Возможности спутникового дистанционного зондирования для изучения влияния атмосферных процессов на формирование течений в Керченском проливе

С.С. Щербак, О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина

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

Представлены результаты комплексного спутникового мониторинга акваторий Азовского и северовосточной части Черного морей, который проводился в апреле-октябре 2006 и 2007 гг. Одной из задач мониторинга являлось изучение влияния атмосферных процессов на формирование течений в Керченском проливе. Мониторинг основывался на анализе радиолокационных данных высокого разрешения, получаемых с помощью ASAR Envisat и SAR ERS-2, а также данных сенсоров MODIS Aqua/Terra и AVHRR NOAA в оптическом и инфракрасном диапазонах и сенсора MERIS Envisat в оптическом диапазоне. Восстановленные по спутниковым изображениям поля поверхностной температуры, концентрации хлорофилла *а* и яркости восходящего излучения позволили «разделить» воды Азовского и Черного морей в Керченском проливе и таким образом определить направление течения. Произведены оценки влияние скорости и направления ветра на формирование гидродинамических процессов в проливе. Для верификации оценок, полученных на основе спутниковых данных проведен подспутниковый эксперимент в районе косы Тузла, в ходе которого проводились измерения скорости течений.

В период проведения мониторинга неоднократно отмечались случаи возникновения интенсивных внутренних волн в атмосфере в северной части пролива. Оценены их характеристики и высказаны предположения о причинах их возникновения.

Введение

Керченский пролив соединяет Черное и Азовское моря. Его ширина варьирует в пределах от 4,5 до 15 км, наибольшая глубина составляет 18 метров. Керченскому проливу принадлежит существенная роль в формировании гидролого-гидрохимического режима Азово-Черноморского бассейна; он является важной судоходной магистралью и промысловым районом. Дополнительным антропогенным фактором, требующим специального рассмотрения, стало сооружение в октябре 2003 г. дамбы между о. Тузла и Таманским полуостровом, протяженность которой соизмерима с размерами трех узкостей, через которые осуществляется водообмен между Черным и Азовским морями. Все эти обстоятельства свидетельствуют о необходимости тщательного исследования гидродинамических процессов, протекающих в данном районе.

За длительный период изучения Керченского пролива были качественно определены основные черты гидрологии и динамики его вод, сделаны выводы об особенностях гидрологического режима, структуры потоков в проливе и выявлены факторы, определяющие перенос вод. Подробно история вопроса и современное состояние исследования динамики вод в Керченском проливе освещены в обзоре [1]. Как показали многочисленные натурные измерения, проведенные в 60-80-е гг. прошлого столетия с помощью радиоизмерителей течений и станций измерений уровня, режим уровня вод в Керченском проливе складывается под воздействием двух основных причин: колебания уровней Черного и Азовского морей и непосредственного влияния ветра с учетом особенностей морфометрии района. Основная же роль в формировании поля течений, как принято считать, принадлежит ветру, господствующему над акваторией всего бассейна и над проливом, а также разности уровней на концах пролива. Как было отмечено в [1], многообразие типов течений в Керченском проливе условно может быть сведено к трем основным (по направлению переноса вод): азовские, черноморские и переменные по направлению обычно слабые. Иногда могут наблюдаться одновременно двухсторонние течения, которые бывают зачастую резко выраженными и могут иметь значительную скорость.

Основной задачей данной работы являлось определение возможностей спутникового мониторинга течений в Керченском проливе на основе различных данных дистанционного

зондирования морской поверхности (радиолокационные, скаттерометрические, спектрорадиометрические оптического и инфракрасного диапазонов).

Система мониторинга

Мониторинг Керченского пролива и прилегающих к нему акваторий Черного и Азовского морей проводился ежедневно с апреля по октябрь в 2006 и в 2007 гг. Его основу составили данные спутникового зондирования, получаемые со следующих сенсоров:

• радиолокаторы с синтезированной апертурой ASAR ИСЗ *Envisat*, SAR ИСЗ *ERS-2;* пространственное разрешение 12,5 или 75 м;

• ИК-радиометры AVHRR ИСЗ серии *NOAA*; спектральный канал 10,3-11,3 мкм; разрешение на местности около 1 км;

• сканирующие спектрорадиометры MODIS ИСЗ *Terra/Aqua*; спектральные каналы: 0,622-0,672 мкм, 0,546-0,556 мкм и 0,438-0, 448 мкм; разрешение на местности 250 м;

• спектрометр MERIS ИСЗ *Envisat*; спектральные каналы: 0,66-0,67 мкм, 0,555-0,565 мкм и 0,485-0, 495 мкм; разрешение на местности 260 м;

- альтиметры-высотомеры ИСЗ Jason и Envisat;
- СВЧ-скаттерометр ИСЗ *QuikSCAT*.

Для определения скорости и направления ветра использовались данные наземных метеорологических станций в гг. Керчь и Анапа, а также карты фактической погоды CliWare (ВНИИГМИ-МЦД, <u>http://cliware.meteo.ru</u>).

Воды Азовского моря значительно продуктивнее черноморских вод, поэтому они достаточно резко различаются по своим оптическим свойствам. Кроме того, температура воды в Азовском море зимой на несколько градусов ниже, а летом – выше, чем в прилегающих к проливу районах Черного моря. Все это позволяет отслеживать направление основных потоков в проливе по восстановленным из спутниковых данных полям температуры поверхности моря (ТПМ), концентрации хлорофилла *а* и нормализованной яркости восходящего излучения (сенсоры MODIS и AVHRR), а также по многозональным изображениям в естественных цветах (сенсоры MODIS и MERIS).

Особенности водообмена в Керченском проливе, выявленные по спутниковым данным

Прежде всего, рассмотрим проявление на оптических и инфракрасных спутниковых изображениях двух основных видов переноса вод через Керченский пролив: из Азовского моря в Черное море и из Черного в Азовское.

На рис. 1 представлены поля следующих величин: а) температуры морской поверхности (SST), б) концентрации хлорофилла *a* и в) нормализованной яркости восходящего излучения для 551 нм (WLR), восстановленные из данных сенсора MODIS ИСЗ *Aqua* от 14 февраля 2007 г. Хорошо видно, как струя холодных вод с повышенной концентрацией хлорофилла *a* из Азовского моря распространяется вдоль крымского побережья Керченского пролива и под влиянием Основного черноморского течения (OЧT) поворачивает на запад. На карте WLR эта струя выделяется как поток с пониженным излучением. Это связано с тем, что на момент получения спутниковых данных черноморские воды отличались пониженной прозрачностью по сравнению с азовскими, хотя такая ситуация является достаточно редкой. Генеральное направление переноса вод может быть определено как азовоморское, т.е. с севера на юг. В то же самое время анализ наземных метеорологических данных за рассматриваемый период показывает, что в районе Керченского пролива преобладал устойчивый южный и юго-восточный ветер со средней скоростью 7–9 м/с (рис. 1г). Это означает, что ветер в данном случае не мог являться определяющим фактором формирования структуры течений.



В пользу того, что направление течения в Керченском проливе определяется не только непосредственным воздействием ветра, свидетельствуют также и наблюдения *in situ*. Во время проведения подспутниковых измерений в конце августа – начале сентября 2007 г. в проливе – с западной оконечности косы Тузла – отмечались устойчивые черноморские течения со скоростью до 1,6–2 м/с, в то время как господствующим являлся северо-северо-восточный ветер, скорость которого достигала 9 м/с.

Таким образом, основываясь на данных спутникового дистанционного зондирования и натурных измерений, можно сделать вывод об отсутствии прямой зависимости направления течения в проливе от «мгновенного» локального ветра (если это не штормовой ветер). Основное влияние оказывает формирование сгонно-нагонных колебаний уровня, которые, в свою очередь,

накладываются на фоновые, низкочастотные колебания, связанные с внутригодовой изменчивостью водного баланса (главным образом из-за речного стока).

Если разница уровня моря на концах пролива относительно невелика, влияние ветра на формирование течений становится решающим. В качестве примера на рис. 2а приведен фрагмент цветосинтезированного изображения MODIS *Aqua*, полученного 19 июля 2007 г., на котором отчетливо проявляется поступление из Керченского пролива в Черное море более мутных вод. Как следует из осредненных данных скаттерометра QuikSCAT, в это время господствовали ветра северных румбов (рис. 2б).



Рис. 2. Азовский тип течения при северном ветре. а) многозональное изображение MODIS Aqua 19.07.2007 10:12 UTC; б) осредненная скорость ветра за 17-19.07.2007 по данным скаттерометра QuikSCAT

Довольно специфическая ситуация возникает при идентификации на спутниковых изображениях, синтезированных в естественных цветах, черноморских течений. В большинстве случаев черноморские воды являются более прозрачными и, затекая в менее прозрачную среду азовских вод, могли бы быть отслежены благодаря цветовым контрастам. Однако в этом случае на изображениях, как правило, наблюдается, образно говоря, «язык» черноморских вод, который не заходит далее острова Тузла (рис. 3), и за все время наблюдений ни на одном проанализированном изображении не удалось проследить вынос черноморских вод в Азовское море. По всей видимости, это вызвано усилением течения в узкости о. Тузла – коса Тузла, в результате которого происходит размыв грунта, мутность вод повышается [2], и отделить воды черноморского и азовоморского происхождения становится невозможно.

В этих условиях хороший результат дает применение данных по температуре поверхности моря (ТПМ). На рис. 4a, представляющем распределение ТПМ (данные AVHRR *NOAA-12* от 5.10.2006 02:46 UTC), можно проследить заток в пролив теплой струи черноморских вод. По данным скаттерометра QuikSCAT, в рассматриваемый период преобладал южный ветер (рис. 46).

Выше были рассмотрены ситуации, когда в силу градиентного или дрейфового эффекта имеется достаточно устойчивый поток вод в одном либо в другом направлении. Еще более интересным аспектом является возникновение в проливе двух встречных потоков. На рис. 5 приведены изображения в естественных цветах, отражающие достаточно типичную для Керченского пролива ситуацию: несколько южнее косы Тузла возникает резкий фронт между мутными водами пролива и прозрачными черноморскими водами; азовоморский поток концентрируется у крымского берега и перемещается вдоль него довольно узкой струей. Наши исследования показали, что такая ситуация возникает в конце длительного периода устойчивых северо-восточных ветров (в районе г. Новороссийска при этом, как правило, возникает бора).



Рис. 3. Заток более прозрачных черноморских вод в Керченский пролив. Многозональное изображение MODIS Aqua 01.05.2006 07:56 UTC



Рис. 4. Заток черноморских вод в Керченский пролив, выявленный по температурным контрастам: a) температура поверхности моря AVHRR NOAA-12 5.10.2006 02:46 UTC; б) осредненная скорость ветра за 04-06.10.2006 по данным скаттерометра QuikSCAT

Можно предположить, что в этом случае в Азовском море под действием ветра воды начинают перемещаться на юг – в Керченский пролив, а в Черном море в результате экмановской накачки происходит усилиение ОЧТ, повышение уровня моря в предпроливье и подпруживание потока, направленного из Азовского моря.



a)

Рис. 5. Пример двусторонних течений в Керченском проливе. Мутные азовские воды распространяются вдоль крымского побережья, более прозрачные черноморские воды заполняют юго-восточную часть пролива. a) многозональное изображение MODIS Aqua 12.07.2007 10:05 UTC; б) многозональное изображение MERIS Envisat 14.10.2006 08:14 UTC

Применение спутниковых радиолокационных данных для изучения процессов в Керченском проливе

Как правило, восстановление направления течений на основе радиолокационных изображений может осуществляться только по косвенных признакам: по следам за кораблями, мысами, островами; вихревым дорожкам; по структуре сликов, вытянутых вдоль течений и пр. [3]. В Керченском проливе задача усложняется еще и частой повторяемостью сильных ветров, которые маскируют вышеперечисленные процессы. В связи с этим, наиболее интересные явления проявляются, как правило, не в самом проливе, а в прилегающих акваториях. В частности, во проведения мониторинга неоднократно наблюдались поверхностные проявления время внутренних волн в атмосфере.

Как известно, использование данных спутниковой радиолокации позволяет получать информацию о процессах и явлениях, проистекающих в приводном слое атмосферы, которые, оказывают влияние на формирование поля ветрового волнения и структуры вод в проливах [4]. Большой интерес представляют, в частности, внутренние гравитационные волны в атмосфере, поверхностные проявления которых мы неоднократно выявляли на радиолокационных изображениях района интереса. Следует отметить, что наблюдаемые вблизи поверхности возмущения, причиной которых являются внутренние гравитационные волны в атмосфере, могут рассматриваться как индикаторы протекающих в тропосфере процессов, могут сами играть роль в развитии мезомасштабных атмосферных аномалий, а также могут влиять на крупномасштабную циркуляцию атмосферы и на мелкомасштабные конвективные процессы.

На рис. 6 приведен фрагмент радиолокационного изображения, полученного при помощи ASAR ИСЗ Envisat 10.04.2006 г. в 19:11 UTC над северной частью Керченского пролива и Азовским предпроливьем.

Наибольший интерес представляют узкие упорядоченные полосы альтернативного усиления и ослабления обратно рассеянного сигнала, ориентированные вдоль береговой черты и сосредоточенные в полосе шириной около 8 км. Подобные структуры в радиолокационных поверхностными изображениях, как правило. являются проявлениями внутренних гравитационных волн, распространяющихся в приводном слое атмосферы. На рис. 7 приведены вариации обратного радиолокационного рассеяния вдоль линии разреза А-В, направленной по нормали к ведущей границе фронта распространения волн. Волновой пакет, наблюдаемый на радиолокационном изображении, содержит 7 волн, длины которых в плоскости наблюдения изменяются в пределах от 300 до 800 м. Длина гребней (в области радиолокационного изображения) составляет около 53 км.



Рис. 6. Поверхностные проявления внутренних волн в атмосфере. Радиолокационное изображение морской поверхности, полученное со спутника Envisat 10.04.2006 в 19:11 UTC



Рис. 7. Вариации обратно рассеянного сигнала по линии разреза A - B

Наблюдаемая картина была интерпретирована нами в рамках представлений об атмосферных внутренних волнах, которые часто наблюдаются над морской поверхностью вблизи береговой черты и формально являются аналогом орографических внутренних волн, возбуждаемых обтеканием потоком препятствия, например, горного хребта [5, 6] или изолированного острова [7]. Однако в данном случае причиной возникновения внутренних волн является не орография местности, а разность температур суши и морской поверхности и режим атмосферной циркуляции над побережьем. Как правило, волны этого типа параллельны береговой черте и распространяются в форме волновых пакетов, движущихся в направлении от берега к мористой части вплоть до расстояния 20-40 км. Картина волновых движений, восстановленных из радиолокационных данных, хорошо согласуется с приведенными в работе [8] расчетами, сделанными на основе трехслойной модели атмосферы и описывающими механизм возбуждения атмосферных гравитационных волн за счет возмущений вертикальной компоненты скорости ветра вблизи фронтальной зоны берегового бриза.

По данным гидрометеорологических наблюдений наземной станции наблюдения, расположенной в г. Керчь, приповерхностный ветер имел скорость 1,5-2 м/с, а температура воздуха над сушей составляла 9°С и была на 6 градусов ниже, чем температура морской поверхности. Таким образом, на момент проведения радиолокационной съемки гидрометеорологические условия соответствовали развитию берегового бриза [9]. На рис. 8 схематически представлена структура развития материкового ночного бриза с областями сильных восходящих движений над сушей и нисходящих над морем. На разделяющем их фронте велики градиенты температуры и давления.



Рис. 8. Схема развития ночного бриза

Заключение

Комплексный спутниковый мониторинг района Керченского пролива, основывающийся на спутниковых изображениях в оптическом, ИК и микроволновом диапазонах (AVHRR *NOAA*, MODIS *Aqua/Terra*, MERIS *Envisat*, ASAR *Envisat* и SAR *ERS-2*), показал, что наилучший результат при наблюдении за течениями в Керченском проливе достигается при использовании синтезированных в естественных цветах изображений MERIS Envisat и MODIS Aqua, а также карт поверхностной температуры и распределения хлорофилла *a*, восстановленных из данных AVHRR *NOAA* и MODIS *Aqua/Terra*.

На основе анализа этих изображений было установлено, что атмосферной циркуляции принадлежит важная, но не всегда решающая роль при формировании структуры течений в проливе. В частности, было показано, что одному и тому же направлению ветра над акваторией могут соответствовать противоположные по направлению течения. Главенствующая же роль принадлежит сгонно-нагонным процессам, так же находящимся под воздействием длительных, устойчивых ветров.

В работе также показано, что радиолокационные данные, которые хоть и не несут непосредственную информацию о характере течений, могут обеспечивать дополнительные сведения о гидрологических и гидрометеорологических явлениях в проливе и сопряженных акваториях.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 06-05-65177-а, № 07-05-00565-а, № 07-05-10089-к), а также международного проекта Black Sea Scientific Network (Contract # 022868). Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством (ЕКА) в рамках проекта Bear 2775.

Литература

1. Альтман Э.Н. Динамика вод Керченского пролива // Гидрометеорология и гидрология морей СССР. Проект "Моря СССР". Т. 4. Черное море. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 291–328.

2. Ломакин П.Д., Боровская Р.В. Характеристика современного состояния системы течений в Керченском проливе на базе спутниковых и контактных наблюдений // Исследование Земли из космоса, 2006. № 6. С. 65-71.

3. *Lavrova O.Yu., Badulin S.I.* Possibility of current parameter retrieval from radar data // Remote Sensing of the Ocean and Sea Ice, 2003. Charles R. Bostater, Jr., Rosalia Santoleri Eds., v.5233, p.134-141, 2004.

4. Булатов М.Г., Ю.А. Кравцов, О.Ю. Лаврова, К.Ц. Литовченко, М.И. Митягина, М.Д. Раев, К.Д. Сабинин, Ю.Г. Трохимовский, А.Н. Чурюмов, И.В. Шуган, Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи физических наук, 2003. 173 (1). С. 69-87.

5. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Т. 2. Л.:, Гидрометеоиздат, 1978. 319 с.

6. Госсард Дж., Хук У. Волны в атмосфере // М.: Мир, 1979.

7. Vachon, P. W., O. M. Johannessen, and J. A. Johannessen, An ERS-1 synthetic aperture radar image of atmospheric lee waves, J. Geophys. Res., 99, 22, 483–22, 490, 199.

8. Simpson, J. E., Sea Breeze and Local Winds, 234 pp., Cambridge Univ. Press, New York, 1994.

9. Zheng, Q., X.-H. Yan, V. Klemas, C.-R. Ho, N.-J. Kuo, and Z. Wang, Coastal lee waves on ERS-1 SAR images, J. Geophys. Res., 103, 7979–7993, 1998.