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.

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 переменными поверхностного волнения течениями, создаваемыми B приповерхностном слое внутренними волнами.















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

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

✓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 метолы 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 посвяшенных 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 релаксацией возникновением И 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 В бесприливных морях, базирующихся на экспериментальных данных, полученных с помощью ког



ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Идентифицировать случаи проявлений внутренних волн в бесприливных акваториях в радиолокационных данных

□ Выявить районы генерации и распространения внутренних волн неприливного 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.



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)



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



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+ ИC3 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 BB, 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.





Фрагмент Envisat ASARизображения (56 х 64 км). 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 (42x35 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







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 РЛИизображений 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 РЛизображений 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
 - 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





Leading wave crest length	Max wave length
18300 m	500 m





Поверхностные проявления ВВ в северо-восточной части Черного моря

44915

44900





Leading wave crest length	Max wave length
7200m	285 m



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;

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 (б) 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



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

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.)



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

K	ASAR E 07/08/ 08:0 35 км	invisat 2009 05
Ллина	Максимальная	К-ео еоли
длина фронта ведущей волны (м)	ллаксимальная длина волны (м)	к-во волн в пакете
21800	370	5



600

17500

_		

4





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 \checkmark 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



Мелкомасштабный прибрежный вихрь

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

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.
- □ 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