

Особенности циркуляции в северо-западной части Индийского океана по данным наблюдений из космоса

В.Е. Скляр

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997 Москва, Нахимовский пр., 36
E-mail: vsklyarov@km.ru*

Приводятся результаты мультиспектрального анализа спутниковой информации об океане в видимой и инфракрасной области электромагнитного спектра. Для северо-западной части индийского океана в 2003 - 2006 гг. был проведен анализ результатов измерений со спектрорадиометра "MODIS", установленного на ИСЗ "TERRA" и "AQUA". Результаты проведенного анализа показали, что при определенных условиях состояния океана и атмосферы происходит детализация структуры морских течений, наиболее ярко проявляющаяся в 10, 11 и 12 каналах прибора "MODIS", то есть центрированных на длинах волн 490, 531 и 551 нм. И, что наиболее важно, эта детализация более выражена в видимой области спектра, чем в 31 инфракрасном канале, центрированном на 11 мкм. Все рассмотренные примеры относятся к случаям наличия больших концентраций взвеси органического происхождения в морской воде. Терригенные частички хорошо рассеивают солнечную радиацию. С другой стороны, эти частички, являясь пассивной примесью, легко вовлекаются отдельными струями течений в локальную циркуляцию. Эти факторы создают реальную основу для наблюдений из космоса за деталями мезомасштабной циркуляции в океане. В ходе анализа данных космических съемок и результатов расчетов течений моделью NLOM, было отмечено, что в зимний период характер циркуляции в Аденском заливе не является стабильным. В отдельных случаях, поток, направленный в Аденский залив, ослабевает или даже меняется на противоположный по направлению. В заключение отмечается, что в период зимнего муссона часто наблюдается поток, направленный в Аденский залив, что приводит к значительной интенсификации вихревых образований в самом заливе.

Введение

Возможность наблюдения за детальной структурой океанских течений представляется весьма важной для решения ряда актуальных задач океанологии. Наиболее существенным представляется изучение трансфронтального обмена в районах интенсивных пограничных течений и их отдельных ветвей. Современные приборные средства на космических аппаратах являются незаменимыми для проведения таких наблюдений. В частности, прибор "MODIS" на спутниках "TERRA" и "AQUA" служит вполне адекватным инструментом для наблюдений за детальными особенностями циркуляции вод в приповерхностном слое океана.

В настоящее время, можно выделить три основных фактора, способствующих эффекту детализации морских течений при наблюдениях в видимой области спектра:

- взаимодействие мутных речных вод (с большим количеством взвеси) с чистыми и более прозрачными морскими водами вблизи дельт крупных рек;
- «цветение» фитопланктона и вовлечение продуктов его распада в локальную мезомасштабную циркуляцию;
- явление пылевых бурь, способствующее насыщению приповерхностного слоя терригенными частицами.

В 2003-2006 гг. автором настоящей работы был проведен анализ ряда изображений в отдельных каналах спектрорадиометра "MODIS". Анализу были подвергнуты изображения водной поверхности южной части Балтийского моря и районов прибрежного апвеллинга в Атлантическом и Индийском океанах. Результаты проведенного анализа показали [1], что при определенных условиях состояния океана и атмосферы происходит детализация структуры морских течений, наиболее ярко проявляющаяся в каналах 490, 531 и 551 нм. И, что наиболее интересно, эта детализация более выражена в видимой области спектра, чем в инфракрасном канале, центрированном на 11

мкм. Все рассматриваемые примеры относились к случаям наличия больших концентраций взвеси (органического и неорганического происхождения) в морской воде.

Пылевые бури

Наиболее интересным и малоизученным представляется воздействие последствий пылевых бурь на рассеяние солнечного света в океане.

Пылевые бури представляют собой глобальное явление, происходящее регулярно и, при этом, атмосферными потоками переносится значительное количество песка и пыли (более 2000 млн. по данным [2]) из пустынь Гоби, Сахары, Намибии, Аравийского п-ова и др. Пыль из Сахары за 5-7 дней достигает Карибского моря и юго-восточных районов США (USGS Open File Rreport 03-028, http://castel.er.usgs.gov/african_dust/), а следы азиатской пылевой бури, пересекшей Тихий океан, обнаруживались даже у Великих озер (PLANKTOS Ocean Science 2005, <http://www.planktos.com/>).

Для наших целей представляется особенно значимым воздействие выпадающих из атмосферы песка и пыли на оптические свойства верхнего слоя океана. Отметим, что этот вопрос слабо освещен в научной литературе. По нашим данным, имеются лишь отдельные свидетельства (например, [3]) о том, что обратное рассеяние в зеленой области спектра в верхнем слое океана значительно увеличивается после прохождения пылевой бури. Это происходит за счет насыщения верхнего слоя терригенными частичками взвеси, которые хорошо рассеивают солнечный свет. С другой стороны, эти частички, являясь пассивной примесью, легко вовлекаются отдельными струями течений в локальную циркуляцию. Эти факторы создают реальную основу для наблюдений из космоса за деталями мезо-масштабной циркуляции.

Еще одной интересной особенностью воздействия пылевой бури на верхний слой океана является стимуляция интенсивного развития фитопланктона в олиготрофных районах мирового океана. Это явление получило название оплодотворение (fertilization) океана пылью из пустынь [4]. В облаках пылевых бурь содержится значительное количество железа и др. микроэлементов, которые, выпадая в океан, приводят к интенсивному развитию фитопланктона, являясь для него питательной средой.

Фитопланктон, как пассивная примесь, вовлекается в циркуляцию и подчеркивает ее особенности в отдельных диапазонах видимой области спектра. Отметим, что максимум поглощения хлорофилла находится вблизи 440 нм. Интересным для нас оказались измерения на океанской станции RAPA, выполненные в 2001г, после прохождения азиатской пылевой бури (Asian dust storm causes plankton to bloom in the robotic carbon explorers test the "Iron hypothesis", <http://www-ocean.ibl.gov/>). Оказалось, что две недели спустя прохождения бури, концентрация органического углерода практически удвоилась.

Результаты исследований

В качестве пробного эксперимента автор настоящей работы провел анализ спектральных данных прибора "MODIS" (спутник "AQUA"), полученных над северо-западной частью Индийского океана и Аденским заливом. Особенности атмосферной циркуляции в этом районе таковы, что при северо-восточных ветрах в эту часть океана поступает значительное количество песка и пыли с Аравийского п-ова. При этом Аденский залив находится в зоне муссонной циркуляции, характерной для всей северо-западной части Индийского океана. Здесь в период летнего муссона (май-сентябрь) к северу от экватора преобладают юго-западные ветры. С декабря по февраль устанавливается зимний тип муссона, для которого и характерен ветер северо-восточного направления. Характеристики атмосферной циркуляции имеют тесную связь с характеристиками течений в приповерхностном слое океана.

Очевидно, что определяющим фактором внутригодовой изменчивости циркуляции в этом районе океана является изменение направления Сомалийского течения. В период юго-западного

муссона (приблизительно, с июля до сентября) у побережья Сомали существует интенсивное западное пограничное течение со скоростями до 200-300 см/сек. После установления в ноябре зимней фазы муссона происходит релаксация течения, а на его месте возникает поток с южными компонентами скорости под влиянием северо-восточного ветра [5]. Есть основание предполагать, что этот поток имеет ответвление на северо-запад с направленностью в узкость между островом Сокотра и п-вом Сомали и далее в Аденский залив. В работе [6] содержатся сведения о течениях в приповерхностном слое, полученных по данным о сносе судов в Индийском океане. В [7] процитированы эти данные для декабря и приведены результаты моделирования течений для северной части Индийского океана. Поток в Аденский залив с юга отчетливо просматривается на основании этих данных. На рис. 1 представлен результат расчета векторов скоростей течений для горизонта 100 м [8]. Эти векторы получены в результате обработки измерителей скоростей потока на притопленных буйковых станциях, выполненных в рамках программы WOCE. Значения векторов соответствуют скоростям потока более чем 20 см/сек между о-вом Сокотра и м-сом Гвардафуй (северо-восточная оконечность полуострова Сомали). На рис. 1 приводятся (на вставке) также контуры течений в этом районе, построенные по данным о сносе судов [9].



Рис. 1. Положение векторов (стрелки на рисунке) скоростей течений для горизонта 100 м в период зимнего муссона по данным [8]. Значения векторов соответствуют скоростям потока более чем 20 см/сек между о-вом Сокотра и м-сом Гвардафуй (северо-восточная оконечность полуострова Сомали). На вставке (а) приводятся контуры течений в этом районе, построенные по данным о сносе судов [9]

Далее обратимся к непосредственным результатам наших исследований. С целью анализа особенностей циркуляции в Аденском заливе был проведен спектральный анализ спутниковых изображений в течение 2003-2006 гг. Кроме того, мы привлекли результаты расчетов скоростей течений на тоже время глобальной моделью для стратифицированного океана NLOM (Layered ocean models). Модель была создана в США в Лаборатории NRL (Naval Research Laboratory). Последние сведения и описание модели NLOM содержатся в работах [10, 11]. Необходимо отметить,

что успешная работа этой прогностической модели основана на системе сбора и ассимиляции океанографических данных MODAS, разработанной ранее [12].

На рис. 2 (верхняя часть рисунка) представлено изображение прибора “MODIS”, установленного на ИСЗ “AQUA”, для канала 490 нм на 17 декабря 2004г. В нижней части рисунка представ-

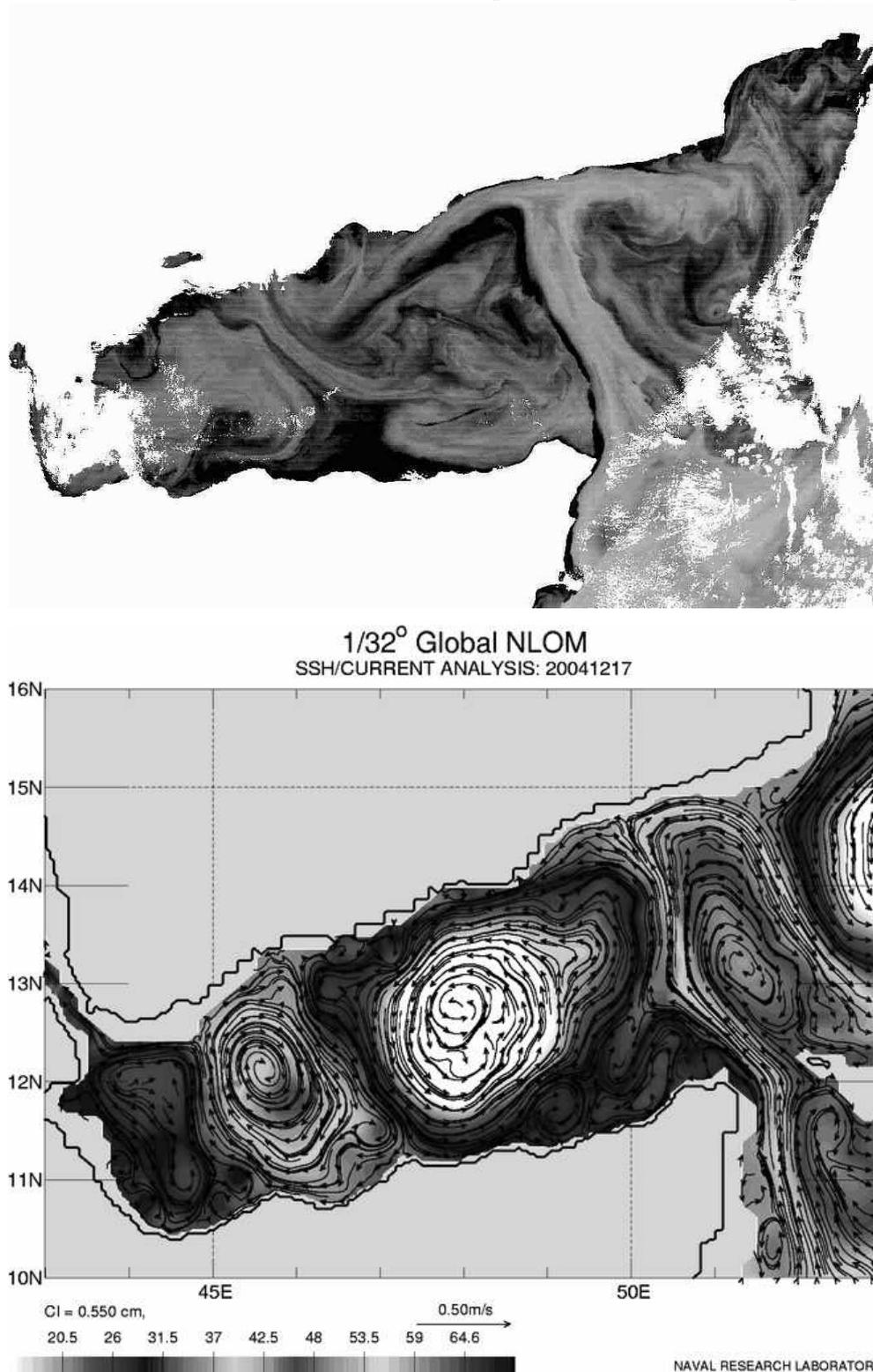


Рис. 2. На верхней части рисунка представлено изображение Аденского залива, полученное прибором “MODIS” в спектральном интервале 490 нм. - 17 декабря 2004г. В нижней части рисунка отображены результаты расчета скоростей течений на тот же день - данные модели NLOM (<http://www7320.nrlssc.navy.mil/altimetry/index.html>)

лены результаты расчета скоростей течений на тот же день - данные модели NLOM. Отчетливо видно, что часть потока из Индийского океана устремляется в Аденский залив через узкость между островом Сокотра и м-сом Гвардафуй. Далее, достигая берегов южного Йемена, течение расходится в разные стороны, образуя симметричный вихревой диполь в Аденском заливе. Скорость течения по результатам расчетов составила 35-40 см/сек. В правой, антициклонической части диполя скорости течения еще выше и составляли 45-50 см/сек. В левой, циклонической части скорости течения значительно ниже и составляли, порядка 10-20 см/сек. Отметим, что всего в Аденском заливе 17 декабря 2004г наблюдались 5 крупных вихревых образований, 3 циклонического и 2 антициклонического характера. Размер этих вихрей составлял 200-300 км в поперечнике, что близко к ширине залива с севера на юг. Количество более мелких вихрей было значительно больше, что также можно видеть на изображении "MODIS" в канале 490 нм.

В ходе анализа данных космических съемок и результатов расчетов течений моделью NLOM, было отмечено, что в зимний период характер циркуляции в Аденском заливе не является стабильным. В отдельных случаях, поток, направленный в Аденский залив, ослабевал или даже менялся на противоположный по направлению.

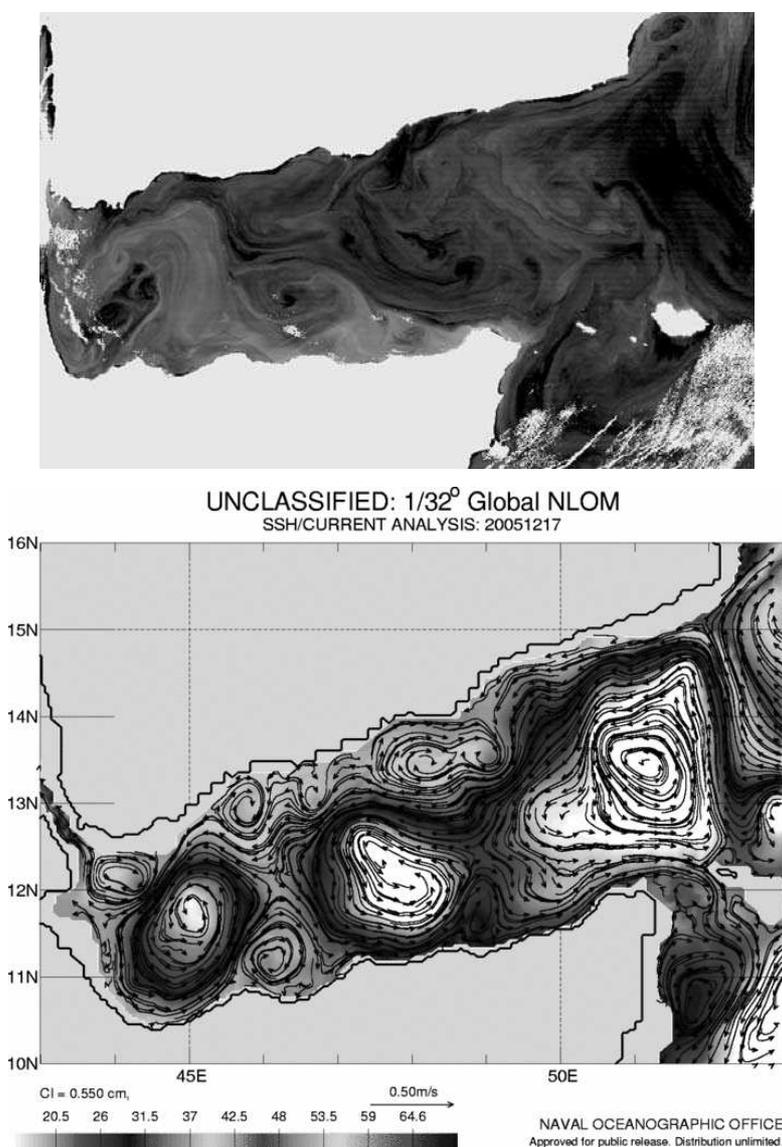


Рис. 3. На верхней части рисунка представлено изображение Аденского залива, полученное прибором "MODIS" в спектральном интервале 490 нм., год спустя - 17 декабря 2005г. В нижней части рисунка отображены результаты расчета скоростей течений на тот же день - данные модели NLOM (<http://www7320.nrlssc.navy.mil/altimetry/index.html>)

Так, рис. 3 иллюстрирует именно эту ситуацию. Приводимые данные соответствуют космической съемке, выполненной ровно год спустя-17 декабря 2005. Здесь мы видим поток в узкости между Аденским заливом и Индийским океаном, направленный на юг со скоростью порядка 20 см/сек. Однако очевидный характер повышенной вихревой активности в заливе сохраняется и в данном случае. Мы видим мощные вихревые образования (циклоны и антициклоны) соизмеримые с шириной залива. На спутниковом изображении мы также можем различить и более мелкие вихри. Скорости потоков в циклонах и антициклонах изменяются от 20 до 55 см/сек.

Почему нет стабильности в течение зимнего времени в потоке, направленном в залив? Почему вихревая активность в Аденском заливе столь высока? Эти и другие вопросы, конечно, требуют более глубокого анализа и дополнительных исследований. Также было бы желательно провести детальные гидрооптические измерения концентрации терригенной взвеси в верхнем слое в водах залива в различные периоды муссонной циркуляции.

Заключение

Рассмотренные примеры иллюстрируют дополнительные возможности исследования деталей океанской циркуляции при использовании спутниковых изображений “MODIS” в условиях присутствия взвеси терригенного происхождения в верхнем слое океана. Одна из очень интересных и недостаточно исследованных областей океана - Аденский залив. По нашему мнению, здесь верхний слой океана насыщен частицами песка от расположенных рядом пустынь. Это способствует возможности наблюдениям за детальной структурой течений и вихревых образований из космоса в зеленой области спектра, используя взвесь как трассер океанской циркуляции [1]. В течение зимнего муссона наблюдается интенсивный поток, направленный в Аденском залив из Индийского океана. Вероятно, этот фактор приводит к существенной интенсификации вихревой активности в самом заливе. Последнее может в значительной степени влиять на процессы образования аравийской подповерхностной водной массы повышенной солености [5]. Можно также предположить, что замеченные особенности циркуляции связаны с формированием и распространением крупномасштабного антициклонического вихря в юго-восточной части Аравийского моря в течение зимнего муссона [13]. Есть данные, что это возмущение распространяется дальше от берега как волна Россби [14].

Автор надеется, что поднятые вопросы привлекут внимание к использованию естественных трассеров при наблюдениях из космоса за особенностями циркуляции в Мировом океане.

Литература

1. *Sklyarov V.E.* Research of features of the ocean circulation by MODIS. // Proc. SPIE, vol. 6522, doi: 10.1117/12.723099, 652212 (Nov. 1, 2006).
2. *Perkins.S.* Dust, the Thermostat. // Science News Online, sept.29 2001, vol.160, no 13, p.200
3. *Claustre H. et al.* Is desert dust making oligotrophic waters greener? // Geophysical research letters, 2002, vol.29, No 10, 10.1029/2001cl014056.
4. *Meskhidze et al.* Dust and pollution: a recipe for enhanced ocean fertilization? //Journal of Geophysical research? Vol.110, D03301, doi: 10.1029/2004jd005082, 2005.
5. *Нейман В.Г., Бурков В.А., Щербинин А.Д.* Динамика вод Индийского океана. //М.: Научный мир, 1997, 232с.
6. *Mariano, A.J., Rian, H., Perkins, B.D., Smithers, S.* The Mariano Global Surface Velocity Analysis 1.0. // USCG Report, CG-D-34-95, p.55 [available from RSMAS, University of Miami, 4600 Rickenbacker Cswy, FL 33149].
7. *Prasad, T.G., Ikeda M., McLean, Julie L.* Structure and mechanisms of the Arabian Sea variability during the winter monsoon. // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2005, Volume 52, Issue 7, p. 1155-1177.

8. *Schott, F., McCreary, J.P.* The monsoon circulation of the Indian Ocean. // *Progress in Oceanography*, 2001, 51, p. 1–123.
9. *Byshev, V.I., Neiman, V.G., Serykh, I.V., Shcherbinin, A.D.* New data on the sea current system in the Somali region, Indian ocean. // *Doklady Akademii Nauk*, 2006, vol. 408, no. 2, p. 250–255.
10. *Smedstad Ole M. et al.* An operational Eddy resolving 1/16° global ocean nowcast/forecast system // *Journal of Marine Systems* 2003, 40–41, pp. 341–361.
11. *Shriver J.F. et al.* 1/32° real-time global ocean prediction and value-added over 1/16° resolution. // *Journal of Marine Systems*, 2007, 65, p. 3–26.
12. *Fox, D.N. et al.* The modular ocean data assimilation system (MODAS). // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19, p. 240–252.
13. *Bruce, I.G., et al.* Recent observations and modeling in the Arabian Sea Laccadive high region. // *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103, p. 7593–7600.
14. *Shankar, D., Shetye, S.R.* On the dynamics of the Lakshadweep high and low in the southeastern Arabian sea. // *Journal of geophysical research*, 1997, 102, P. 12551–12562.