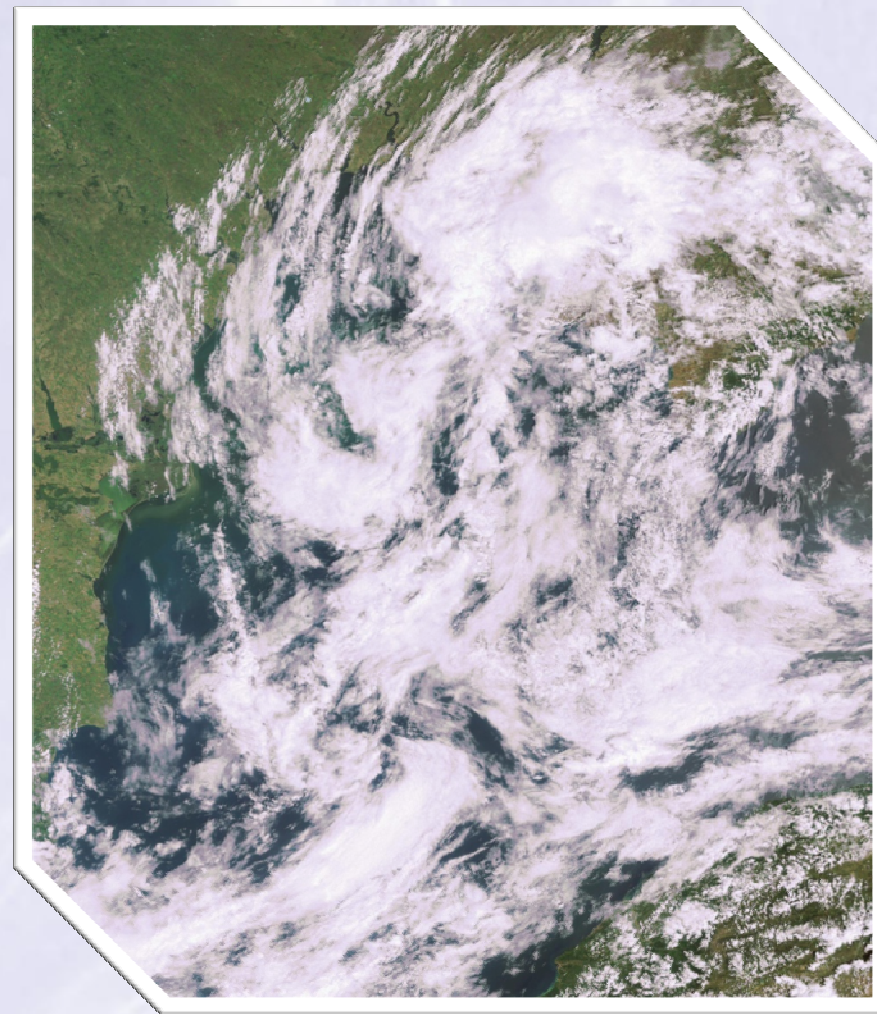
Envisat ASAR IMM, 75 m
2010-06-08 08:18



Поверхностные проявления ВВ на западном шельфе Черного моря

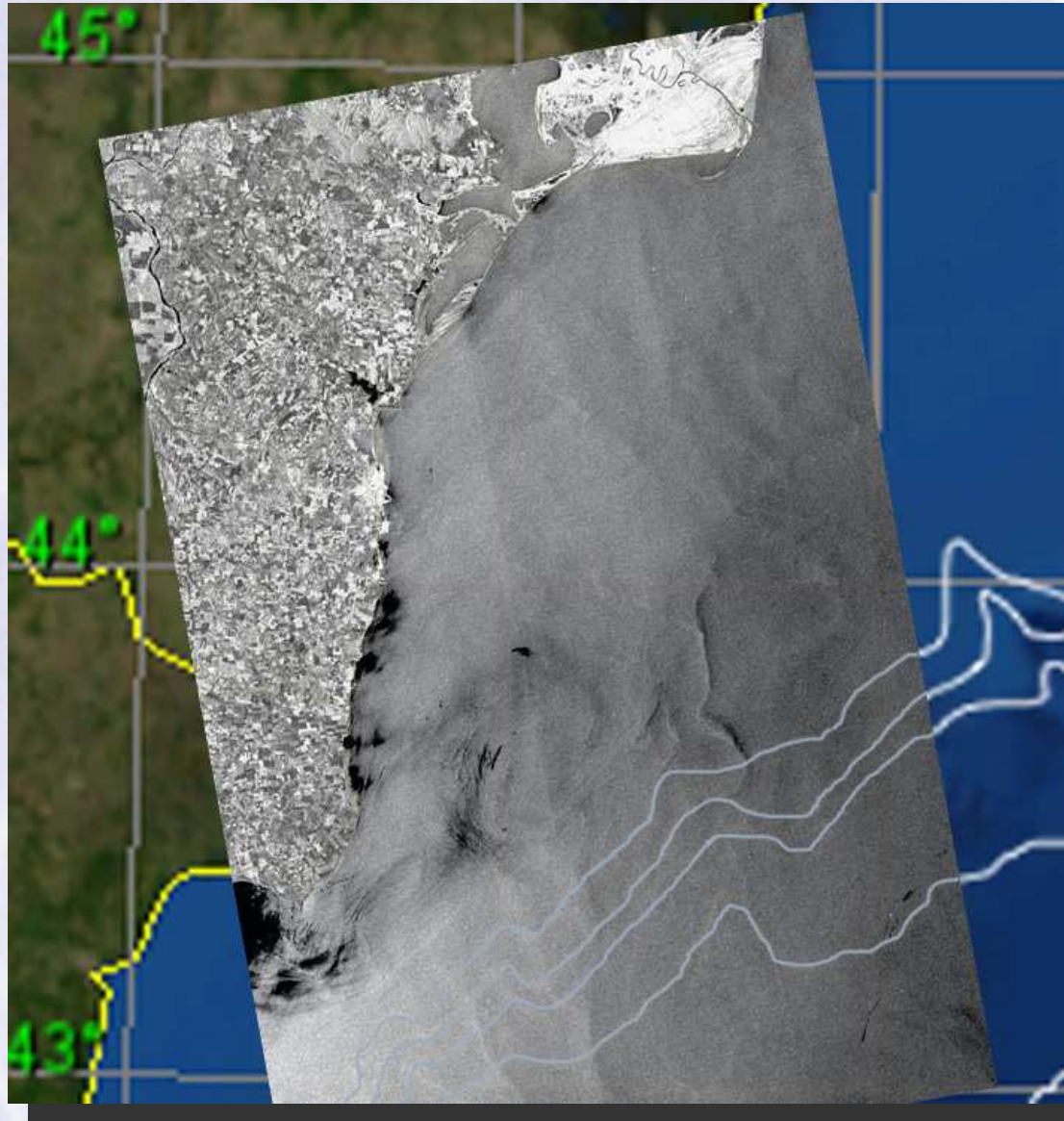


Envisat ASAR IMM, 75 m
2010-06-08 19:38

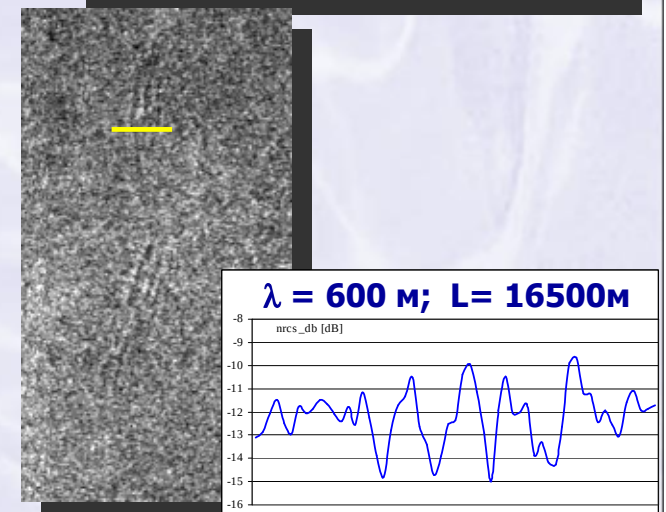
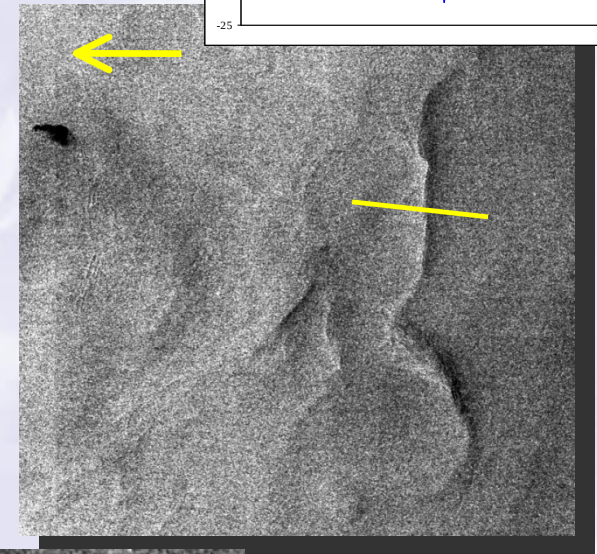
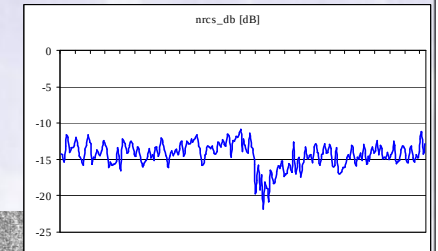


ASAR MERIS, 260 m
2010-06-08 08:19

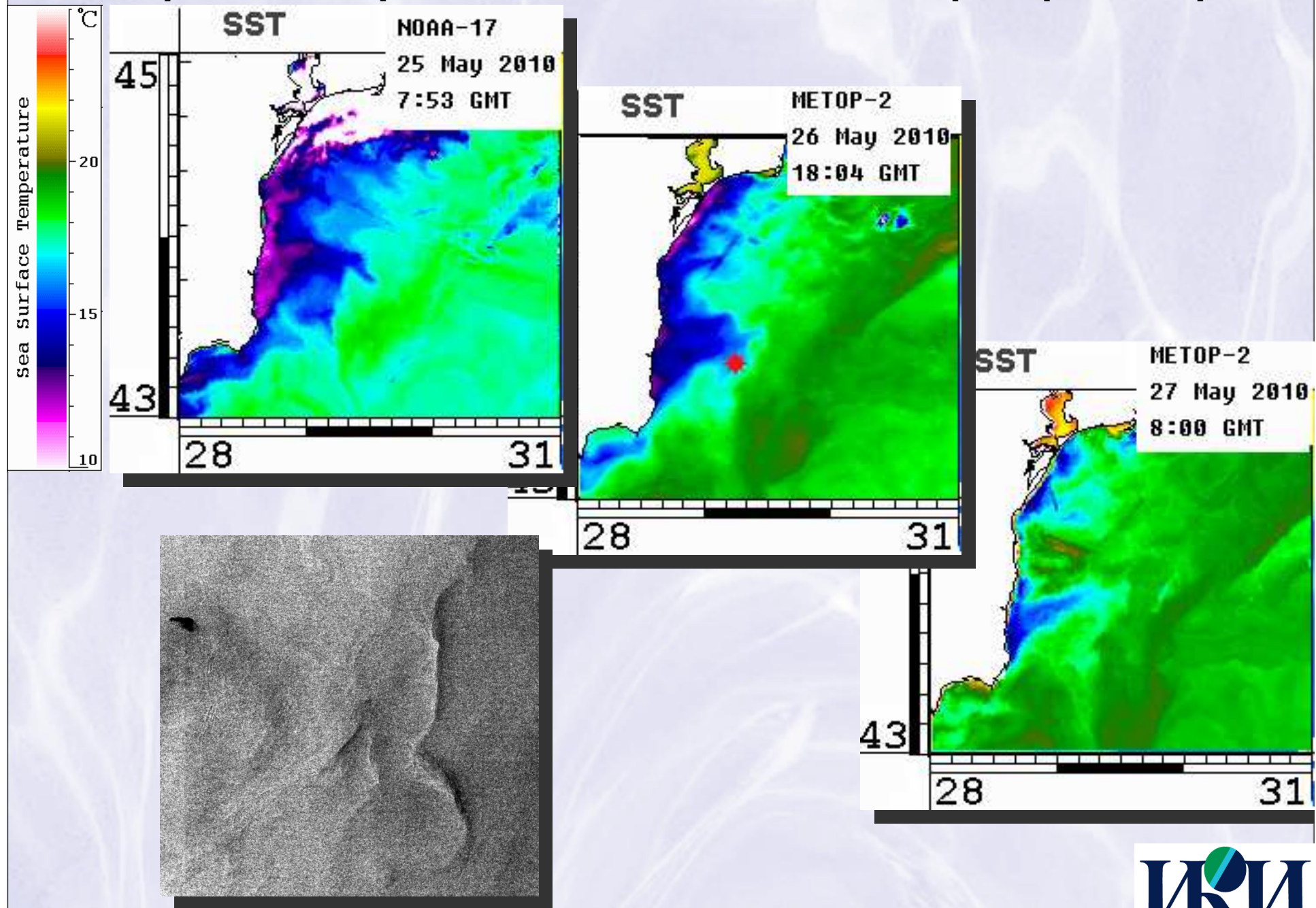
Поверхностные проявления ВВ на западном шельфе Черного моря



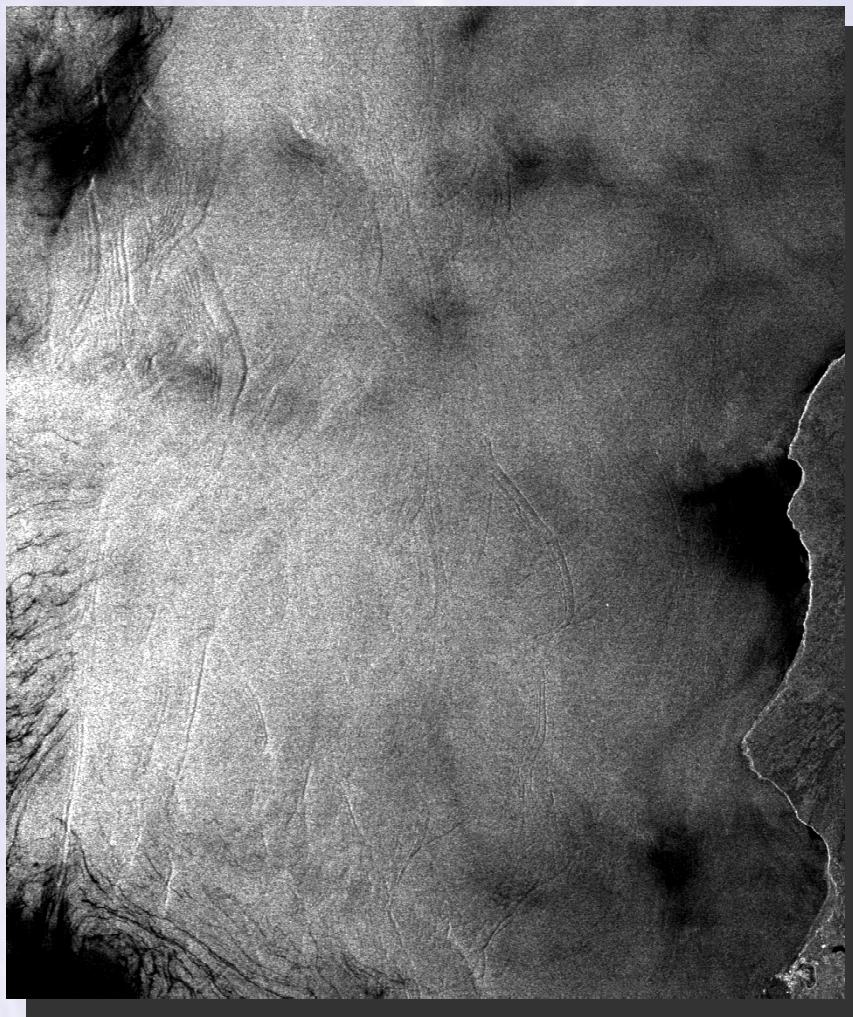
Envisat ASAR WSM, 75 m
2010-05-26 19:46



Поверхностные проявления ВВ на западном шельфе Черного моря

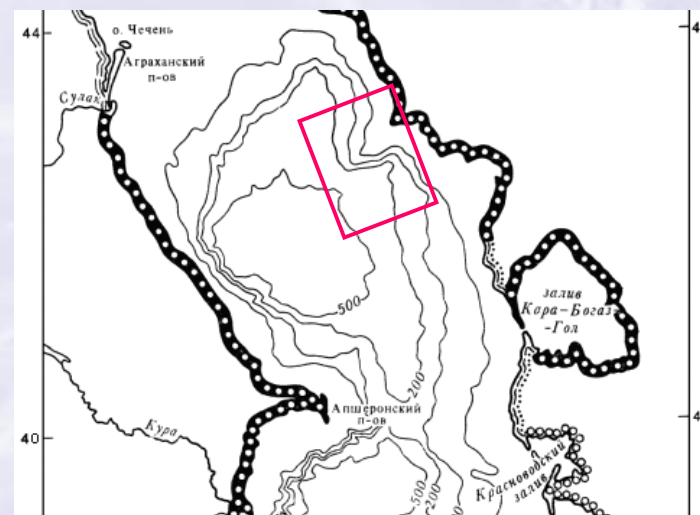


Поверхностные проявления ВВ в Каспийском море (2009-2010 гг)



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

- На одном радиолокационном изображении морской поверхности (400 x 400 км) одновременно выявляется 5-6 пакетов, распространяющихся под углом друг другу
- Пакеты имеют вид классических цугов солитонов.
- Для взаимодействующих цугов наблюдаются характерные для нелинейных взаимодействий искривления фронтов, фазовые сдвиги и пр.
- Как правило, цуги распространяются к берегу и наблюдаются над глубинами 50-150 м.



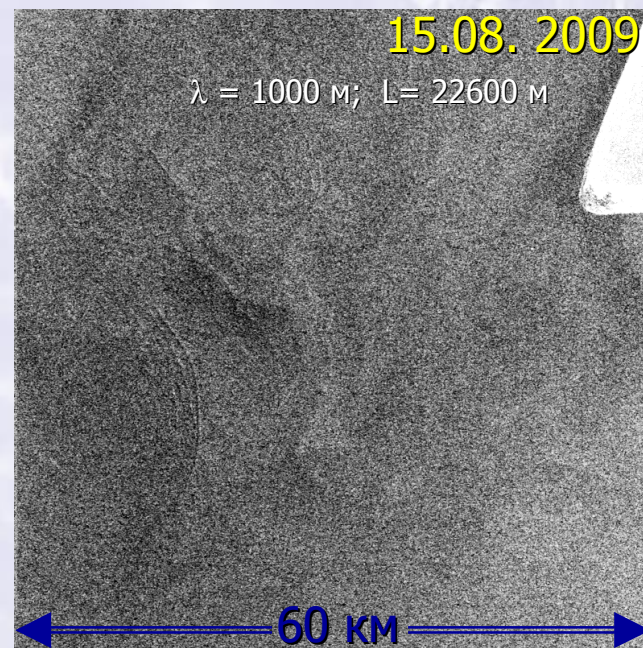
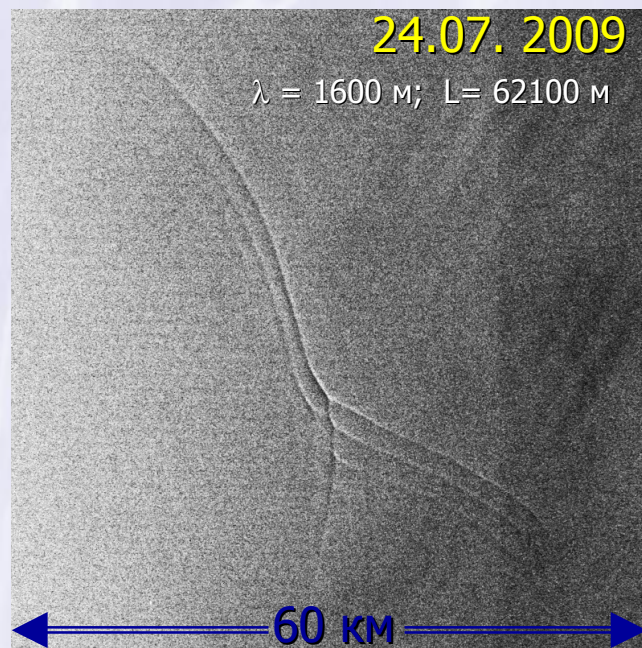
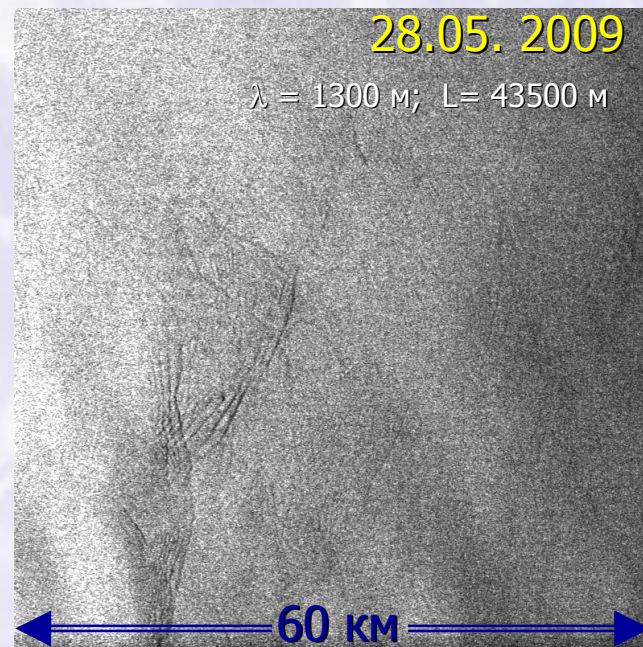
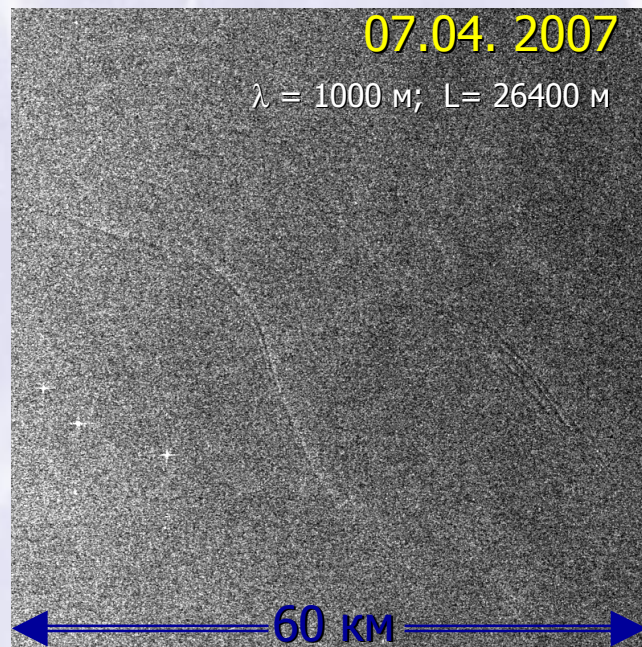
Поверхностные проявления ВВ в Каспийском море (2009-2010 гг)

- Длина фронта ведущей волны достигает десятков километров, изменяясь в пределах от 15 до 75 км.

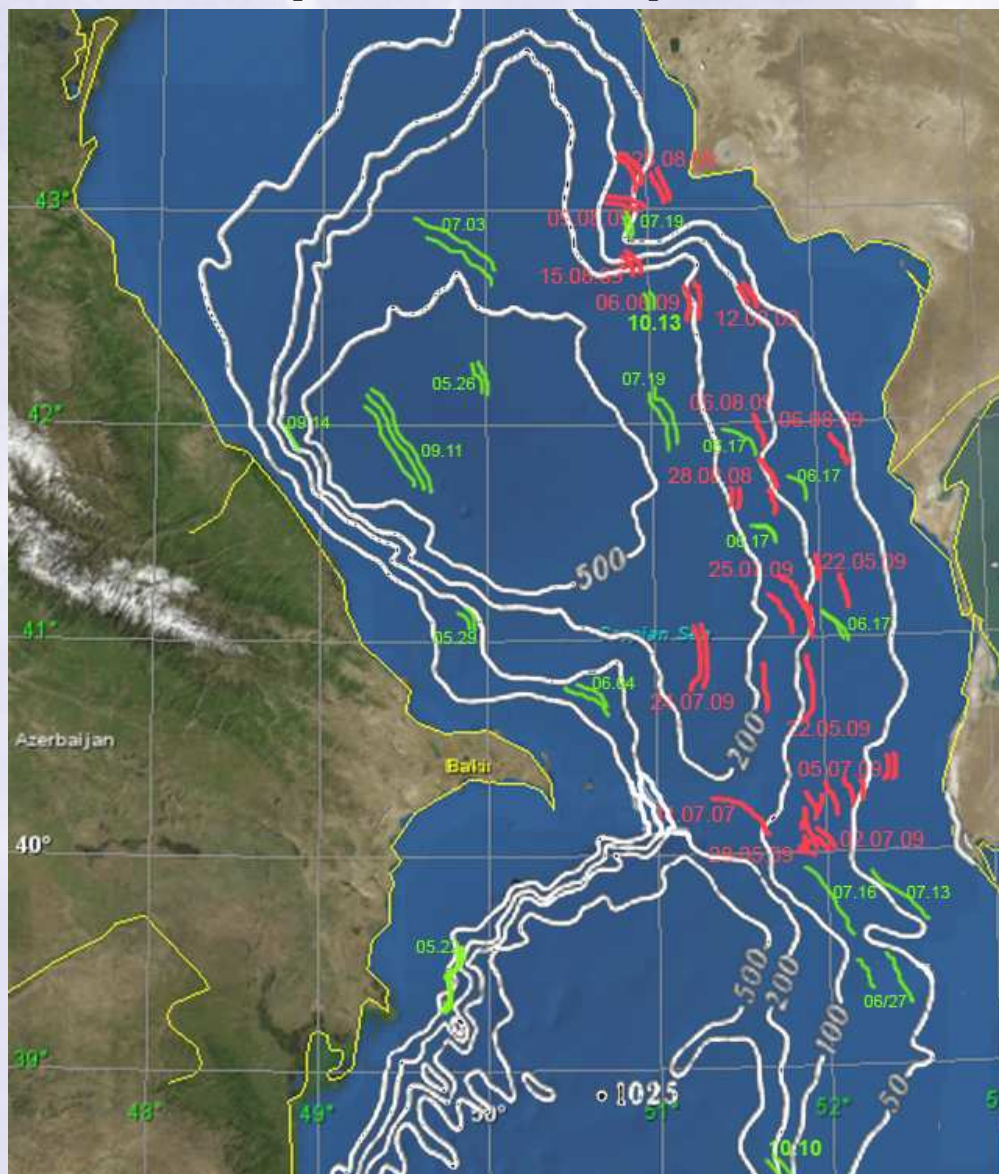
- Ширина пакетов в зависимости от количества волн в цуге варьируется от 1 до 6 км

- Длина максимальной волны в цуге от 370 до 1700 м.

- Фронт ведущей волны в подавляющем большинстве случаев проявлялся в виде сулоя, т.е. полосы усиления поверхностного волнения.



Поверхностные проявления ВВ в Каспийском море (2009-2010 гг.)

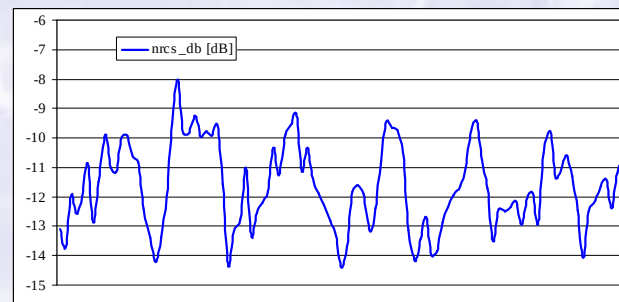
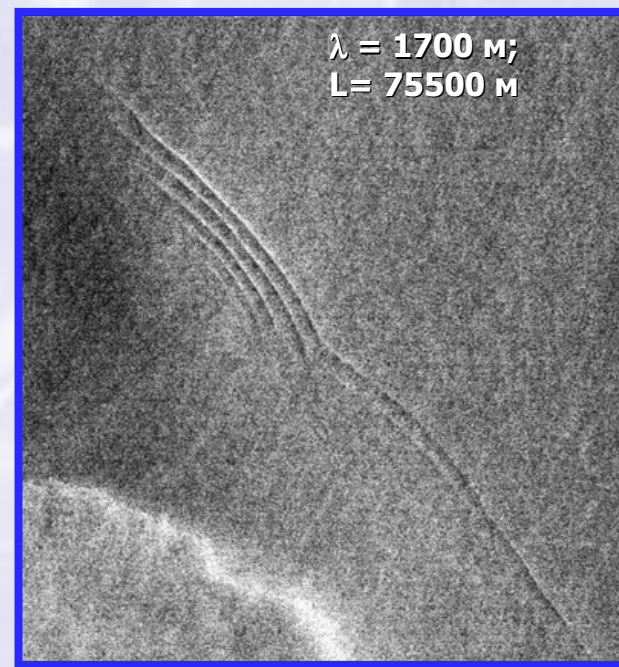


Обобщенная карта-схема распределения ППВВ, выявленных по данным спутниковой радиолокации в центральной части Каспийского моря

Поверхностные проявления ВВ в Каспийском море (2009-2010)



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



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

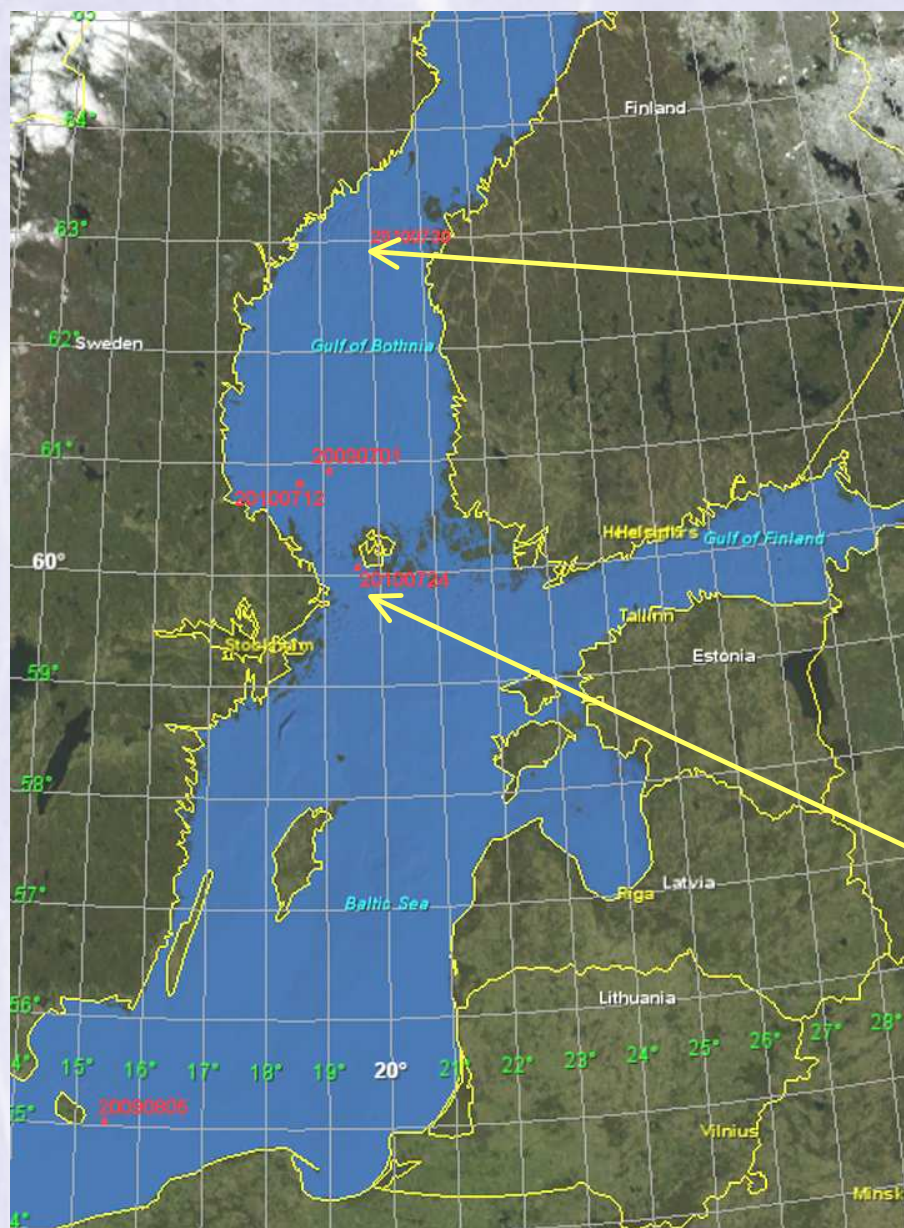


Envisat ASAR WSM, 75 m
2010-09-11 06:52

+

ASAR MERIS, 260 m
2010-09-11 06:48

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



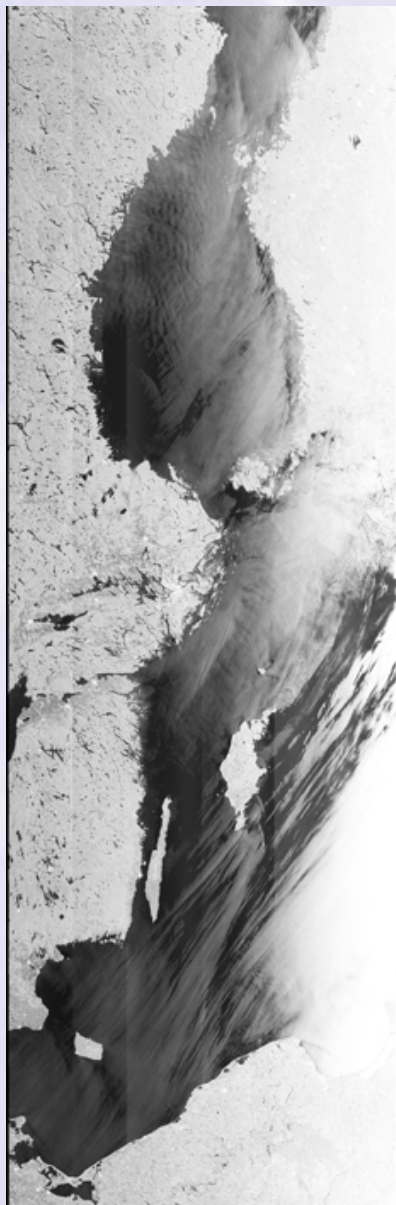
Envisat ASAR WSM, 75 m
2010-07-30 09:20

$\lambda = 600 \text{ m}$; $L = 10200 \text{ m}$

Envisat
ASAR WSM,
75 m
2010-07-24
09:07

$\lambda = 1000 \text{ m}$; $L = 16700 \text{ m}$

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 вариации интенсивности радиолокационного сигнала достаточно высоки, что зачастую приводит к невозможности идентификации ППВВ.

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.
- ❑ 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).***

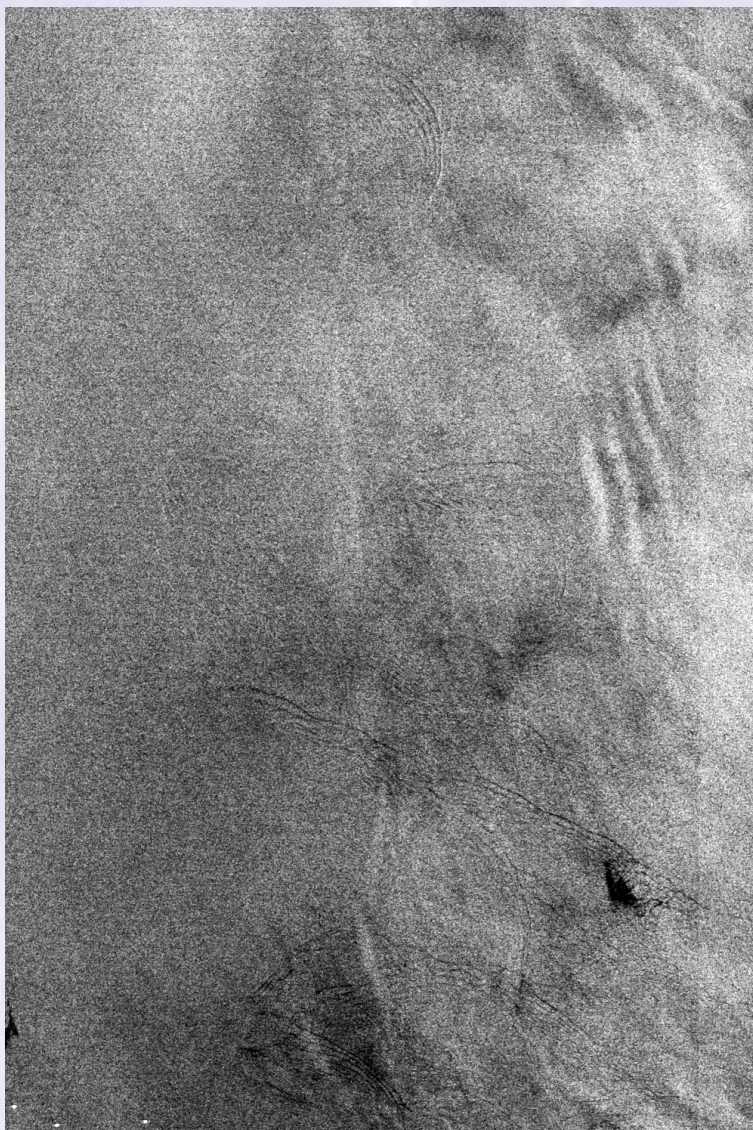
***Спутниковые радиолокационные данные предоставлены
Европейским космическим агентством (ЕКА) в рамках
проектов C1P.6342, Bear 2775 and C1P.1027.***

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

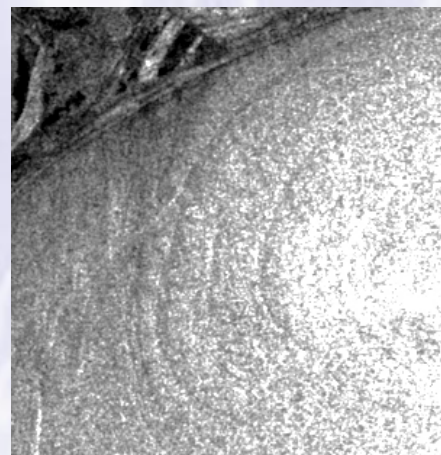


**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ**

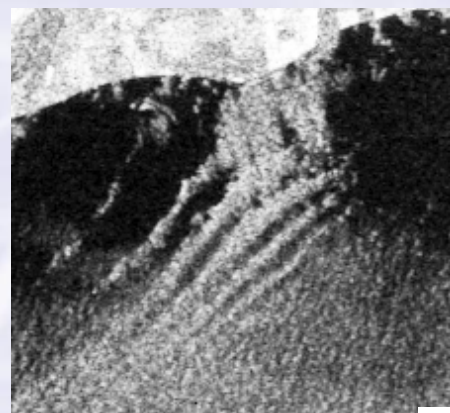
Поверхностные проявления ВВ и их подоби



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



Envisat ASAR WSM, 75 m
2010-01-03 06:52



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