Возможные механизмы генерации внутренних волн в северо-восточной части Черного моря

О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, К.Д. Сабинин

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

По данным спутникового радиолокационного зондирования выявлены случаи поверхностных проявлений цугов внутренних волн в северо-восточной части Черного моря. Определено, что все зарегистрированные проявления внутренних волн локализуются вблизи границы вихревой структуры или гидрологического фронта. На основе анализа совокупности данных спутникового зондирования морской поверхности в микроволновом и ИК диапазонах с привлечением данных контактных измерений определены возможные факторы, приводящие к генерации наблюдаемых внутренних волн неприливного происхождения и сделаны предположения о соответствующем механизме генерации. Выявлена связь между встречаемостью поверхностных проявлений пакетов внутренних волн и положением слоя скачка плотности.

Введение

Внутренние волны играют очень важную роль в перемешивании, формировании структуры и циркуляции вод океана. Вследствие этого необходимо не только их изучение как физического явления, но и глобальное описание их встречаемости, параметров и механизмов генерации в различных районах Мирового океана. Несмотря на большой объём накопленных к настоящему времени данных контактных измерений, эта задача не может быть выполнена на основании обобщения только этих данных, поскольку их не хватает для глобального описания. Существенным подспорьем для такого описания является аэрокосмическое зондирование морской поверхности, на которой часто проявляются интенсивные внутренние волны [1, 2]. Но и данные дистанционного зондирования не достаточны, т.к. даже интенсивные внутренние волны не всегда проявляются на поверхности моря, а их появление может быть связано не только с относительно регулярными внутренними приливами, но и со спорадически возникающими инерционными волнами и другими эпизодическими явлениями.

Располагая обширным массивом спутниковых изображений поверхности Черного и Балтийского морей, а также данными контактных измерений, мы попытались установить причины появления (и проявления на поверхности) цугов внутренних волн в этих морях, где приливы очень слабы, и поэтому не «работает» распространённый в океане и хорошо изученный механизм генерации цугов внутренних волн за счет распада внутренних приливов.

Радиолокационные наблюдения внутренних волн

Привлечение к исследованию внутренних волн в океане данных аэрокосмического радиолокационного зондирования морской поверхности значительно расширило возможности изучения процессов генерации, распространения и взаимодействия пакетов внутренних волн по их поверхностным проявлениям и способствовало существенному углублению наших представлений о физике и географии внутренних волн. Дистанционным наблюдениям распространения внутренних волн в Мировом океане посвящены сотни публикаций, при этом их поток не обнаруживает тенденцию к уменьшению. Обширный опыт по дистанционному микроволновому изучению внутренних волн имеет и научный коллектив ИКИ РАН. Ряд приоритетных работ опирается на результаты комплексных авиационно-космических экспериментов, проводившихся под руководством В.С. Эткина в различных районах Мирового океана. Исследования касались в первую очередь морей Дальнего Востока, Северо-западной части Тихого океана и северо-западной Атлантики [3].

Поверхностные проявления внутренних волн 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 [4, 5]. Основная форма поверхностных проявлений внутренних волн в океане – это чередование квазипараллельных полос выглаженной (слики) и шероховатой (сулои) морской поверхности, Подобные структуры были обнаружены на РЛИ северо-восточной части Черного моря.

Поверхностные проявления внутренних волн неприливного происхождения в северо-восточной части Черного моря

Черное море, также как Балтийское и Каспийское моря из-за их относительно малых размеров и замкнутости может быть отнесено к классу бесприливных морей, в которых не возникают внутренние приливы и связанные с ними короткопериодные BB. Однако существует целый ряд работ, посвященных натурным наблюдениям и численному моделированию генерации в Черном море внутренних волн, основным источником которых является инерционные колебания и апвеллинг. Следует отметить, что подавляющая часть экспериментальных данных по внутренним волнам в акватории Черного моря была получена с помощью контактных методов, когда прибор погружается в воду и дает сведения о том, что делается вокруг него [6, 7].



Рис. 1. Обобщенная карта схема распределения поверхностных проявлений внутренних волн, выявленных по данным спутниковой радиолокации в северо-восточном секторе Черного моря

В 2006–2008 гг. авторы статьи принимали участие в спутниковом мониторинге состояния вод российского сектора Азовского и Черного морей [8, 9]. В периоды с апреля по октябрь принима-

лись и обрабатывались РЛИ высокого разрешения усовершенствованного радиолокатора с синтезированной апертурой (ASAR) со всех пролетов спутника Envisat над акваториями Азовского и северо-восточной части Черного морей (периодичность пролетов составляет 12-72 часа). Каждое РЛИ подвергалось визуальному анализу с целью обнаружения на нем структур, с определенностью принадлежащих к классу поверхностных проявлениях внутренних волн. Большой объем данных позволил получить некоторые статистические результаты о поверхностных проявлениях внутренних волн в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря. За весь период наблюдений нами были идентифицированы 8 случаев проявлений внутренних волн, причем 6 из них были зарегистрированы в 2006 году. Из шести случаев проявлений внутренних волн, выявленных на РЛИ 2006 года, четыре случая приходятся на июнь месяц – соответственно 03.06.06., 13. 06.06. 16. 06.06., и 19.06.06 и два на июль – 02.07.06. и 11. 07.06. Эти данные нанесены на карту-схему, приведенную на рисунке 1.

Результаты совместного анализа радиолокационных и ИК изображений морской поверхности

Проанализируем, какие специфические условия способствовали активизации волновых процессов, и рассмотрим возможные факторы, приводящие к генерации и к поверхностным проявлениям детектированных на РЛИ пакетов внутренних волн. Наибольший интерес представляет вторая декада июня, в течение которой поверхностные проявления внутренних волн трижды идентифицировались на *ASAR*-изображениях морской поверхности.

В первую очередь была проверена гипотеза о сгонно-нагонных процессах и релаксации апвеллинга как возможных источниках генерации наблюдённых внутренних волн. К рассмотрению были привлечены карты температуры морской поверхности (ТМП), построенные на основе данных ИК-радиометров AVHRR ИСЗ серии NOAA (рис. 2), карты полей приповерхностного ветра, построенные по данным скатерометра SeaWind ИСЗ QuikSCAT (рис. 3), и данные наземных наблюдений метеорологических станций (рис. 4). Отсутствие сгонных-нагонных ветров необходимой силы и резких горизонтальных градиентов в поле ТМП в областях, прилегающих к свалу глубин шельфа, а также отсутствие резких колебаний температуры, измеренной *in situ*, свидетельствуют о том, что развитые сгоны и нагоны в этот период не наблюдались, а усиление активности внутренних волн происходила под влиянием иных факторов.



Рис. 2. Карты температуры морской поверхности, построенные на основе данных ИК-радиометров AVHRR ИСЗ серии NOAA за период 12 – 19 июня 2006



Рис. 3. Распределение средних значений (за 3 суток) скорости приводного ветра, построенное на основе стандартных алгоритмов NASA по данным скатерометра SeaWind ИСЗ QuikSCAT



Рис. 4. Скорость ветра по данным измерений на метеостанциях Туапсе, Новороссийск и Анапа за второю декаду июня 2006 г.

Проанализируем ASAR Envisat изображение (рис. 5б), полученное 13 июня 2006 года в 7:40 UTC с разрешением 12,5 м, совместно с картой ТМП, восстановленной по данным NOAA AVHRR, полученным с интервалом 17 минут после проведения радиолокационной съемки (рис. 5а). Темные линии, отчетливо выделяющиеся в нижней части РЛИ, соответствуют внешней границе циклонического вихря, выявляющегося на карте ТПО. На РЛИ эта внешняя граница вихревой структуры «прорисована» сликами пленок биогенного происхождения, сконцентрированным в зонах конвергенции [10, 11]. Эти линии совпадают с линиями максимальных контрастов на карте ТПО. Насколько ниже на РЛИ детектируется пакет внутренних волн, распространяющихся в восточном направлении (рис. 5в). Этот пакет содержит более 20 волн, длина волны в среднем составляет 140 метров. Картина поверхностных проявлений внутренних волн подобна той, что наблюдается в приливных морях.



Рис. 5. а) Поле поверхностной температуры, восстановленное из данных AVHRR NOAA от 13.06.06 в 07:57 UTC; б) ASAR Envisat изображение, полученное 13 июня 2006 года в 7:40 UTC с разрешением 12,5 м; в) радиолокационные образы поверхностных проявлений пакета внутренних волн

На ASAR Envisat изображении, полученном 16 июня 2006 года в 19:05 UTC, был детектирован пакет внутренних волн, содержащий 5 волн с сильно искривленными фронтами. На момент проведения съемки пакет находился в устье Цемесской бухты и распространялся в восточном направлении. На карте ТМП, восстановленной по спутниковым данным, полученным несколько ранее в тот же день, отчетливо выделяется крупный вихревой диполь, граница которого расположена южнее устья Цемесской бухты в непосредственной близости от нее (рис. 6).



Рис. 6. а) Поле поверхностной температуры, восстановленное из данных AVHRR NOAA от 16.06.06 в 08:15 UTC; б) ASAR Envisat изображение, полученное 16 июня 2006 года в 19:05 UTC с разрешением 12,5 м; в) радиолокационные образы поверхностных проявлений пакета внутренних волн

19 июня 2006 года в северо-восточной части Черного моря наблюдалось развитие крупного вихревого диполя (рис. 7). На РЛИ этого вихревого диполя также обнаружены поверхностные проявления пакета внутренних волн. Он располагался вблизи границы антициклонической со-

ставляющей вихревого диполя. Пакет состоял из 6 волн, средняя длина которых составляла 175 м, и распространялся в западном направлении. Обнаруженный на РЛИ диполь хорошо проявляется и на карте ТМП, восстановленной по данным *NOAA AVHRR*, полученным на следующий день. Совместный анализ показывает, что пакет внутренних волн располагался на границе холодного вихря.



Рис. 7. а) Поле поверхностной температуры, восстановленное из данных AVHRR NOAA от 20.06.06 в 14:40 UTC; б) ASAR Envisat изображение, полученное 19 июня 2006 года в 19:10 UTC с разрешением 12,5 м; в) радиолокационные образы поверхностных проявлений пакета внутренних волн

11 июля того же года на ASAR Envisat изображении, полученном в 19:19 UTC, южнее Керченского пролива были обнаружены пересекающиеся пакеты внутренних волн, имеющие вид классических цугов солитонов (рис. 8). При сопоставлении радиолокационных данных с картами ТМП, восстановленными по данным NOAA AVHRR, полученным в близкое к проведению радиолокационных съемок время, оказалось, что поверхностные проявления внутренних волн располагались непосредственно на границе фронта, разделяющего холодные и теплые воды.



Рис. 8. а) Поле поверхностной температуры, восстановленное из данных AVHRR NOAA от 11.07.06 в 14:40 UTC; б) радиолокационные образы поверхностных проявлений пакета внутренних волн, выявленные на ASAR Envisat изображении, полученном в 19:19 UTC с разрешением 75 м

Таким образом, можно предположить, что во всех описанных выше случаях действовал фронтальный механизм генерации внутренних волн, когда волны излучаются нестационарным фронтом (движущимся и/или подверженным инерционным колебаниям), связанным с прохождением холодного вихря.

Связь поверхностных проявлений внутренних волн с рельефом термоклина

Существуют экспериментальные подтверждения тому, что горизонтально-неоднородное поле плотности вблизи фронтальных зон оказывает существенное влияние на генерацию и распространение короткопериодных внутренних волн. В качестве главного фактора, ответственного за особенности возникновения и распространения внутренних волн во фронтальных зонах бесприливных морей, указывается рельеф термоклина [12, 13]. Вихревые структуры и фронты, подобные рассмотренным выше, регулярно возникают в северо-восточной части Черного моря, однако поверхностные проявления связанных с ними внутренних волн наблюдаются достаточно редко. Как уже отмечалось, практически все случаи поверхностных наблюдений внутренних волн в данном районе зарегистрированы нами в 2006 году. Наиболее вероятное объяснение этого факта связано с положением слоя скачка плотности.

Обратимся к данным контактных измерений, проведенных в период 9-14 июня 2006 года во время 99 рейса научно-исследовательского судна «Акванавт». На рисунке 9 приведена карта глубин района интереса с отмеченными местоположениями станций и местами наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн. Из рисунка видно, что, поверхностные проявления пакетов внутренних волн 13.06.06 и 19.06.06 расположены над изобатой 2000 м. На рисунке 10 представлены профили температуры (а) и частоты плавучести (б), построенные по данным измерений со станции 2488, находившейся на той же изобате. Хорошо видно, что пик частоты плавучести очень острый и находится на глубине всего 5 метров.



Рис. 9. Карта глубин района интереса с отмеченными местоположениями станций контактных измерений НИС «Акванавт»



Рис. 10. Вертикальные разрезы а) температуры воды и б) частоты плавучести по данным измерений НИС «Акванавт»

Столь резкий и неглубокий пикноклин благоприятствует как зарождению внутренних солитонов, так и выраженному проявлению их на морской поверхности, поскольку способствует развитию сильных орбитальных течений в приповерхностном слое, что приводит к модуляции спектра ветрового волнения и проявлению внутренних волн в РЛИ морской поверхности.

Выводы

В ходе проведения спутникового мониторинга состояния и загрязнения вод прибрежной акватории российского сектора Азовского и Черного морей в 2006-2008 гг. были идентифицированы поверхностные проявления цугов внутренних волн на радиолокационных изображениях морской поверхности.

Результаты совместного анализа данных спутниковой радиолокации и ИК сенсоров, полученных в близкие моменты времени, свидетельствуют о том, что все зарегистрированные поверхностные проявления внутренних волн локализованы вблизи границы вихря или гидрологического фронта, что позволяет говорить о фронтальном механизме генерации внутренних волн.

Проведенный анализ показывает, что для бесприливных морей сочетание двух условий – резкого и мелкого пикноклина и присутствия движущегося и/или подверженного инерционным колебаниям фронта может являться источником внутренних волн, проявляющихся в радиолокационных изображениях морской поверхности.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: гранты № 06-05-65177-а, 07-05-00565-а, 08-05-00831-а. Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проекта Bear 2775.

Литература

1. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. «Горячие точки» в поле внутренних волн в океане // Акуст. журн., 2007, 53(3), с. 410-436.

2. Jackson C.R., Apel J.R. An atlas of internal solitary-like waves and their properties // Global Ocean Associates. 2002.

3. Gasparovic R.F., Etkin V.S. An overview of the Joint US/Russia Internal wave Remote Sensing Experiment // Proceedings of the 1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'94). 1994. P.741–743.

4. Горшков К. А., И. С. Долина, И. А. Соустова, Ю.И. Троицкая. Модуляция коротких ветровых волн в присутствии интенсивных внутренних волн. Эффект модуляции инкремента // Известия РАН, Физика атмосферы и океана. 2003. Т.39. №15. с. 661-672.

5. Кравцов Ю.А., А.В. Кузьмин, О.Ю. Лаврова, Л.М. Митник, М.И. Митягина, К.Д. Сабинин, Ю.Г. Трохимовский. Поляризационные особенности радиолокационных изображений следов внутренних волн на поверхности океана // Исследование Земли из космоса. 1997. №6. С.43-55.

6. Власенко В.И., Иванов В.А., Красин И.Г., Лисиченок А.Д. Генерация интенсивных короткопериодных внутренних волн в шельфовой зоне Крыма во время протекания прибрежного апвеллинга // Морской гидрофизический журнал. 1997. № 3. С. 3–16.

7. Иванов В.А., Серебряный А.Н. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливного моря // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана. 1985. Т.21. № 6. С. 648–656.

8. Бедрицкий А.И., В.В. Асмус, В.А. Кровотынцев, О.Ю. Лаврова, А.Г. Островский. Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей в 2003-2007 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. №11, стр. 5-13.

9. Кровотынцев В.А., О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, А.Г. Островский. Космический мониторинг состояния природной среды Азово-Черноморского бассейна. - В сборнике «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса» (под ред. Лаверова Н.П. и др.). Москва: Азбука-2000. 2007. Выпуск 4. Том 1. С.295-303.

10. Lavrova, O., M. Mityagina, T. Bocharova, and M. Gade. Multisensor observation of eddies and mesoscale features in coastal zones. Remote Sensing of the European Seas. Barale, Vittorio; Gade, Martin (Eds.). Springer. VIII, 514 p., ISBN: 978-1-4020-6771-6, pp. 463-474. 2008.

11. Лаврова О.Ю. Слики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне. – В сборнике «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Под ред. Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. Москва: GRANP Polygraph, 2005. Т. 2. С. 118-123.

12. Goryachkin, Y. N., V.A. Ivanov, A.D. Lisichenok. Short-period internal waves in the frontal zones of non-tidal seas (the Black Sea and the Aegean Sea) // Phys. Oceanogr, 1990. 1(6), 535-542.

13. Сабинин К.Д., Назаров А.А., Сериков А.Н. О связи цугов короткопериодных внутренних волн с рельефом термоклина в океане // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. № 4. С. 416–425.