

Распространение взвешенного вещества под влиянием штормовых ветров у западного побережья Крыма по оптическим данным высокого разрешения

А.А. Алескерова, А.А. Кубряков, С.В. Станичный

*Морской гидрофизический институт, Севастополь, 299002, Россия
E-mail: Annete08@mail.ru*

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей распространения взвешенного вещества под действием штормовых ветров в районе западного побережья Крыма. На основе анализа архива данных сенсоров спутников Landsat 4, 5, 7, 8 с 1983 по 2014 гг. были отобраны ситуации, в которых наблюдались интенсивные потоки взвешенного вещества, связанные с воздействием экстремально сильных ветров. Все рассмотренные случаи были разделены по трем направлениям ветров: при южных, северных и западных ветрах. Исследованы особенности и проведена классификация субмезомасштабных процессов, определяющих распространение взвеси при различных направлениях штормового ветра.

Показано, что при северных штормах наблюдается образование интенсивного вдольберегового течения, которое переносит взвесь в южном направлении с последующим ее выносом в глубоководную часть моря. При действии южных штормов взмученные воды двигаются на север и преимущественно концентрируются в районе Каламитского залива. Сильные западные ветра приводят к образованию апвеллинга в районе западного побережья Крыма. На периферии апвеллинга наблюдается образование филамент и циклонических вихрей, которые выносят взвешенное вещество от берега в сторону противоположную действию ветра.

Ключевые слова: взвешенное вещество, Landsat, субмезомасштабная динамика, шторм, эрозия берегов, Черное море.

Введение

Интенсивное штормовое воздействие вызывает активное размывание берегов и взмучивание придонных осадков (Косьян и др., 2003; Горячкин и др., 2010; Харитоновна, 2013). В результате этого возникают мощные потоки взвеси, которые могут содержать загрязняющие и питательные вещества, и тем самым оказывать существенное влияние на прибрежную экосистему. Потоки взвешенного вещества являются хорошим индикатором мест размывания и аккумуляции берегов.

Прибрежная акватория характеризуется многообразием динамических процессов, которые имеют достаточно малые пространственные масштабы (до нескольких километров). Сравнительно недавно в свободном доступе появились данные сенсоров спутников серии Landsat, которые имеют высокое пространственное разрешение – 30 метров. Эти данные позволяют исследовать процессы в океане на сравнительно малых пространственных масштабах (100 метров – 10 км) (Лаврова и др., 2011; Станичный и др., 2014). В настоящей работе эти измерения используются для исследования потоков взвешенного вещества у Западного побережья Крыма, связанных с воздействием экстремально сильных ветров.

В работе проведен статистический анализ архива изображений, полученных по измерениям сенсоров на серии спутников Landsat с 1983 по 2014 гг. На основании этого анализа были отобраны ситуации, в которых наблюдались интенсивные потоки взвеси после воздействия штормов. Выделены три основных направления штормовых ветров, которые по-разному влияли на распространение взвешенного вещества у западного побережья Крыма (при северных, южных и западных ветрах). Исследованы особенности и проведена классифика-

ция динамических процессов, определяющих распространение взвеси при различных направлениях штормового ветра.

Данные

В настоящей работе использовались данные сенсоров спутников серии Landsat 4, 5, 7 и 8 за период с 1983 по 2014 гг. Данные были получены с портала glovis.usgs.gov. Данные сенсоров спутников серии Landsat имеют пространственное разрешение 15–30 м для видимого и ближних инфракрасных каналов, 100 м для инфракрасных каналов. Интервал повторения съемок составляет 16 дней.

Для получения информации о полях скорости ветра на высоте 10 метров используются данные реанализа Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications (MERRA). Пространственное разрешение составляет $0,5^\circ \times 0,66^\circ$.

Результаты

Всего за период с 1983 по 2014 гг. были отобраны 106 безоблачных снимков. Анализ снимков позволил обнаружить интенсивные потоки взвешенного вещества, которые были связаны с сильными ветрами. Все случаи были разделены по трем направлениям ветров: южные (7 случаев), северные (13 случаев) и западные ветра (8 случаев). Рассмотрим несколько примеров распространения взвешенного вещества под влиянием штормовых ветров различных направлений.

Северные шторма

Яркий пример распространения взвеси наблюдался 20 октября 2013 г. (*рис. 1а, б*) в результате действия северного шторма, который произошел 19 октября 2013 г. (*рис 1в*). Скорость ветра составляла до 15 м/с у западного побережья Крыма и до 20 м/с в эпицентре шторма, который располагался у берегов Турции.

На *рис. 1* изображена яркость восходящего излучения на длине волны 443 нм, полученная по данным сенсора спутника Landsat 8. Области повышенной яркости на этом снимке с большой вероятностью связаны с повышенной концентрацией взвешенного вещества, которое вызывает дополнительное рассеяние света. При действии северных штормов наблюдается интенсивный вынос взвеси в виде узкой мощной вдольбереговой струи направленной на юг. Ширина этой струи составляет ~ 1 км. На южной точке западного берега Крыма течение отрывается от берега и выносит взвешенное вещество на расстояние около 30 км в открытое море. Струя берет начало от м. Лукулл, где наблюдается наибольшая область взмученных вод протяженностью от п. Николаевка и до м. Лукулл (~30 км) и ~10 км в сторону открытого моря. Возле м. Лукулл возникает циклон (ц1) диаметром около 8 км.

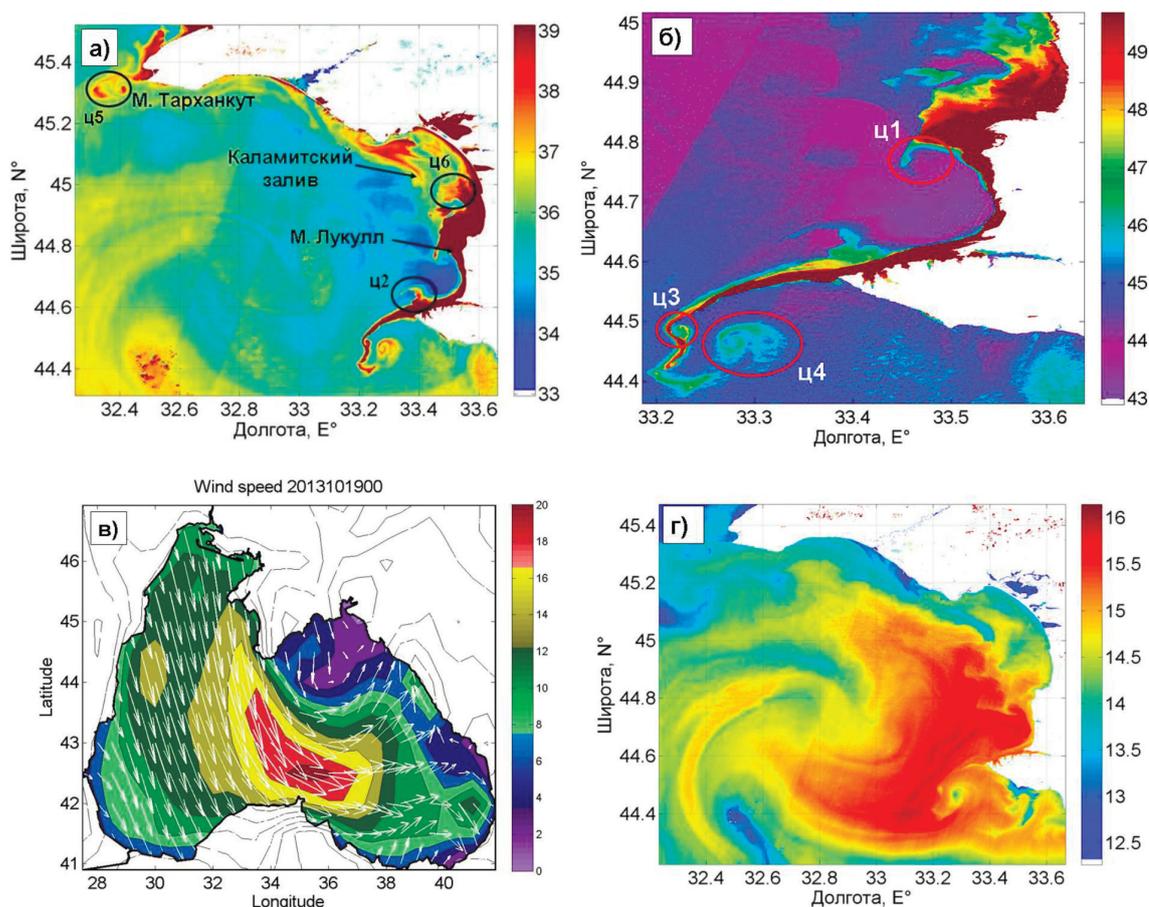


Рис. 1. (а) Яркость излучения ($\text{Вт}/\text{м}^2 \times \text{стер} \times \mu\text{т}$) на длине волны $\lambda=0,450 - 0,515$ мкм по данным сенсоров спутников серии Landsat за 20 октября 2013 г.; (б) яркость излучения ($\text{Вт}/\text{м}^2 \times \text{стер} \times \mu\text{т}$) на длине волны $\lambda=0,433 - 0,453$ мкм; (в) карта скорости ветра в м/с за 19 октября 2013 г.; (г) карта распределения температуры в $^{\circ}\text{C}$, полученная с помощью спутника Landsat (канал 10)

Вследствие неустойчивости струи на ее периферии образуется ряд циклонических циклонов: вихрь (ц2) диаметром 7 км, вихрь (ц3) диаметром 2 км и на конце струи наблюдается вихрь (ц4) диаметром 5,5 км (рис. 1а, б). Ярко выражены циклонические вихри также наблюдаются севернее у м. Тарханкут (ц5) и в Каламитском заливе (ц6).

Отметим, что в данной прибрежной струе наблюдаются очень высокие значения яркости излучения, что свидетельствует о высокой концентрации и, следовательно, потоке взвеси. После отрыва от побережья Крыма узкий и интенсивный поток взвеси движется по периферии циклонического вихря, который четко виден в поле яркостной температуры (канал 10) (рис. 1г). Центр этого вихря характеризуется пониженными значениями температуры (примерно на 2° ниже), что, вероятно, связано с подъемом глубинных холодных вод. В тоже время в оптическом диапазоне в центре вихря наблюдаются повышенные значения яркости.

Похожую картину также можно наблюдать 18 сентября 2007 г. (рис. 2а) и 14 августа 2003 г. (рис. 2в) при интенсивных северных ветрах с эпицентром в северо-западной части Черного моря. Максимальный ветер в первом случае наблюдался 16 сентября и составил 15 м/с, во втором – 12 августа и составил 12 м/с (рис. 2б и рис. 2г). В обоих случаях повышенные зна-

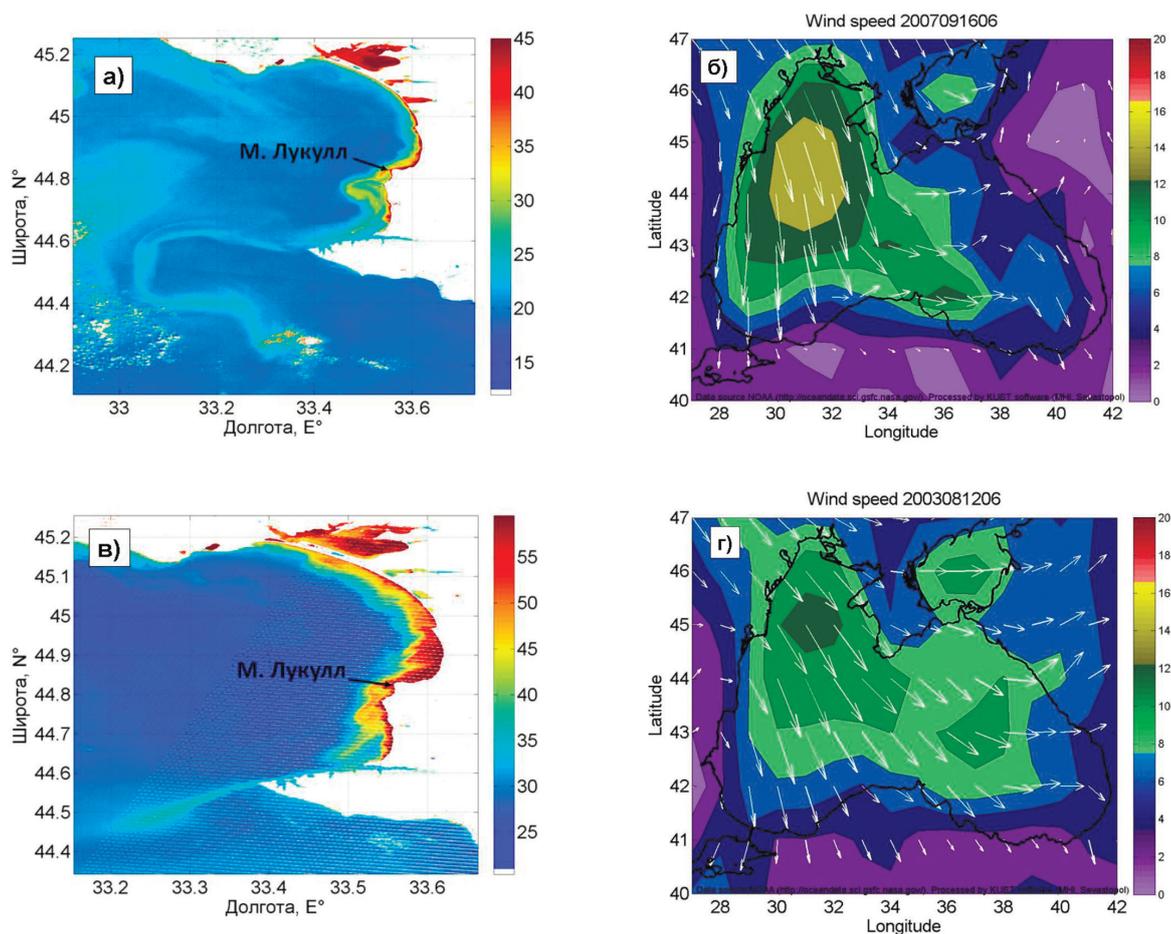


Рис. 2. Яркость излучения на длине волны $\lambda=0,433 - 0,453$ мкм по данным Landsat за 18 сентября 2007 г. (а) и 14 августа 2003 г. (в); (б, г) карты скорости ветра за 16 сентября 2007 г. и 12 августа 2003 г.

чения яркости наблюдаются у м. Лукулл и немного севернее, куда, вероятно, северным ветром переносится наибольшее количество взвешенного вещества. От этого мыса в обоих случаях начинается развитие узкой прибрежной струи, шириной 0,5–2 км, которая выносит взвесь на большие расстояния от берегов Крыма на юго-запад. При этом часто за мысом Лукулл происходит образование одного или двух циклонических вихрей диаметром 4–8 км.

Таким образом, при северных штормах наблюдается образование мощного вдольберегового течения шириной 0,5–2 км и интенсивное распространение взвеси в южном направлении. Часть мутных вод задерживается у топографического препятствия – м. Лукулл, а часть выносится вместе с течением в открытое море на значительное расстояние от берега (трассер наблюдается на расстояниях до 50 км). Взвешенное вещество в этом районе открытого моря с большой вероятностью будет подхвачено основным черноморским течением и не будет возвращено к берегам Крыма.

Южные шторма

Рассмотрим несколько случаев интенсивного распространения взвеси при штормовых южных ветрах. Одна из таких ситуаций наблюдалась на снимке Landsat от 23 декабря 2010 года,

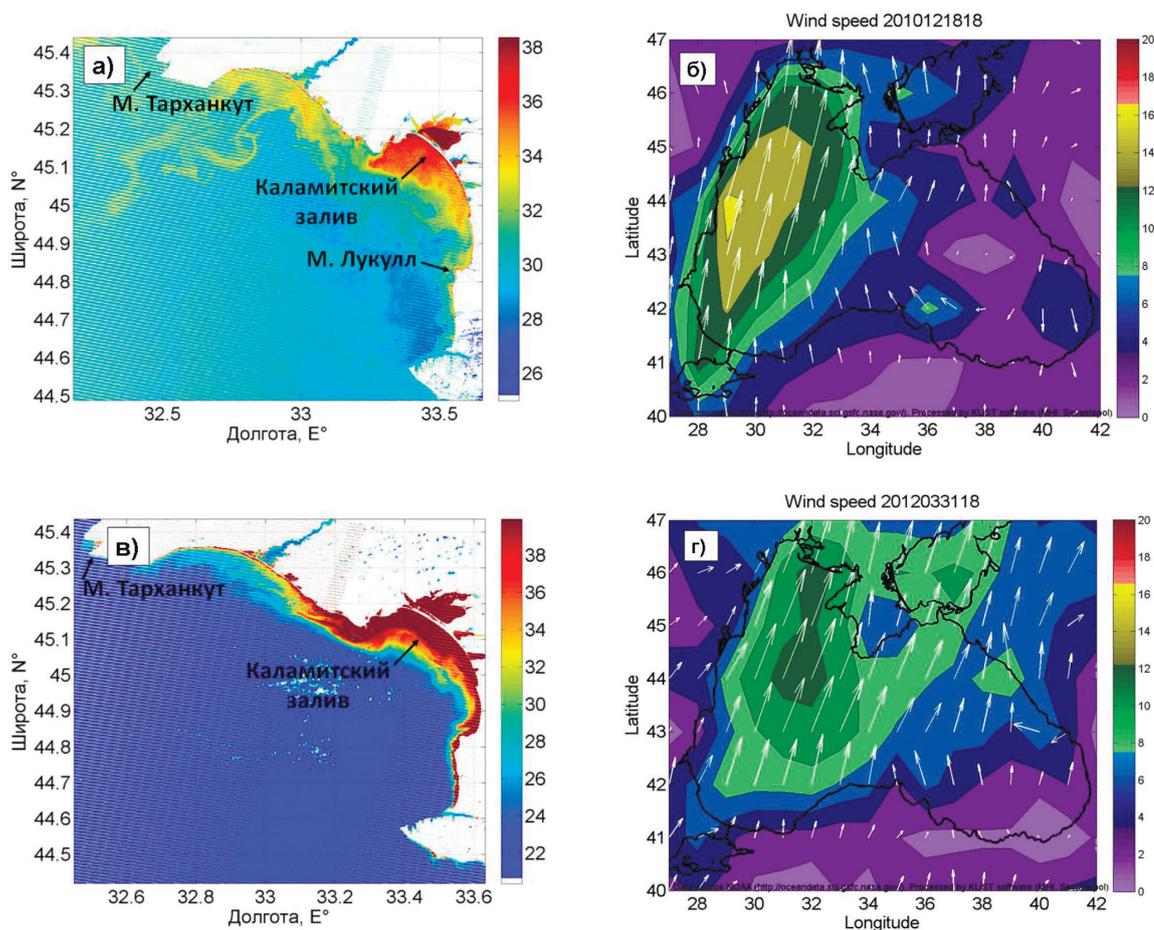


Рис. 3. Яркость излучения на длине волны $\lambda=0,433 - 0,453$ мкм по данным Landsat за 23 декабря 2010 (а) и 31 марта 2012 г. (в); (б, г) карты скорости ветра за 18 декабря 2010 и 31 марта 2012 г.

на котором заметно распространение большого количества мутных вод на север вдоль берега (рис. 3а). Такое движение взвешенного вещества возникло вследствие действия юго-западного шторма со скоростями ветра 15–16 м/с, который наблюдался 18 декабря 2010 г. (рис. 3б).

Наибольшее количество взмученных вод с высокими значениями яркости наблюдается в Каламитском заливе. Ширина полосы взмученных вод меняется от 5 км в южной части (немного севернее м. Луккул) до 20 км в северной части Каламитского залива. Севернее Каламитского залива взвесь движется вдоль берега, ширина струи составляет ~ 10 км. При продвижении струи образуется большое количество разнообразных динамических структур – вихрей, филамент и т. д., которые выносит мутные воды далеко на юго-запад по направлению поворота береговой линии у мыса Тарханкут. Отметим, что данный снимок был получен через достаточно большой промежуток – 5 дней после действия шторма, и исследуемая картина может отражать скорее процесс релаксации течений. Тем не менее, значения яркости остаются высокими, т. е. последствия штормового ветра достаточно хорошо заметны и через 5 дней после его действия.

Аналогичный перенос можно увидеть на снимке Landsat 7 от 31 марта 2012 г. (рис. 3в). В этом случае сильный юго-западный ветер со скоростями ~ 12 м/с наблюдался в этот же день 31 марта 2012 г., всего на несколько часов раньше пролета спутника. Таким, образом

на этом снимке мы видим картину распространения взвеси практически сразу же после действия шторма. У западного побережья Крыма наблюдается четко выраженный поток взвеси в северном направлении вдоль береговой полосы. Максимальные значения яркости и ширина полосы мутных вод, также, как и в предыдущем случае, наблюдается в Каламитском заливе. Ширина полосы мутных вод достигает в этом районе 15–20 км. Струя достаточно устойчива, и вихревые структуры практически отсутствуют на этот начальный момент распространения взвеси после шторма.

Таким образом, при действии южных штормов взмученные воды концентрируются в районе Каламитского залива. Область взмученных вод варьирует от 10–20 км. Здесь береговая полоса меняет свое направление и препятствует движению взвешенного вещества на север. Часть взвешенного вещества, однако, продвигается далее в виде достаточно широкой (около 10 км) прибрежной струи мутных вод. Эта струя может становиться неустойчива и отрываться от берега в районе следующего поворота береговой линии у м. Тарханкут.

Западные шторма

Достаточно интересный вид имеет распространение взвеси при западных ветрах. 18 января 2003 г. наблюдались последствия интенсивного шторма, который проходил 15 января 2003 г. (*рис. 4а*). Скорость ветра достигала величины 16 м/с. Достаточно хорошо заметны потоки взвешенного вещества, направленные от берега в сторону противоположную действию ветра. Вынос осуществляется в виде ряда струй, на конце которых поток закручивается в циклоническом направлении. Длина этих струй на момент съемки составляет от 5 км в южной части побережья до 20 км в районе м. Лукулл и Каламитского залива. Радиус областей циклонической завихренности составляет ~ 1 км. Обширная область взмученных вод наблюдается на протяжении всего западного берега.

Поле яркостной температуры на длине волны $\lambda=10,40-12,50$ мкм демонстрирует, что под действием северо-западного ветра на западном побережье Крыма развивается апвеллинг (*рис. 4з*). Воды у берега характеризуются пониженными значениями температуры ($1,5^\circ$) по сравнению с окружающими водами (5°). На периферии апвеллинга наблюдается ряд циклонических вихрей, связанных, вероятно, с динамикой апвеллинга. При этом области пониженных значений температуры соответствуют областям с повышенными значениями взвеси (*рис. 4в, з*).

Аналогичная ситуация наблюдалась также 21 августа 2012 г. Скорость западных ветров у берегов Крыма достигала 12 м/с (*рис. 4е*). В данном случае, 22 августа, наблюдались многочисленные вихревые структуры вдоль всего западного побережья. Все образованные вихри также имели циклоническую завихренность. Потоки взвеси были направлены на запад от берега в сторону, противоположную действию ветра. Диаметр самого большого вихря, образовавшегося южнее м. Лукулл составил ~13 км, а расстояние, на которое был осуществлен перенос взвеси составило ~ 15 км. Все остальные вихри имели меньшие размеры с диаметром от 2 до 3 км. Анализ карт яркостной температуры показал, что в этом случае потоки взвешенного вещества также были связаны с развитием апвеллинга.

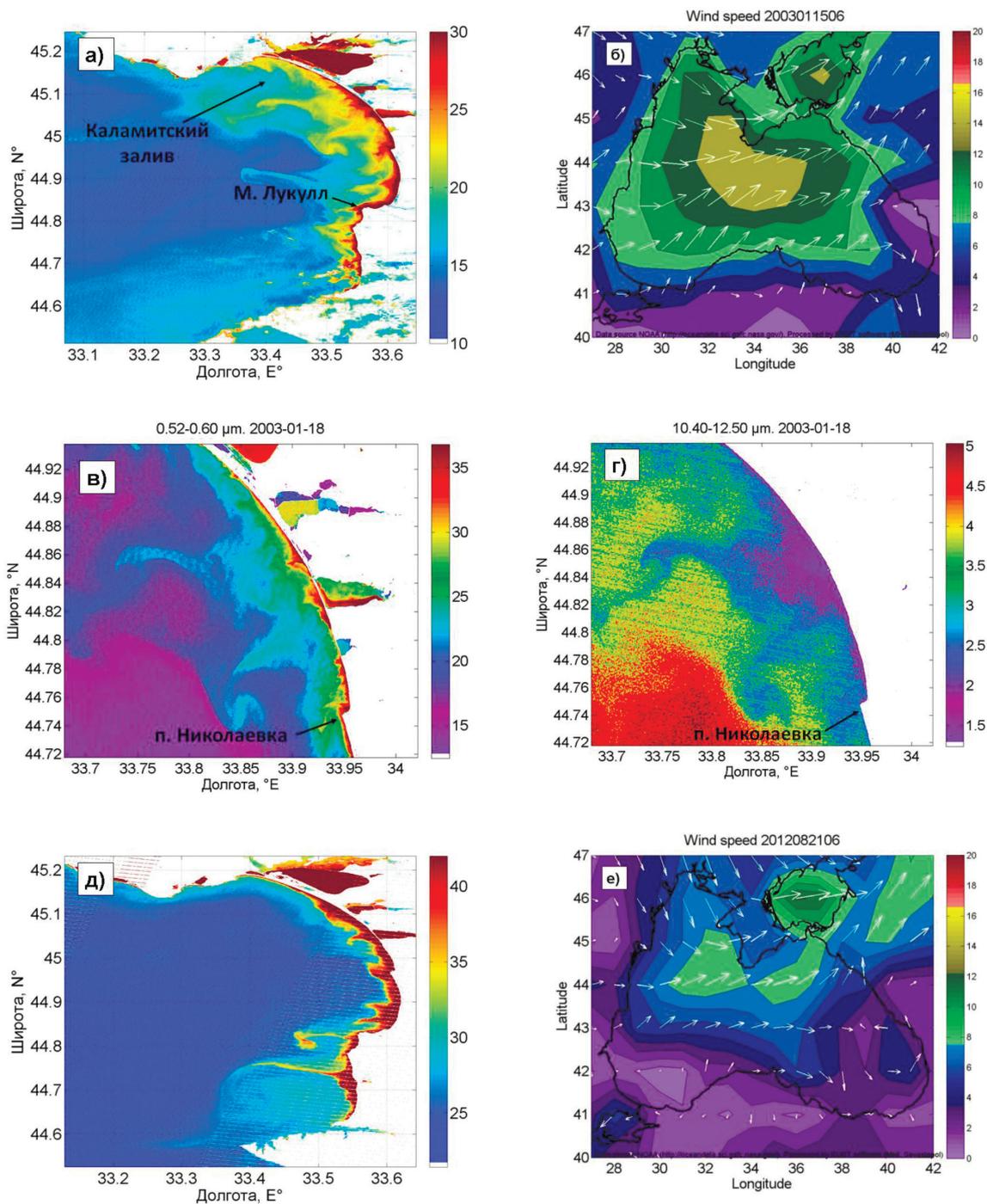


Рис. 4. а) Яркость излучения на длине волны $\lambda=0,433 - 0,453$ мкм по данным Landsat-7 за 18 января 2003 г.; б) карта скорость ветра за 15 января 2003 г.; в) яркость излучения на длине волны $\lambda=0,52 - 0,60$ мкм за 18 января 2003 г.; г) апвеллинг в поле яркостной температуры на длине волны $\lambda=10,40 - 12,50$ мкм за 18 января 2003 г.; д) яркость излучения на длине волны $\lambda=0,433 - 0,453$ мкм за 22 августа 2012 г.; е) карта скорости ветра за 21 августа 2012 г.

Таким образом, действие западных штормовых ветров приводит к возникновению апвеллинга на западном побережье Крыма, который хорошо виден в поле яркостной температуры (рис. 4г). По мере развития апвеллинга на его периферии наблюдается образование циклонических вихрей и ряда филамент расположенных с определенной периодичностью. Размеры небольших циклонических вихрей составляют от 1 до 3 км,

а крупных – от 10 до 20 км. Они выносят взвешенное вещество на значительное расстояние от берега в сторону противоположную действию ветра (рис. 4а, в).

Выводы

В данной работе был проведен анализ архива изображений, полученных по данным сенсоров, установленных на спутниках Landsat 4, 5, 7 и 8, за период с 1983 по 2014 г., для района западного побережья Крыма. На основе анализа были отобраны ситуации, в которых наблюдались интенсивные потоки взвеси после воздействия штормовых ветров, которые были разделены на три типовых случая (при северных, южных и западных ветрах). В работе проведен анализ и классификация субмезомасштабных процессов, оказывающих определяющее влияние на распространение взвеси при штормовых ветрах различных направлений.

Результаты этой работы могут быть полезны при строении берего-укрепительных сооружений и других работ, связанных с береговой зоной.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-45-01526\14.

Литература

1. Горячкин Ю. Н., Удовик В. Ф., Харитонова Л. В. Оценки параметров потока наносов у западного берега Бакальской косы при прохождении сильных штормов в 2007 году // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 5. С. 42-51.
2. Динамические процессы береговой зоны моря. Ред. Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пыхов Н.В. М.: Научный мир. 2003. 320 с.
3. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России: М.: ИКИ РАН. 2011. 480 с.
4. Станичный С.В., Соловьев Д.М., Кубряков А.А., Станичная Р.Р., Давыдова Е.П., Бурдюгов В. М. Характеристики поверхностного слоя моря в районе Южного берега Крыма по спутниковым данным - межгодовая и сезонная изменчивость // Сборник «Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне» (Ред. В.А. Иванов, В.А. Дулов), ЭКОСИ. Гидрофизика Севастополь. с. 335-372, 2014.
5. Харитонова Л.В. Ветровое волнение и литодинамические процессы в прибрежной зоне западного Крыма: Дис. канд. географических наук. МГИ УДК 551.466. 2013. 154 с.

Propagation of suspended matter under the influence of storm winds off the Western coast of Crimea by high-resolution optical data

A.A. Aleskerova, A.A. Kubryakov, S.V. Stanichny

Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol, 299002, Russia
E-mail: Annete08@mail.ru

The present work is devoted to investigation of propagation of suspended matter by the action of storm winds of the west coast of the Crimea Peninsular in the Black Sea. Scenes with observed intense fluxes of suspended matter that was caused by the action of extreme storm wind were selected from the Landsat 4, 5, 7, 8 data archive for the 1983-2014 period. All scenes were divided corresponding to storm wind directions: the southern, northern and western winds. It is shown that the northern storms induce formation of intense alongshore currents, which carry the suspended matter in the southern direction, followed by its removal to the deep sea. Under the action of the southern storms turbid waters move north and are mainly concentrated in the region of the Kalamitsky bay. Strong westerly winds lead to the emergence of upwelling of the west coast of Crimea. At the periphery of the upwelling, filament and cyclonic eddies are formed, that carry the suspended matter from the coast in the direction opposite to the wind.

Keywords: suspended matter, Landsat, submesoscale dynamics, storm; coastal erosion, the Black Sea

References

1. Goryachkin Yu. N., Udovik V. F., Kharitonova L. V. Otsenki parametrov potoka nanosov u zapadnogo berega Bakal'skoi kosal pri prokhozhdanii sil'nykh shtormov v 2007 godu (Estimations of the parameters of sediment flux at the Bakal'skaya spit western coast at heavy gales in 2007), *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*, 2010, No. 5, pp. 42-51.
2. *Dinamicheskie protsessy beregovoi zony morya* (Dynamical Processes In the Sea Nearshore Zone), Eds. Kos'yan R.D., Podymov I.S., Pykhov N.V., Moscow: Nauchnyi mir, 2003, 320 p.
3. Lavrova O.Yu., Kostyanoi A.G., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A. *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 480 p.
4. Stanichnyi S.V., Solov'ev D.M., Kubryakov A.A., Stanichnaya R.R., Davydova E.P., Burdyugov V. M. In: *Monitoring pribrezhnoi zony na Chernomorskom eksperimental'nom podsputnikovom poligone* (Monitoring of the coastal zone on the Black Sea experimental sub-satellite polygon), EKOSI Gidrofizika Sevastopol', 2014, pp. 335-372.
5. Kharitonova L.V. *Vetrovoe volnenie i litodinamicheskie protsessy v pribrezhnoi zone zapadnogo Kryma: Diss. kand. geograficheskikh nauk.* (Wind waves and lithodynamic processes in the coastal zone of western Crimea. Candidate's geog. sci. thesis), Sevastopol: MGI, 2013, 154 p.