

Формирование и распространение вихревого диполя за мысом Таран в Юго-Восточной Балтике

Е. В. Краюшкин¹, О. Ю. Лаврова¹, К. Р. Назирова¹,
Я. О. Алферьева², Д. М. Соловьев³

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

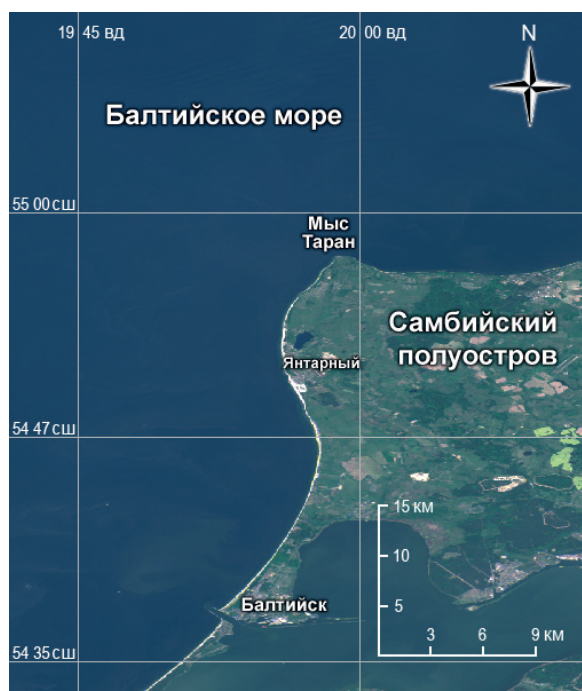
² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия*

³ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mails: box_evk@mail.ru, olavrova@iki.rssi.ru*

Представлены результаты спутниковых наблюдений формирования и распространения вихревого диполя за мысом Таран (юго-восточная часть Балтийского моря) в первой декаде августа 2018 г. Формирование данного диполя было вызвано резкой неоднородностью ветрового поля. Сильная взмученность вод в прибрежной зоне способствовала чёткому проявлению диполя на спутниковых изображениях видимого диапазона, в первую очередь — в поле общего содержания взвешенного вещества. На основе данных приборов OLCI Sentinel-3, MSI Sentinel-2 и MODIS Terra/Aqua прослежена динамика вихревого диполя в течение трёх дней 7–9 августа 2018 г. Синхронно со спутниковыми наблюдениями проводились измерения параметров течений в исследуемом районе с помощью акустического доплеровского профилографа течений (ADCP) и комплексом лагранжевых дрейфтеров. Граница взмученных вод определялась с помощью CTD-зонда, оснащённого датчиком мутности. Совместный анализ спутниковых данных и данных натурных измерений позволил оценить пространственные и динамические характеристики различных частей вихревого диполя. Было выявлено, что за трое суток вихревой диполь сильно трансформировался и переместился от мыса Таран до середины Куршской косы, пройдя расстояние около 63 км.

Ключевые слова: вихревой диполь, течения за мысами, поле общего содержания взмученного вещества, спутниковые наблюдения, OLCI Sentinel-3, MSI Sentinel-2, MODIS Terra/Aqua, лагранжевые дрейфтеры, Юго-Восточная Балтика

Одобрена к печати: 17.08.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221



Мыс Таран является северо-западной оконечностью Самбийского полуострова в юго-восточной части Балтийского моря (рис. 1). Береговая черта образует здесь практически прямой угол, что способствует формированию сложной системы течений в зависимости от различных гидрометеорологических условий, в первую очередь — от состояния поля ветра.

Физические объяснения вихреобразования в таких районах, основанные на результатах численного и лабораторного моделирования, описаны в работе (Zhurbas et al., 2006). Кратко это объяснение можно сформулировать следующим образом.

Рис. 1. Район спутниковых наблюдений и экспериментальных работ

При апвеллинговом ветре (влево вдоль береговой линии, если наблюдатель смотрит на море в северном полушарии) образуются циклоны — как за мысом, так и просто вдоль береговой линии; вдольбереговое течение имеет то же направление, что и ветер. И, соответственно, при даунвеллинговом ветре образуются антициклоны. На интуитивно-физическом уровне такое селективное образование циклонов (антициклонов) можно объяснить тем, что наличие береговой линии «механически» не позволяет вдольбереговому течению влево (вправо) образовать антициклонический (циклонический) меандр. У мыса Таран чаще образуются антициклоны, так как преобладают ветры с запада и юга, а при восточном ветре устанавливается течение, направленное на запад, что способствует отрыву вихрей циклонической направленности.

Образование вихрей за мысами или островами наблюдается повсеместно. Из-за сложной нелинейной природы процессов вихреобразования в реальных природных условиях количественное предсказание характеристик вихря, как и влияние на этот процесс параметров окружающей среды, является достаточно трудной гидрофизической задачей, которая решается в первую очередь на основе численного моделирования. Существует реальная потребность в систематическом тестировании результатов численной модели, что в последние годы осуществляется на основе регулярных спутниковых наблюдений и, к сожалению, достаточно редких натурных измерений.

Спутниковым наблюдениям вихревых процессов в районе мыса Таран посвящено несколько статей, среди которых хотелось бы отметить работы (Гинзбург и др., 2015; Гурова, 2012; Gurova, Chubarenko, 2012), в которых рассматриваются вихревые процессы в юго-восточной части Балтийского моря — как в Гданьском заливе, так и непосредственно за мысом Таран. Основное внимание уделяется «продолжительности жизни» выявленных на спутниковых изображениях вихревых структур. В данных работах отмечается, что вихревые структуры могут практически без изменений существовать более восьми дней.

Прибрежная зона Юго-Восточной Балтики является объектом и наших исследований (Голенко и др., 2017; Каримова и др., 2011; Лаврова и др., 2016; Lavrova et al., 2016); начиная с 2014 г. нами проводятся здесь регулярные подспутниковые измерения.

Во время очередных экспедиционных работ в начале августа 2018 г. нам удалось пронаблюдать на спутниковых изображениях видимого диапазона интересный, на наш взгляд, процесс формирования и распространения вихревого диполя, или грибовидного течения, и провести тщательные подспутниковые измерения его параметров.

После относительно спокойной ветровой и волновой ситуации, начиная с 5 августа 2018 г. в течение трёх дней дул сильный западный ветер, который резко сменил своё направление на юго-юго-восточный (рис. 2, см. с. 216), что способствовало формированию 7 августа вихревого диполя в районе мыса Таран.

Вихревой диполь нашёл своё отражение во всех спутниковых изображениях, полученных в этот день сенсорами OLCI Sentinel-3A в 09:39 UTC, MODIS Terra в 10:25 UTC и MODIS Aqua в 12:10 UTC. Наиболее чётко диполь проявился в поле общего содержания взвешенного вещества (Total Suspended Matter, TSM), что объясняется высоким содержанием взвеси различной природы в прибрежных водах после шторма (рис. 3а, см. с. 216). Породы северного побережья Самбийского п-ова подвергаются процессам интенсивного эрозионного выветривания. Тонко- и мелкообломочные продукты разрушения горных массивов в виде взвеси переносятся потоками морской воды на значительные расстояния и до момента осаждения и формирования терригенных осадочных пород могут быть использованы в качестве маркеров соответствующих течений. Резкий рост количества взвеси в воде может быть вызван работой одного из предприятий района, например АО «Калининградский янтарный комбинат» в посёлке Янтарном. Из открытых источников известно, что технология добычи янтаря на комбинате предусматривает периодические сбросы в Балтийское море производственных стоков. В соответствии с особенностями производства в хвостохранилище янтарного комбината собирается пресная и морская вода (примерное объёмное соотношение 1:3), содержащая обломочный материал пород. В хвостохранилище осуществляется осаждение взвешенных в воде частиц.

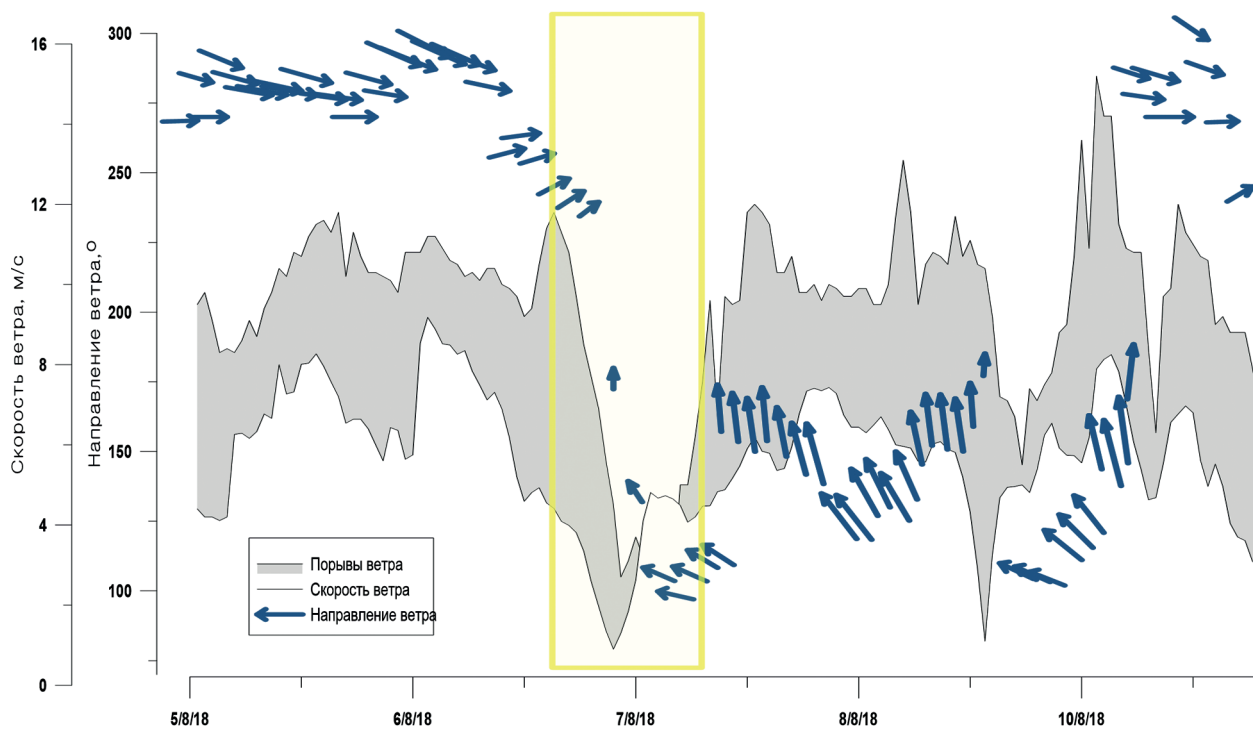


Рис. 2. Скорость и направление ветра в районе мыса Таран 05–10 августа 2018 г. (©www.meteoblue.com)

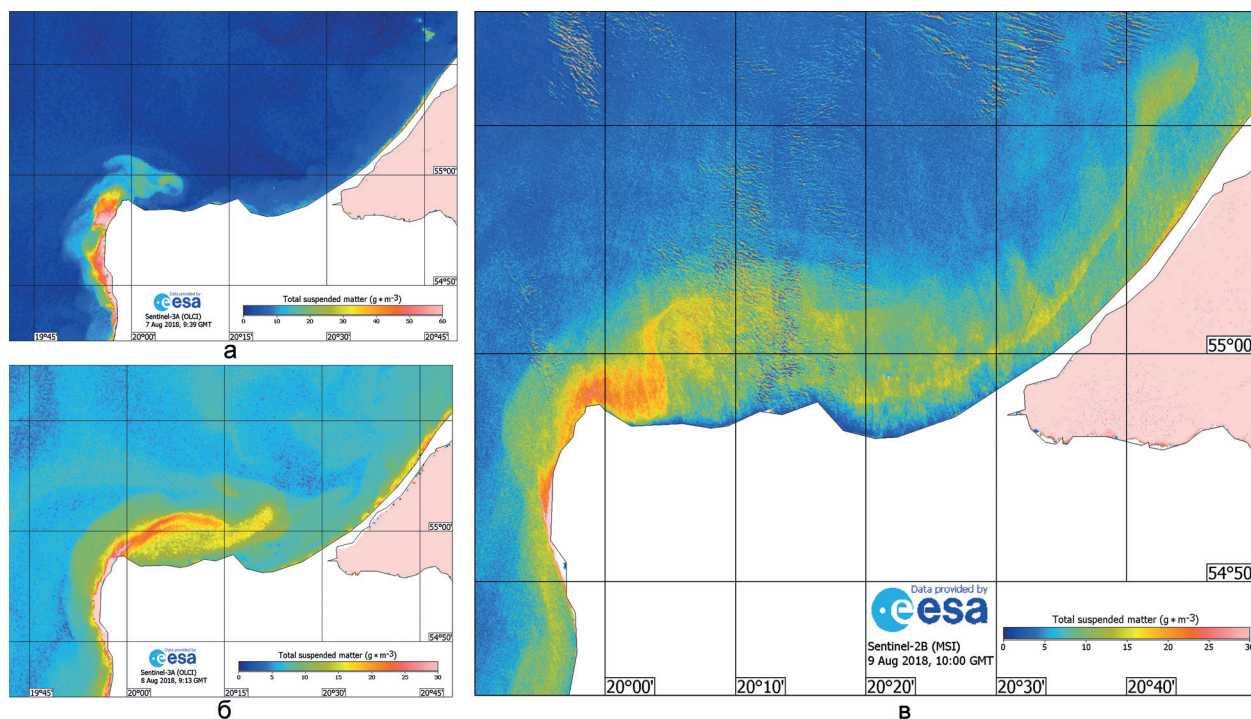


Рис. 3. Проявление трансформации вихревого диполя в течение 7–9 августа 2018 г. в поле TSM: а — OLCI Sentinel-3A за 7 августа 2018 г.; б — OLCI Sentinel-3A за 8 августа 2018 г.; в — MSI Sentinel-2B за 9 августа 2018 г.

Согласно официальным данным, в штатном режиме сбрасываемые в Балтийское море сточные воды превышают ПДК только по содержанию железа. При внештатных ситуациях, например при сложных погодных условиях, в море может сбрасываться большое количество сточных вод, содержащих, в частности, взвешенные песчаные и глинистые частицы, которые, не оседая, разносятся на большие расстояния.

Менее чем за трёхчасовой интервал между первой и третьей спутниковыми съёмками диполь значительно продвинулся в восточном-северо-восточном направлении вдоль северной оконечности Самбийского полуострова, что объясняется сильным вдольбереговым течением. Только между съёмками MODIS Terra и MODIS Aqua ближайшая к берегу антициклоническая часть диполя переместилась на 3,5 км; «шляпка» грибовидного течения увеличилась в поперечнике на 1,7 км и развернулась в антициклоническом направлении на 4°. Проведённые в период спутниковых наблюдений в районе мыса Таран измерения с помощью ADCP с маломерного судна показали, что скорость прибрежного течения в верхней части «ножки» грибовидной структуры составляла порядка 80 см/с (рис. 4). Вне диполя скорость течения резко падала и не превышала 20 см/с. По оценкам датчика мутности, установленного на CTD-зонде, мутность воды в районе нахождения вихревого диполя составляла порядка 20 NTU, вне вихря не превышала 1–2 NTU. Визуальные наблюдения с борта судна позволили выявить чёткую границу между взмученными водами, вовлечёнными в грибовидное течение, и чистыми водами. Граница представляла собой широкую сливовую полосу, окаймлённую пенной.

На спутниковых изображениях от 8 августа (OLCI Sentinel-3A в 09:13 UTC, MODIS Terra в 09:30 UTC и MODIS Aqua в 11:15 UTC) конфигурация диполя существенно изменилась, более выраженной стала его циклоническая часть, диаметр которой составлял около 9 км. Антициклоническая часть, прижатая к берегу, значительно уменьшилась. За сутки диполь переместился вдоль береговой линии более чем на 23 км (рис. 3б).

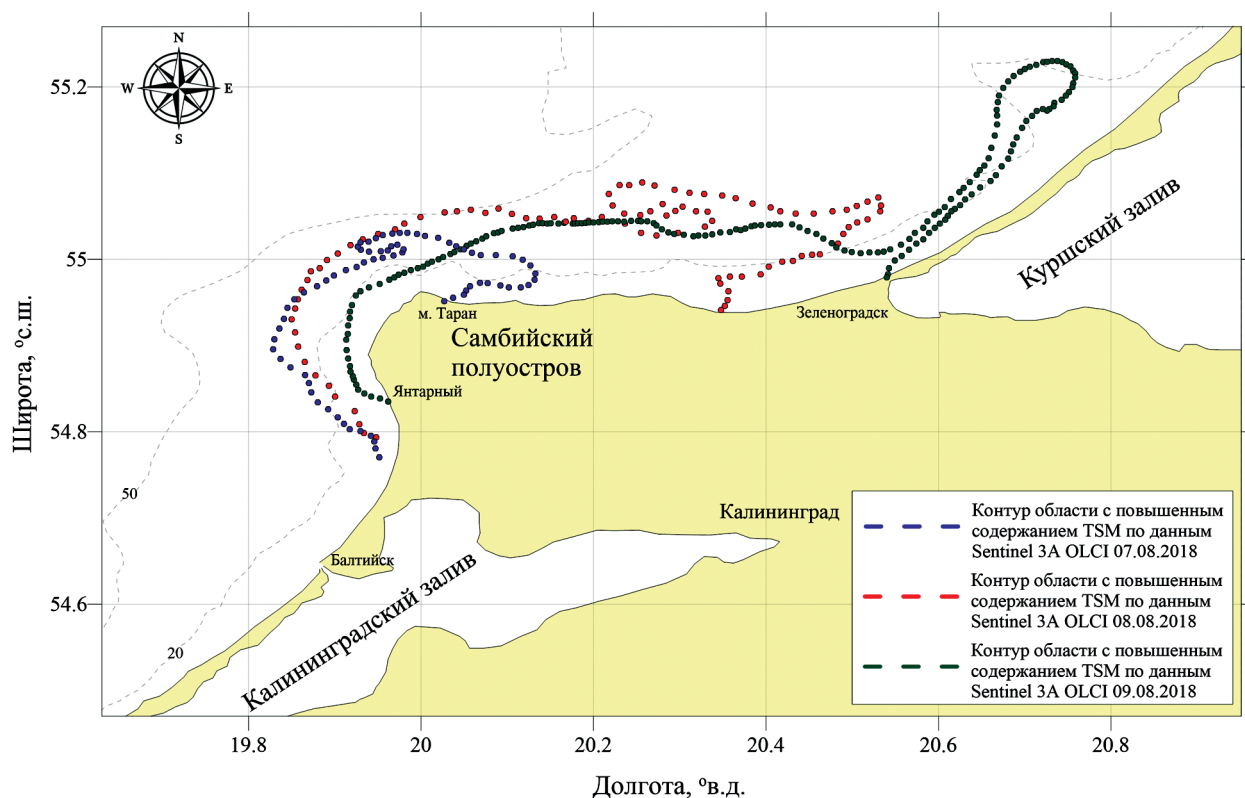


Рис. 4. Цветосинтезированное изображение MODIS Terra за 7 августа 2018 г. Синим цветом отмечены скорость и направление течения по данным ADCP в период спутниковой съёмки

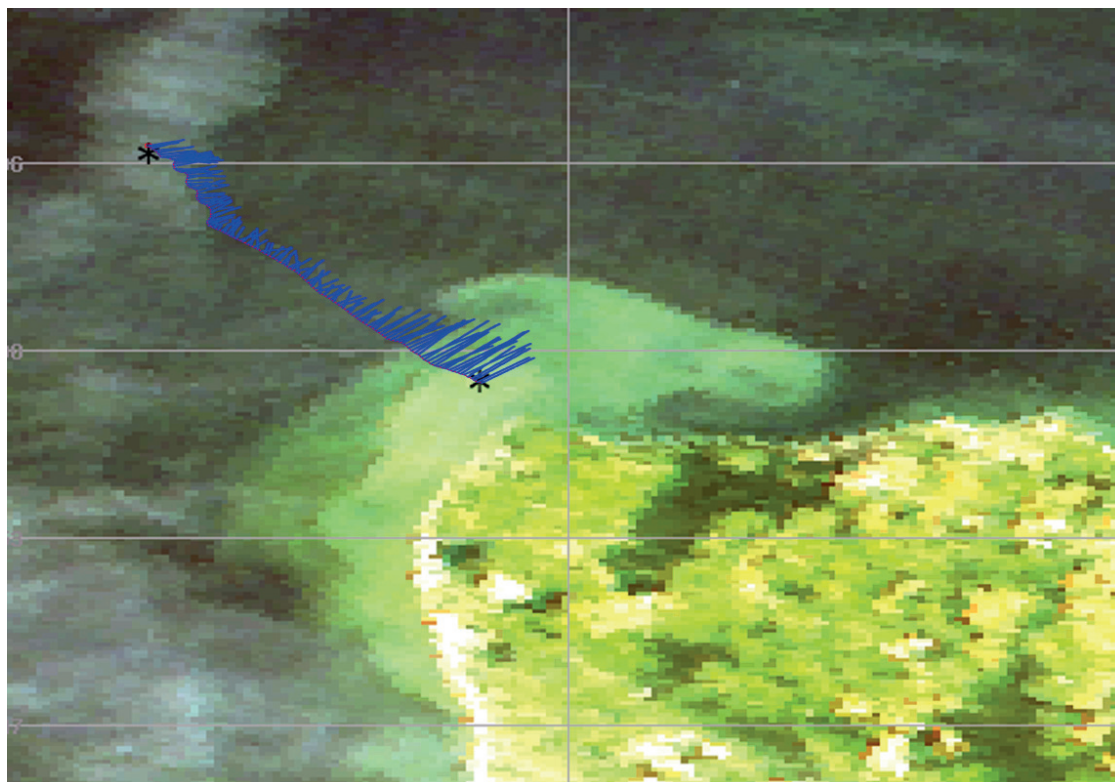


Рис. 5. Сводная картина трансформации и распространения вихревого диполя, построенная по данным OLCI Sentinel-3A (за 7 и 8 августа 2018 г.) и MSI Sentinel-2B (за 9 августа 2018 г.)

На изображениях от 9 августа 2018 г. MSI Sentinel-2B в 10:05 UTC (рис. 3в), MODIS Terra в 10:10 UTC и MODIS Aqua в 10:20 UTC (редкий случай, когда Terra и Aqua снимали один район практически синхронно) вихревой диполь выродился практически в струю с плохо различимыми циклонической и антициклонической частями, суммарный диаметр которых составил менее 5 км. Передняя часть диполя на момент спутниковых наблюдений находилась в районе Куршской косы, практически на границе с Литвой. Результат последовательного картирования контура вихревого диполя по данным OLCI Sentinel-3A (за 7 и 8 августа) и MSI Sentinel-2B (за 9 августа) наглядно показал трансформацию и траекторию вихревого диполя (рис. 5), который за трое суток переместился от мыса Таран до середины Куршской косы, пройдя расстояние около 63 км.

Интересно было проследить траектории лагранжевых дрейфтеров, конструкция которых описана в работе (Голенко и др., 2017). Два дрейфтера с парусами на глубине 4 м (чтобы удобно было сравнивать с данными ADCP, у которого первая ячейка записи находилась также на глубине 4 м) были запущены 7 августа северо-западнее и севернее мыса Таран на расстоянии 10 миль от берега. Они не попали в поле действия вихревого диполя и перемещались в восточном направлении примерно параллельными курсами. Скорость дрейфтеров в среднем составляла около 20 см/с. Они достигли Куршской косы 12 и 13 августа соответственно, т. е. дрейфовали пять с лишним суток. Опираясь на оперативные спутниковые данные, 8 августа мы запустили ещё один дрейфтер севернее мыса Таран на расстоянии 5 миль от берега, чтобы по возможности попасть в струю грибовидного течения. Его парус также находился на глубине 4 м. Дрейфтер попал в струю и двигался в восточном направлении со скоростью 70–80 см/с. Он достиг Куршской косы в ночь на 11 августа, т. е. дрейфовал только чуть более трёх суток.

Представленные результаты важны с точки зрения экологического мониторинга этого уникального района. Северная и западная части Самбийского полуострова, наряду с Куршской косой, являются важным рекреационным районом. Здесь расположены такие морские курорты как Светлогорск, Пионерский, Зеленоградск и Янтарный с их знаменитыми песчаными пляжами. Здесь же в г. Балтийске находится крупный порт, а вдоль побережья

полуострова проходит одна из основных судовых трасс. В связи с этим для осуществления контроля возможных антропогенных загрязнений прибрежных вод и пляжей необходимо понимание особенностей местной циркуляции вод и её влияния на перенос загрязняющих веществ. Рассмотренный в данной статье случай формирования и распространения вихревого диполя, переносящего сильно взмученные воды, показал, что под действием таких гидродинамических процессов загрязнения, попавшие в морскую среду в районе мыса Таран (а возможно, и у западного побережья Самбийского полуострова), уже через три дня могут оказаться на пляжах Куршской косы, которая является государственным природным национальным парком и внесена в список Всемирного наследия ЮНЕСКО.

В заключение хотелось бы отметить, что полученные за период наблюдений радиолокационные изображения SAR-C Sentinel-1 не содержали проявлений вихревого диполя, поскольку из-за сильного ветра сликовые полосы, т. е. области выглаживания морской поверхности биогенными плёнками, которые являются основными трассерами поверхностных течений в летний период, не образовывались.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта №14-17-00555. Оперативный анализ спутниковых данных осуществлялся с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» (Лупян и др., 2015), в частности с помощью информационной системы See The Sea (Лупян и др., 2012), развиваемой и поддерживаемой в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Литература

1. Гинзбург А. И., Бульчева Е. В., Костяной А. Г., Соловьев Д. М. Вихревая динамика в Юго-Восточной Балтике по данным спутниковой радиолокации // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 6. С. 893–902.
2. Голенко М. Н., Краюшкин Е. В., Лаврова О. Ю. Исследование особенностей прибрежных поверхностных течений в Юго-Восточной Балтике по результатам подспутниковых дрейфтерных экспериментов и численного моделирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 7. С. 280–296. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-280-296.
3. Гурова Е. С. О формировании и динамике вихря у побережья Юго-Восточной Балтики по данным дистанционного зондирования // *Вестник Балтийского федерального ун-та им. И. Канта*. 2012. Вып. 1. С. 16–21.
4. Каримова С. С., Лаврова О. Ю., Соловьев Д. М. Наблюдение вихревых структур Балтийского моря с помощью радиолокационных и радиометрических спутниковых данных // *Исследование Земли из космоса*. 2011. № 5. С. 15–23.
5. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. Москва: ИКИ РАН, 2016. 335 с.
6. Лупян Е. А., Матвеев А. А., Уваров И. А., Бочарова Т. Ю., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. Спутниковый сервис See the Sea — инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–261.
7. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
8. Gurova E., Chubarenko B. Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic // *Oceanologia*. 2012. V. 54(4). P. 631–654.
9. Lavrova O., Krayushkin E., Golenko M., Golenko N. Effect of Wind and Hydrographic Conditions on the Transport of Vistula Lagoon Waters Into the Baltic Sea: Results of a Combined Experiment // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. V. 9. Iss. 9. P. 5193–5201.
10. Zhurbas V., Oh I. S., Park T. Formation and decay of a longshore baroclinic jet associated with transient coastal upwelling and downwelling: A numerical study with applications to the Baltic Sea // *J. Geophysical Research*. 2006. V. 111. C04014. DOI: 10.1029/2005JC003079.

Formation and propagation of an eddy dipole at Cape Taran in the southeast Baltic Sea

E. V. Krayushkin¹, O. Yu. Lavrova¹, K. R. Nazirova¹,
Ya. O. Alferyeva², D. M. Soloviev³

¹Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

³Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mails: box_evk@mail.ru, olavrova@iki.rssi.ru

The results of satellite observation of the formation and propagation of an eddy dipole at Cape Taran (southeast Baltic Sea) on 7–9 August 2018 are presented. The formation of the dipole was induced by a sharp change in wind conditions. High water turbidity in the coastal zone enabled distinct manifestation of the dipole in visible satellite images and especially in total suspended matter maps derived from satellite data. The dynamics of the dipole was retrieved from analysis of Sentinel-3 OLCI, Sentinel-2 MSI and Terra/Aqua MODIS satellite images. Concurrently with satellite remote sensing, an oceanographic field study was conducted in the same region, featuring ADCP surveys along standard transects near Cape Taran and launch of Lagrangian drifters to determine the structure of local currents. The edge of highly turbid waters was determined using an CTD probe equipped with a turbidity meter. Joint analysis of the satellite data and in situ observations made it possible to evaluate spatial and dynamic parameters of different parts of the dipole. Over the three days, the eddy dipole underwent a strong transformation and traveled from Cape Taran to the middle of the Curonian Spit, a distance of about 63 km.

Keywords: eddy dipole, current around cape, total suspended matter, satellite observation, Sentinel-3 OLCI, Sentinel-2 MSI, Terra/Aqua MODIS, Lagrangian drifter, southeast Baltic Sea

Accepted: 17.08.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221

References

1. Ginzburg A. I., Bulycheva E. V., Kostianoy A. G., Solovyov D. M., Vortex dynamics in the southeastern Baltic Sea from satellite radar data, *Oceanology*, 2015, Vol. 55, No. 6, pp. 805–813.
2. Golenko M. N., Krayushkin E. V., Lavrova O. Yu., Issledovanie osobennostei pribrezhnykh poverkhnostnykh techenii v Yugo-Vostochnoi Baltike po rezul'tatam podsputnikovykh drifternykh eksperimentov i chislennogo modelirovaniya (Investigation of coastal surface currents in the South-East Baltic based on concurrent drifter and satellite observations and numerical modeling), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 7, pp. 280–296.
3. Gurova E. S., O formirovani i dinamike vikhrya u poberezh'ya Yugo-Vostochnoi Baltiki po dannym distantsionnogo zondirovaniya (On the formation and dynamics of an eddy at the coast of southeast Baltic based on remote sensing data), *Vestnik IKBFU*, 2012, Issue 1, pp. 16–21.
4. Karimova S. S., Lavrova O. Yu., Solov'ev D. M., Observation of eddy structures in the Baltic Sea with the use of radiolocation and radiometric satellite data, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, Vol. 48, No. 9, pp. 1006–1013.
5. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Sputnikovyie metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk), Moscow: IKI RAN, 2016, 335 p.
6. Loupian E. A., Matveev A. A., Uvarov I. A., Bocharova T. Yu., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sputnikovyyi servis See the Sea — instrument dlya izucheniya protsessov i yavlenii na poverkhnosti okeana (Satellite service See the Sea — a tool for investigation of processes and phenomena at the sea surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251–261.
7. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentr kolektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovyykh dannyykh IKI RAN dlya

- resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
8. Gurova E., Chubarenko B., Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic, *Oceanologia*, 2012, Vol. 54 (4), pp. 631–654.
 9. Lavrova O., Krayushkin E., Golenko M., Golenko N., Effect of Wind and Hydrographic Conditions on the Transport of Vistula Lagoon Waters Into the Baltic Sea: Results of a Combined Experiment, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, Issue 9, pp. 5193–5201.
 10. Zhurbas V., Oh I. S., Park T., Formation and decay of a longshore baroclinic jet associated with transient coastal upwelling and downwelling: A numerical study with applications to the Baltic Sea, *J. Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, C04014, DOI: 10.1029/2005JC003079.