Исследование динамики струйных течений вблизи Самбийского полуострова (Юго-Восточная Балтика) на основе численного моделирования и анализа спутниковых изображений видимого диапазона

М. Н. Голенко¹, О. Ю. Лаврова²

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: m.golenko@yahoo.com ² Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

На основе численного моделирования распространения пассивной примеси и с привлечением спутниковых данных рассмотрен процесс распространения вод Вислинского залива с повышенной концентрацией взвешенного вещества вдоль побережья Самбийского п-ва Юго-Восточной Балтики. Описаны различные режимы распространения вод: под воздействием вдольбереговых струйных течений, а также при значимом влиянии инерционных колебаний, которое проявляется в распространении зон повышенной концентрации взвешенного вещества на широкую акваторию моря и их «закручивании». Описаны особенности атмосферного воздействия, вызывающие эти режимы распространения вод. Было получено, что в районе м. Таран, когда направление ветра поменялось с западного на преимущественно восточное со скоростью около 10 м/с, возникло струйное течение, наиболее интенсивное в самой крутой области склона. В этом районе область повышенной концентрации трассера раздвоилась на отдельные области, расположенные в непосредственной близости от берега и на отдалении от него. На распространение трассера на отдалении от берега в рассмотренный период времени существенное влияние оказали инерционные колебания, возникшие при смене направления ветра. При относительно низких скоростях ветра до 8 м/с и незначительном изменении его направления область распространения трассера являлась компактной и непрерывной.

Ключевые слова: численное моделирование, спутниковые изображения видимого диапазона, пассивная примесь, вдольбереговые струйные течения, инерционные колебания, Юго-Восточная Балтика

Одобрена к печати: 14.08.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-175-191

Введение

Акватория Юго-Восточной Балтики характеризуется сложной системой гидрофизических процессов, зависящих от многих фактов, в первую очередь от атмосферного воздействия. Изучение этих процессов ведётся уже много лет различными методами: проводятся регулярные натурные измерения с судов (Голенко и др., 2009; Краюшкин и др., 2018; Lavrova et al., 2018) и дистанционные наблюдения из космоса (Гинзбург и др., 2015; Каримова и др., 2011; Лаврова и др., 2011, 2014; Gurova, Chubarenko, 2012; Kostianoy et al., 2018 и цитируемая литература в этих публикациях), а также модельные расчёты (Голенко и др., 2015; Журбас и др., 2004). В последние годы для исследования пространственных характеристик гидродинамических процессов, как мезомасштабных, так и субмезомасштабных, всё большее значение приобретают данные спутникового зондирования в различных диапазонах электромагнитного спектра: видимом, инфракрасном и микроволновом (радиолокационные данные). Это определяется большим прогрессом в совершенствовании приборов спутникового базирования, высоким пространственных и доступностью спутниковой информации для научных исследований. Несмотря на то, что в настоящее время возможно получение спутниковых изображений над одним и тем же районом с небольшим промежутком времени —

от десяти минут до нескольких часов, — определять динамические характеристики (скорость и направление течений) удаётся редко, а некоторые процессы, такие как инерционные колебания, в принципе на спутниковых изображениях не идентифицируются напрямую (Лаврова, Сабинин, 2016). Для верификации спутниковых данных, определения динамических характеристик и составления различных видов прогнозов используются результаты численного моделирования.

Достаточно большое количество работ посвящено сопоставительному анализу результатов спутниковых наблюдений с данными численного моделирования. В частности, проводилась верификация моделей по спутниковым данным температуры поверхности моря (ТПМ), а также по радиолокационным изображениям, на которых прослеживаются вихревые структуры (Голенко и др., 2015; Журбас и др., 2004; Gurova et al., 2013). Оценивалось влияние вихрей, которые являются следствием бароклинной неустойчивости вдольбереговых струйных течений, на горизонтальный перенос в направлении поперёк берега (Zhurbas et al., 2008). При этом с целью выявления роли именно адвективных процессов зачастую анализировались данные моделирования с отфильтрованными инерционными колебаниями. Однако для Балтики характерны частые и резкие смены направления ветра. Как неоднократно показывали натурные и модельные данные, при этом происходит генерация инерционных колебаний (Golenko et al., 2017). Поэтому естественно предположить, что в периоды смены направления ветра инерционные колебания могут доминировать в динамике моря. Период инерционных колебаний в исследуемом районе равен примерно 14 ч. В настоящей работе на основе данных моделирования и их сопоставительного анализа со спутниковыми изображениями видимого диапазона рассмотрена динамика Юго-Восточной Балтики в периоды, включающие моменты изменения интенсивности и направления ветрового воздействия. Получено, что в такие моменты в определённых районах Юго-Восточной Балтики в динамике верхнего слоя, действительно, доминируют инерционные колебания. Сопоставительный анализ спутниковых и модельных данных показал, что инерционные колебания оказывают существенное влияние на распространение взвешенного вещества по акватории моря, поступившего в него, в частности, из Вислинского залива.

Ранее также неоднократно отмечался факт, что распределение температуры в прибрежной области Юго-Восточной Балтики при апвеллинге неоднородно, отмечаются отдельные языки холодных вод, простирающиеся из прибрежной зоны в открытое море, при этом ширина зон апвеллинговых вод определяется топографическими особенностями исследуемого района, в частности крутизной склона. В настоящей работе показано, как крутизна склона именно в сочетании с ветром определённой скорости и направления (у западного побережья Самбийского п-ва) влияют на поле поверхностной скорости течения и, соответственно, на перенос вещества в поверхностном слое моря. При этом даже для ветров близких направлений результат может значимо различаться: в одном случае область распространения взвешенного вещества непосредственно прилегает к берегу, в другом находится на некотором удалении от берега.

В настоящей работе проводится исследование распространения взвешенного вещества в юго-восточной части Балтийского моря на основе численного моделирования при помощи Принстонской модели циркуляции океана (Princeton Ocean Model — POM) (Mellor, 2004) и анализа цветосинтезированных спутниковых изображений видимого диапазона приборов MSI ИСЗ Sentinel-2A, OLI ИСЗ Landsat-8, ETM+ ИСЗ Landsat-7 для летних периодов 2015, 2017 и 2018 гг. Следует отметить, что задача о распространении пассивной примеси может иметь широкий ряд практических приложений. Помимо задачи о распространении природных примесей и антропогенных веществ (сине-зелёных водорослей, нефтепродуктов, а также различных химических элементов, присутствующих в морской среде) от поверхностных источников, в рамках разработанного модельного комплекса можно исследовать особенности распространения примеси, выпущенной в различных слоях и областях моря, выявлять особенности взаимодействия прибрежных вод и вод открытого моря при различных гидродинамических процессах, таких как апвеллинг, даунвеллинг, мезо- и субмезомасштабные вихри.

Район исследования и спутниковые данные

Район наших регулярных спутниковых наблюдений гидродинамических процессов в юговосточной части Балтийского моря включает в себя такой важный объект с точки зрения формирования течений, как Гданьский залив, полузакрытый на северо-западе Хельской косой, а с восточной стороны — Вислинской косой и Самбийским полуостровом. Вислинская коса отделяет мелководный Вислинский (Калининградский) залив от собственно моря

(рис. 1). Обмен воды происходит через узкий Балтийский пролив, ширина которого составляет 400 м. длина — 2 км. средняя глубина — 8,8 м (вдоль фарватера — 10–12 м). Вислинский залив является лагуной — почти закрытым водоёмом, в котором в летний период происходит интенсивное цветение цианобактерий, сине-зелёных водорослей. Уровень водной поверхности на 5-8 см выше среднего уровня воды в Балтийском море. При ветрах восточных и южных румбов воды залива вытекают в Балтийское море. Сильное различие в оптических свойствах более чистых вод Балтийского моря и мутных вод залива в период интенсивного цветения фитопланктона позволяет проследить развитие и трансформацию струи вод залива на спутниковых изображениях видимого диапазона. Наиболее отчётливо вынос можно выделить на цветосинтезированных изображениях в естественных цветах (TrueColor), на которых он проявляется в виде светло-зелёной струи. Воды залива в зависимости от ветровых условий и под действием прибрежных течений



Рис. 1. Район исследования

распространяются либо вдоль Вислинской косы на юго-запад, либо вдоль Самбийского п-ва на северо-восток, достигая м. Таран и даже огибая его (см. *рис. 1*). Воды залива повышенной мутности являются своеобразным трассером прибрежных течений. Задачей настоящих исследований являлось сравнение результатов спутниковых наблюдений за водами, вытекающими из Вислинского залива, с результатами численного моделирования распространения взвеси, источник которой задавался на выходе из Балтийского пролива.

В качестве спутниковых данных использовались данные видимого диапазона сенсоров MSI Sentinel-2A, OLI Landsat-8, ETM+ Landsat-7, которые находятся в свободном доступе. Для формирования цветосинтезированных изображений в естественных цветах использовались следующие спектральные каналы: для MSI и OLI красный — 4-й, зелёный — 3-й, синий — 2-й каналы; для ETM+ красный — 3-й, зелёный — 2-й, синий — 1-й каналы. Пространственное разрешение выбранных каналов сенсора MSI составляет 10 м, для OLI и ETM+ оно равно 30 м. Относительно высокое пространственное разрешение этих спутниковых данных позволяет выделять воды залива с большой точностью. В настоящей работе использовались данные для безоблачных дней в августе 2015, 2017 и 2018 гг.

Постановка задачи численного моделирования переноса взвешенного вещества в Юго-Восточной Балтике

Численное гидродинамическое моделирование циркуляции и переноса взвешенного вещества в юго-восточной части Балтийского моря выполнялось на основе Принстонской модели циркуляции океана (POM), адаптированной для Балтийского моря. Для описания изменения концентрации взвешенного вещества на поверхности моря были выполнены численные расчёты адвективно-диффузионного уравнения концентрации трассера (Голенко, Голенко, 2014). В численных расчётах настоящей работы наличие трассера в морской среде не влияло на поле плотности, т.е. он являлся пассивным. В программный код численной модели была добавлена переменная, изменение которой описывается теми же уравнениями, что и изменение полей температуры и солёности. Отличие состоит лишь в том, что значение концентрации не входит в формулу расчёта плотности морской воды.

Вычисления проводились на сетке с горизонтальным разрешением 0,8×0,8 км, по вертикали было задано 36 сигма-слоёв. В зависимости от глубины толщина сигма-слоёв варьируется в пределах нескольких десятков сантиметров в поверхностном и придонном пограничных слоях и нескольких метров в остальной толще моря. Предполагается, что столь высокое горизонтальное разрешение позволит адекватно воспроизвести эволюцию мезо- и субмезомасштабных динамических структур в Юго-Восточной Балтике и связанную с ними изменчивость мутности вод, наблюдаемую на спутниковых изображениях в оптическом диапазоне. Поскольку настоящее исследование направлено исключительно на прибрежную зону Юго-Восточной Балтики, то для быстроты расчётов область моделирования была ограничена следующими значениями широты и долготы: 54,301-56,008° с.ш., 17,149-21,222° в.д. На открытых границах области моделирования было задано условие излучения (Андросов, Вольцингер, 2005). Для расчётов процессов в летний период 2015 г. атмосферное воздействие задавалось с использованием данных операционной метеорологической модели HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) (Männik, Merilain, 2007). Пространственное разрешение этих данных — 8 км, временная дискретность — 3 ч. Для летних периодов 2017 и 2018 гг. в качестве ветрового воздействия были использованы данные реанализа ERA5 базы данных ECMWF (https://www.ecmwf.int/), пространственное разрешение данных — около 30 км, временная дискретность — 1 ч. Начальные распределения полей температуры и солёности были взяты из базы данных COPERNICUS (http://marine.copernicus.eu/) на моменты начала расчётов.

Для описания изменения концентрации взвешенного вещества на поверхности моря были проведены модельные расчёты распространения трассера, выпущенного из точки (минипрямоугольника), расположенной на выходе из Вислинского залива (*puc. 2в*), для летних периодов 2015, 2017 и 2018 гг.

Результаты численных экспериментов

Эксперименты июля – августа 2015 г.

Для летнего периода 2015 г. расчёты проводились с 31 июля до 10 августа. Предварительный анализ цветосинтезированных спутниковых изображений, на которых прослеживается изменение со временем оптических свойств воды, связанных с повышенной концентрацией взвешенного вещества, показал, что в указанный период в прибрежной области в районе выхода вод Вислинского залива в Балтийское море, а также вдоль Самбийского п-ва формировались мезо- и субмезомасштабные вихревые структуры и струйные течения. В течение указанного времени они перемещались в пространстве и меняли очертания. На *рис. 2a* (см. с. 179) представлен фрагмент спутникового изображения ETM+ Landsat-7 от 3 августа 2015 г., на котором чётко прослеживается распространение вод Вислинского залива вдоль побережья Самбийского п-ва. Третьего августа повышенная концентрация взвеси наблюдалась вдоль всего Самбийского п-ва, но наиболее общирная область мутных вод располагалась у его северного побережья.

Это свидетельствует о том, что вынос вод из Вислинского залива происходил и за некоторое время до даты спутниковой съёмки. Поэтому было решено начать расчёты за несколько дней до 3 августа, а именно 31 июля. В начальный момент трассер имел постоянную концентрацию в параллелепипеде, ограниченном координатами 19,68° в.д., 19,86° в.д., 54,6° с.ш., 54,68° с.ш. и приповерхностным слоем толщиной 10 м.



Рис. 2а. Распространение взмученных вод Вислинского залива вдоль Самбийского п-ва. Фрагмент цветосинтезированного спутникового изображения ETM+ Landsat-7 от 03.08.2015



Рис. 26, в. Модельные распределения горизонтальной скорости течения (*б*) и концентрации пассивной примеси (*в*) в поверхностном слое Юго-Восточной Балтики на 03.08.2015, наложенные на батиметрию. Синими стрелками обозначена скорость ветра, чёрными — скорость течения. Чёрным жирным прямоугольником отмечен источник распространения трассера (*в*). Цветными овалами выделены области завихренности, которые наблюдаются в нижней части *рис. Ia.* На выноске представлены области завихренности в более крупном масштабе



Рис. 3а. Дальнейшее распространение мутных вод Вислинского залива вдоль Самбийского п-ва. Фрагмент цветосинтезированного изображения OLI Landsat-8 от 04.08.2015



Рис. 36, в. Модельные распределения горизонтальной скорости течения (б) и концентрации пассивной примеси (в) в поверхностном слое Юго-Восточной Балтики на 04.08.2015. Обозначения те же, что на *рис. 26, в.* Овалом выделена область завихренности, которая наблюдается на *рис. 3a*. На выноске представлена область завихренности в более крупном масштабе

На рис. 2в (см. с. 179) приведено модельное распределение концентрации трассера, соответствующее дате получения спутникового изображения; его положение и очертание в начальный момент на поверхности моря отмечено чёрным жирным прямоугольником. В первоначальном модельном эксперименте источник трассера являлся «мгновенным». При данном условии к 3 августа под воздействием поверхностного течения трассер отошёл на север и у первоначального источника он уже не наблюдался. Однако на спутниковом изображении (см. рис. 2а) видно, что 3 августа продолжался вынос вод из Вислинского залива и полоса мутных вод являлась непрерывной от выхода из залива до северного побережья Самбийского п-ва. При этом конфигурация модельного пятна трассера у северо-западного и северного побережий Самбийского п-ва согласуется с очертанием области повышенной концентрации взвешенного вещества в данном районе (для случая «мгновенного» источника рисунок не приведён). Условия запуска были изменены таким образом, что источник трассера продолжал непрерывно действовать в течение двух суток. При этом к 3 августа пятно трассера наблюдалось вдоль всего западного побережья Самбийского п-ва, а у северо-западного и северного побережий результат расчётов практически совпал с предыдущим. Таким образом, дальнейший анализ данных моделирования трассера и их сопоставление со спутниковыми изображениями было решено проводить для расчётов с заданием источника, непрерывно выпускающего трассер в период с 31 июля по 1 августа 2015 г. Совместный анализ данных моделирования приповерхностной скорости течения, концентрации трассера, а также скорости ветра (см. рис. 26, в) показал, что в период с 31 июля по 3 августа у побережья Самбийского п-ва наблюдалось вдольбереговое струйное течение, направленное на северовосток, соответствующее процессу даунвеллинга, сформировавшееся под воздействием западного, юго-западного и южного ветров, что вызвало распространение трассера вдоль побережья на север, а после достижения м. Таран — далее на северо-восток.

На спутниковом изображении OLI Landsat-8 от 4 августа 2015 г. (*рис. 3a*, см. с. 180) видно, что полоса вод с повышенным содержанием взвешенного вещества, расположенная у северного побережья Самбийского п-ва, за сутки существенно расширилась, её размер увеличился от 8 км (3 августа) до 14 км (4 августа).

Согласно модельным данным на 4 августа 2015 г., пятно трассера также расширилось под воздействием поверхностного течения, направленного на запад-северо-запад, сформировавшегося при восточном ветре с незначительной северной составляющей (см. рис. 36, в, см. с. 180). При этом трассер в большей степени оказался сосредоточенным в районе м. Таран, а не у северного побережья Самбийского п-ва, что наблюдается на спутниковом изображении. Отметим ещё одно сходство модельного распределения концентрации трассера и проявления вод повышенной мутности на изображении OLI Landsat-8. У северного побережья Самбийского п-ва наибольшая концентрация трассера и взвеси наблюдается в двух отстоящих друг от друга областях: непосредственно примыкающей к берегу и несколько удалённой в сторону открытого моря; при этом у м. Таран обе области смыкаются. Соответствующие рассматриваемому временному периоду (с 3 по 4 августа 2015 г.) модельные распределения приповерхностной скорости течения у северного побережья Самбийского п-ва показывают, что при смене направления ветра на восточное (с незначительной северной составляющей) в непосредственной близости от берега течение почти сразу, в течение 2-4 ч, поменяло направление на западное и сохраняло его при данном направлении ветра. В то же время в отстоящей от берега области течение сначала приняло направление на северо-запад, а затем возникли инерционные колебания (ИК), в результате чего отдельная область трассера переместилась на север.

7 августа 2015 г. область взмученных вод распространилась на более широкую акваторию (*puc. 4a*, см. с. 182). Отстоящие друг от друга области, описанные выше, разошлись на ещё большее расстояние, при этом они приняли вид V-образной структуры (на *puc. 4a* отмечено овалом).

Схожая структура очертания трассера сформировалась и при моделировании (*puc. 4e*, см. с. 182). Анализ временной серии распределения скорости ветра показал, что за некоторое время до наблюдаемой картины (5 августа) его направление в исследуемом районе довольно

резко менялось: с юго-восточного направления в течение 8 ч ветер изменился на противоположный в направлении по часовой стрелке (северо-западный). Вследствие этого область трассера хаотично перемещалась. Затем 7 августа в течение 8–10 ч ветер вновь изменился на юго-восточный, что привело к формированию интенсивных инерционных колебаний во всём рассматриваемом районе. Анализ приповерхностной скорости течения показал, что формирование V-образной структуры очертания трассера связано с тем, что в наиболее крутой области склона у м. Таран наблюдается область повышенных значений скорости течения (см., например, *рис. Зб* и 4*б*), что приводит к вымыванию трассера из этой области.



Рис. 4а. V-образная структура области взмученных вод у северной оконечности Самбийского полуострова (отмечена овалом). Цветосинтезированное изображение MSI Sentinel-2A от 07.08.2015



Рис. 46, в. Модельные распределения горизонтальной скорости течения (*б*) и концентрации пассивной примеси (*в*) в поверхностном слое Юго-Восточной Балтики на 07.08.2015. Обозначения те же, что на *рис. 26, в.* Овалами выделены области завихренности, которые наблюдается на *рис. 4а*

В частности, на *рис. 36* речь идёт о вдольбереговом струйном течении. Впоследствии две отдельные области повышенной концентрации трассера остаются разделёнными, что связано как с дальнейшим вымыванием трассера в самой крутой области склона, так и с тем, что вблизи берега течение в большей степени сохраняет вдольбереговое направление, в то время как в более отдалённой от берега области течение испытывает ИК.

К 10 августа 2015 г. область взмученных вод распространилась на ещё большую акваторию (*puc. 5a*). При этом также произошло её перемещение вдоль западного побережья Самбийского п-ва на юго-запад. На *puc. 5a* область мутной воды, которая появилась к 10 августа, выделена светлой фигурной линией.



Рис. 5а. Дальнейшая трансформация области взмученных вод. Вновь образовавшаяся область выделена светлой фигурной линией. Цветосинтезированное изображение MSI Sentinel-2A от 10.08.2015



Рис. 56, в. Модельные распределения горизонтальной скорости течения (б) и концентрации пассивной примеси (в) в поверхностном слое Юго-Восточной Балтики на 10.08.2015. Обозначения те же, что на *рис. 26, в*

Данные особенности прослеживаются и на модельном распределении трассера, представленном на *puc. 5в* (см. с. 183). На модельном распределении (и на спутниковом изображении) в поле концентрации взвешенного вещества ещё более чётко выделилась V-образная структура. В наиболее крутой области склона прослеживается усиление скорости вследствие формирования вдольберегового струйного течения (*puc. 5б*, см. с. 183), что приводит к вымыванию трассера из этой области и, соответственно, более чёткому проявлению V-образной структуры. У основания и левой верхней части V-образной структуры появились ответвления на запад. Анализ временной серии распределения поверхностной скорости течения показал, что 8 и 9 августа в Юго-Восточной Балтике наблюдались ИК, которые способствовали распространению взвешенного вещества на более широкую акваторию.

В пользу возможности возникновения инерционных колебаний в районе северного побережья Самбийского п-ва и их воспроизведения моделью говорит присутствие инерционных петель на траекториях дрифтеров и соответствующих модельных лагранжевых частиц. Один из примеров таких траекторий представлен на *рис. 6*. Траектория дрифтера была зарегистрирована во время эксперимента, проведённого сотрудниками Института космических исследований РАН в рамках ежегодной программы подспутниковых измерений в Юго-Восточной Балтике (Голенко и др., 2017; Krayushkin et al., 2019). Траектории дрифтера и модельной лагранжевой частицы начались в точке с координатами 54,627° с. ш. и 19,794° в. д., расположенной на траверзе выхода из Вислинского залива, вблизи изобаты 20 м. Время начала траектории — 13:57 GMT 8 августа 2018 г., время конца — 01:21 GMT 13 августа 2018 г. Не останавливаясь на подробностях дрифтерного и соответствующего модельного экспериментов 2018 г., опишем основной их результат. Дрифтер и модельная частица распространились от выхода из Вислинского залива вдоль всего Самбийского п-ва до Куршской косы. При этом, обогнув м. Таран, дрифтер и модельная частица совершили инерционное колебание, которое проявляется в виде петли, описанной в направлении по часовой стрелке.

Ранее в литературе уже были описаны подобные проявления инерционных колебаний на спутниковых снимках в виде круговых сликов веществ на поверхности моря либо в виде шлейфов, окаймляющих границы областей, занятых инерционными колебаниями (Лаврова, Сабинин, 2016).

Следует отметить, что для ситуаций, наблюдаемых 3 и 4 августа, на модельном распределении скорости приповерхностного течения, как и на спутниковых изображениях, прослеживаются вихревые образования в прибрежной зоне Гданьского залива (на *рис. 26, в* и *36, в* они отмечены овалами). Для ситуаций, наблюдаемых 7 и 10 августа, прибрежная вихревая активность в Гданьском заливе не столь явно выражена, но отмечаются отчётливые вихревые структуры в его центре. Поскольку модельные расчёты проводились для ограниченной обла-



сти, охватывающей лишь Юго-Восточную Балтику, с заданием условия излучения на открытых границах (Андросов, Вольцингер, 2005), то близкого соответствия модельных и реальных вихревых образований в центре Гданьского залива не наблюдается. Однако в областях, близких к местоположению вихревой структуры, на модельных данных отмечаются области завихренности того же знака, что и в реальных вихрях (на *рис. 4б, в* они также отмечены овалами).

Рис. 6. Распределение глубин в Юго-Восточной Балтике, на которое наложены траектория дрифтера, обозначенная красной линией, и траектория соответствующей модельной лагранжевой частицы, обозначенная синей линией. Начало траекторий отмечено точкой

Также отметим, что вблизи источника на всех модельных распределениях концентрация трассера существенно выше концентрации взвеси, наблюдаемой на спутниковых изображениях. Это связано с отсутствием точных сведений о продолжительности действия источника, и, видимо, в модели продолжительность была больше реальной. Сопоставляя анализируемые спутниковые снимки с распределениями абсолютного значения приповерхностной скорости течения, как правило, наблюдаем близкое пространственное соответствие областей повышенной концентрации взвешенного вещества и повышенных значений скорости течения. В отдельных случаях (см., например, *puc. 56, в*) данное соответствие является даже более близким, чем соответствие концентрации взвешенного вещества и трассера. Причиной этому также может послужить то, что время действия модельного источника трассера было лишь приблизительным.

Эксперимент августа 2017 г.

В августе 2017 г. в районе Самбийского п-ва стояла преимущественно облачная погода, что не позволило проводить спутниковые наблюдения с высоким пространственным разрешением в видимом диапазоне. Единственным днём, пригодным для наблюдений, оказалось 16 августа, когда было получено два квазисинхронных изображения с разницей в 11 мин: OLI Landsat-8 в 09:43 GMT и MSI Sentinel-2A в 09:54 GMT. На обоих изображениях хорошо идентифицируется вынос вод из Вислинского залива повышенной мутности и их дальнейшее распространение вдоль Самбийского п-ва (*рис. 7a*, см. с. 186). Были проведены модельные расчёты распространения трассера, выпущенного из точки, расположенной на выходе из Вислинского (Калининградского) залива в августе 2017 г., и выполнено сравнение результатов моделирования с данными спутникового зондирования от 16 августа 2017 г. Модельные расчёты проводились для временного интервала 7–22 августа 2017 г. Источник трассера «работал» с 12 по 16 августа.

На изображении MSI Sentinel-2A от 16 августа 2017 г. (см. puc. 7a) видно, что область повышенной мутности наблюдалась вдоль всего западного побережья Самбийского п-ва. Это говорит о том, что вынос вод из Вислинского залива происходил и за некоторое время до даты спутниковой съёмки. Поэтому, как и для экспериментов 2015 г., было принято решение запустить трассер за несколько суток до 16 августа и продолжать действие его источника до даты спутниковой съёмки. На рис. 76, в (см. с. 186) приведены модельные распределения поверхностной скорости течения и концентрации трассера, соответствующие дате получения спутникового изображения. Сходство результатов численного моделирования со спутниковым изображением состоит в том, что трассер, как и взвесь, распространялся вдоль западного побережья Самбийского п-ва в направлении м. Таран. Вблизи источника области трассера и взвеси шире, чем более отдалённые области их распространения. Различие состоит в том, что наибольшая концентрация взвеси наблюдается на отдалении от берега, а область наибольшей концентрации трассера непосредственно примыкает к берегу. Модель также не воспроизвела «пульсирующего» характера распространения взвеси. Вероятно, это было вызвано порывистостью ветра, которая не отображена в данных ветра, используемых для модельных расчётов. При этом на некотором отдалении от источника трассера наблюдается локальный максимум его концентрации. Это говорит о том, что ветер, задаваемый в модели, также усиливался и ослабевал.

Анализ распределения приповерхностной скорости течения на всём этапе моделирования распространения трассера (с 12 по 22 августа 2017 г.) показывает, что в течение данного периода у западного побережья Самбийского п-ва наблюдалось течение с преобладанием составляющей, направленной на север. На начальном этапе распространения трассера, с 10 по 16 августа, течение было направлено на северо-восток, его скорость не превышала 0,2 м/с (см. *рис. 76, в*). Следует отметить, что формирование течения, направленного на север у западного побережья Самбийского п-ва, происходило при воздействии юго-западного ветра, однако течение не имело выраженный струйный характер. Далее на протяжении всего оставшегося времени вдоль Самбийского п-ва периодически формировалось струйное течение, направленное на север со скоростью до 0,3 м/с (рисунки не приведены в статье). На этапах существования струйного течения распространение трассера вдоль Самбийского п-ва ускорялось, при этом область трассера сужалась.



Рис. 7а. Распространение пульсирующей струи взмученных вод Вислинского залива вдоль Самбийского п-ва. Фрагмент цветосинтезированного спутникового изображения MSI Sentinel-2A от 16.08.2017



Рис. 76, в. Модельные распределения горизонтальной скорости течения (б) и концентрации пассивной примеси (в) в поверхностном слое Юго-Восточной Балтики на 16.08.2017. Обозначения те же, что на *рис. 26, в.* Прямоугольником выделена область, которую охватывает спутниковое изображение, представленное на *рис. 7а.* Чёрным жирным прямоугольником отмечен источник распространения трассера (в)

Совместный анализ квазисинхронных данных OLI Landsat-8 и MSI Sentinel-2A, полученных с разницей в 11 мин, показал, что 16 августа скорость в центральной части выноса на пульсирующих участках составляла 0,4–0,5 м/с, а направление распространения было северо-северо-восточным.

Отличительной особенностью динамики вод в анализируемый период является отсутствие ИК, которые часто проявляются в виде петель на траекториях дрифтеров, выпускаемых в исследуемом районе (Голенко и др., 2017). Как результат, область распространения трассера в рассматриваемый период времени является компактной и непрерывной.

Эксперимент августа 2018 г.

Особенность распространения взвеси вдоль западного побережья Самбийского п-ва в августе 2017 г., состоящая в том, что наибольшая её концентрация в поверхностном слое наблюдается на отдалении от берега, была воспроизведена при численном моделировании для начала августа 2018 г. Изначально задача моделирования августа 2018 г. была направлена на воспроизведение распределения взвешенного вещества в районе м. Таран, источником которого, предположительно, также являлся Вислинский залив. При этом при анализе данных моделирования было отмечено, что на этапе распространения взвеси вдоль западного побережья Самбийского п-ва область её наибольшей концентрации отклонилась от берега в сторону открытого моря, подобно тому, как отмечается на спутниковом снимке от 16 августа 2017 г. (см. *рис. 7а*). Было решено представить в данной работе результаты моделирования приповерхностной скорости течения и концентрации взвеси для августа 2018 г., а также охарактеризовать метео- и гидродинамические условия, вызвавшие вышеописанное отклонение области распространения взвешенного вещества.

Рис. 8. Модельные распределения горизонтальной скорости течения (*a*) и концентрации пассивной примеси (*б*) в поверхностном слое Юго-Восточной Балтики на 06.08.2018. Обозначения те же, что на *рис. 26, в.* Чёрным жирным прямоугольником отмечен источник распространения трассера (*б*). Передний фронт области трассера находится на отдалении от берега

Численные расчёты были начаты с 1 августа 2018 г., источник трассера стал действовать спустя двое суток, т.е. 3 августа, продолжительность его действия составляла 1 сут. На *рис. 8* представлены результаты численного моделирования приповерхностной скорости течения и концентрации взвешенного вещества на 6 августа 2018 г. Анализ распределения скорости показывает, что в районе западного побережья Самбийского п-ва сформировалось вдольбереговое струйное течение, направленное на север со скоростью до 0,3 м/с. При этом наиболь-

шие скорости наблюдаются только на отдалении от берега в самой крутой области склона (в районе изобат 40–70 м), а вблизи берега скорости течения малы и составляют 0,05–0,1 м/с. Поэтому часть пятна трассера, находящаяся над более крутой и глубоководной областью склона, переносится струйным течением на север быстрее, чем та часть пятна, которая прилегает к берегу. Описанная картина течения сформировалась при западном ветре со скоростью около 10 м/с. В период времени, когда выполнялся запуск трассера в августе 2017 г., наблюдались ветра близких направлений — юго-западный и северо-западный со скоростью около 8 м/с, однако в модели они не вызвали вышеописанного струйного течения на отдалении от берега.

Выводы и заключение

Сопоставительный анализ цветосинтезированных спутниковых изображений видимого диапазона с данными численного моделирования приповерхностной скорости течения и концентрации трассера, источником которого являлся Вислинский залив, для летних периодов 2015 и 2017 и 2018 гг. показал следующее:

1. В августе 2015 г. распространение взвешенного вещества вдоль западного побережья Самбийского п-ва происходило под воздействием вдольберегового струйного течения, сформировавшегося при воздействии ветра с доминирующей западной составляющей. В районе м. Таран, когда направление ветра изменилось на преимущественно восточное со скоростью около 10 м/с, в наиболее крутой области склона возникло интенсивное струйное течение, направленное на запад. В этом районе область трассера раздвоилась: сформировались отдельные области повышенной концентрации трассера в непосредственной близости от берега и на отдалении от него. На распространение трассера на отдалении от берега существенное влияние оказали ИК, вследствие которых область трассера существенно расширилась, распространилась в сторону открытого моря, а также произошло её «закручивание».

2. В августе 2017 и 2018 гг. распространение трассера вдоль западного побережья Самбийского п-ва происходило под воздействием нагонных, а также вдольбереговых струйных течений. В рассматриваемый период 2017 г. струйное течение было узким и непосредственно прилегало к берегу, в 2018 г. — широким и интенсивным, его наибольшие скорости наблюдались на некотором отдалении от берега в наиболее крутой области склона. Это различие в поле скорости определило особенности распределения взвешенного вещества в районе западного побережья Самбийского п-ва: в 2017 г. область распространения взвешенного вещества в районе западного побережья Самбийского п-ва: в 2018 г. она находилась на некотором удалении от берега. При этом в обоих случаях в районе распространения трассера инерционные колебания отсутствовали. В первом случае скорость ветра была относительно низкой, пре-имущественно до 8 м/с, и менялась в секторе направлений от юго-западного до северо-западного. Во втором — формирование струйного течения на отдалении от берега произошло при воздействии западного ветра со скоростью до 10 м/с. В обоих случаях область распространения на трассера инерциотранения трассера являлась компактной и неразрывной.

Авторы выражают благодарность Д. М. Соловьеву (Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь) за помощь в обработке спутниковых изображений.

Настройка численной модели для расчётов концентрации трассера с различным действием источника выполнена в рамках государственного задания Института океанологии РАН (тема № 0149-2019-0013), сопоставительный анализ данных моделирования концентрации трассера с данными спутниковых снимков взвеси выполнен при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-00715).

Литература

- 1. *Андросов А.А., Вольцингер Н.Е.* Проливы мирового океана. Общий подход к моделированию. СПб.: Наука, 2005. 187 с.
- 2. *Гинзбург А. И., Булычева 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. DOI: 10.7868/S0030157415060064.
- 3. *Голенко М. Н., Голенко Н. Н.* Исследование распространения пассивной примеси и лагранжевых частиц в прибрежной зоне Юго-Восточной части Балтийского моря // Вест. Балтийского федерального ун-та им. Иммануила Канта. Сер. «Естественные науки». 2014. Вып. 1. С. 42–50.
- 4. *Голенко Н. Н., Голенко М. Н., Щука С.А.* Наблюдение и моделирование апвеллинга в юго-восточной Балтике // Океанология. 2009. Т. 49. № 1. С. 20–27.
- 5. Голенко М. Н., Голенко Н. Н., Буканова Т. В. Исследование структурных особенностей прибрежных термохалинных фронтальных зон в Юго-Восточной части Балтийского моря по данным численного моделирования и космического мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 125–135.
- 6. *Голенко М. Н., Краюшкин Е. В., Лаврова О. Ю.* Исследование особенностей прибрежных поверхностных течений в Юго-Восточной Балтике по результатам подспутниковых дрифтерных 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.
- 7. Журбас В. М., Стипа Т., Малкки П., Пака В. Т., Кузьмина Н. П., Скляров В. Е. Мезомасштабная изменчивость апвеллинга в юго-восточной Балтике: ИК-изображения и численное моделирование // Океанология. 2004. Т. 44. № 5. С. 660–669.
- 8. *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.
- 9. Краюшкин Е. В., Лаврова О. Ю., Назирова К. Р., Алферьева Я. О., Соловьев Д. М. Формирование и распространение вихревого диполя за мысом Таран в Юго-Восточной Балтике // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 214–221. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221.
- 10. Лаврова О. Ю., Сабинин К.Д. Проявления инерционных колебаний на спутниковых изображениях морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 60–73. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-21-60-73.
- 11. 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. 472 с.
- 12. Лаврова О. Ю., Краюшкин Е. В., Соловьев Д. М., Голенко М. Н., Голенко Н. Н., Калашникова Н. А., Демидов А. Н. Влияние ветрового воздействия и гидродинамических процессов на распространение вод Калининградского залива в акватории Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 76–99.
- Golenko M. N., Golenko N. N., Emelyanov E. M., Nekrasov M. A. Role of quasi-geostrophic currents and inertial waves in elution of fine sediments in the southeastern part of the Baltic // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2017. V. 195. P. 60–68. DOI: 10.1016/j.ecss.2017.01.004.
- 14. *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. DOI: 10.5697/oc.54-4.631.
- 15. *Gurova E., Lehmann A., Ivanov A.* Upwelling dynamics in the Baltic Sea studied by a combined SAR/infrared satellite data and circulation model analysis // Oceanologia. 2013. V. 55(3). P. 687–707.
- Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Y., Mityagina M. I. Satellite Remote Sensing of Submesoscale Eddies in the Russian Seas // The Ocean in Motion: Circulation, Waves, Polar Oceanography / eds. Velarde M., Tarakanov R., Marchenko A. Springer, Cham, Switzerland, 2018. P. 397–413. URL: https:// doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_24.
- 17. *Krayushkin E., Lavrova O., Strochkov A.* Application of GPS/GSM Lagrangian mini-drifters for coastal ocean dynamics analysis // Russian J. Earth Science. 2019. V. 19. ES1001. DOI: 10.2205/2018ES000642.
- Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Strochkov A. Ya. Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: satellite observations and concurrent measurements // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE 10784. 2018. 1078404. DOI: 10.1117/12.2325463.
- 19. *Männik A.*, *Merilain M.* Verification of different precipitation forecasts during extended winter-season in Estonia // HIRLAM Newsletter. 2007. V. 52. P. 65–70.

- 20. *Mellor G. L.* User's Guide for a Three-dimensional, Primitive Equation, Numerical Model. The revision: Program in Atmospheric and Oceanic Sciences. Princeton University, Princeton, NJ, 2004. 56 p.
- 21. *Zhurbas V., Laanemets J., Vahteraa E.* Modeling of the mesoscale structure of coupled upwelling/down-welling events and the related input of nutrients to the upper mixed layer in the Gulf of Finland, Baltic Sea // J. Geophysical Research. 2008. V. 113. C05004. DOI: 10.1029/2007JC004280.

Investigation of the dynamics of stream currents along the coast of the Sambian Peninsula (South-Eastern Baltic) based on numerical modeling and analysis of ocean color satellite images

M. N. Golenko¹, O. Yu. Lavrova²

 ¹ P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: m.golenko@yahoo.com
² Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: olga-yu-lavrova@mail.ru

On the basis of numerical modeling of passive admixture propagation and available satellite data, the process of propagation of the Vistula Lagoon waters with an increased concentration of suspended matter along the coast of the Sambian Peninsula of the South-Eastern Baltic is considered. Various regimes of water propagation are described: under the influence of alongshore stream currents as well as with the significant influence of inertial oscillations, which manifests in the distribution of zones of atmospheric forcing causing these regimes of water propagation are described. It was obtained that in the Cape Taran region, when the wind direction changed from western to eastern with a speed of about 10 m/s, a stream current arose that was most intense in the steepest area of the slope. In this area, the zone of increased tracer concentration split into separate zones, adjacent to the coast and at a distance from the coast. The propagation of the tracer at a distance from the coast in the considered by inertial oscillations that occurred when the wind direction changed of time was significantly affected by inertial oscillations that occurred when the wind direction change of its direction, the area of distribution of the tracer was compact and continuous.

Keywords: numerical modeling, satellite images of ocean color data, passive tracer, alongshore stream currents, inertial oscillations

Accepted: 14.08.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-175-191

References

- 1. Androsov A.A., Voltzinger N.E., *Prolivy mirovogo okeana. Obshchii podkhod k modelirovaniyu* (World ocean straits. A general approach to modeling), St. Petersburg: Nauka, 2005, 187 p.
- Ginzburg A. I., Bulycheva E. V., Kostianoy A. G., Solovyev D. M., Vortex dynamics in the southeastern Baltic Sea from satellite radar data, *Oceanology*, 2015, Vol. 55(6), pp. 805–813, https://doi.org/10.1134/ S0001437015060065.
- 3. Golenko M. N., Golenko N. N., Issledovanie rasprostraneniya passivnoi primesi i lagranzhevykh chastits v pribrezhnoi zone Yugo-Vostochnoi chasti Baltiiskogo morya (A study into the passive tracer and Lagrangian particles propagation in the coastal area of South-East Baltic), *Vestnik Baltiiskogo Federal'nogo universiteta im. Immanuila Kanta, Ser. "Estestvennye nauki"*, 2014, Issue 1, pp. 42–50.
- 4. Golenko N. N., Golenko M. N., Shchuka S. A., Observation and modeling of upwelling in the Southeastern Baltic, *Oceanology*, 2009, Vol. 49, No. 1, pp. 15–21, https://doi.org/10.1134/S0001437009010020.
- 5. Golenko M. N., Golenko N. N., Bukanova T. V., Issledovanie strukturnykh osobennostei pribrezhnykh termokhalinnykh frontal'nykh zon v Yugo-Vostochnoi chasti Baltiiskogo morya po dannym chislennogo

modelirovaniya I kosmicheskogo monitoringa (Investigation of structural features of coastal thermohaline frontal zones in the South-East Baltic from numerical model and satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 125–135.

- Golenko M. N., Krayushkin E. V., Lavrova O. Yu., Issledovanie osobennostei pribrezhnykh poverkhnostnykh techenii v Yugo-Vostichnoi 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, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-280-296.
- Zhurbas V. M., Stipa T., Mälkki P., Paka V. T., Kuz'mina N. P., Sklyarov V. E., Mesoscale Variability of the Upwelling in the Southeastern Baltic Sea: IR Images and Numerical Modeling, *Oceanology*, 2004, Vol. 44, No. 5, pp. 619–628.
- 8. Karimova S. S., Lavrova O. Y., 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.
- 9. Krayushkin E. V., Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Alferyeva Ya. O., Soloviev D. M., Formirovanie i rasprostranenie vikhrevogo dipolya za mysom Taran v Yugo-Vostochnoi Baltike (Formation and propagation of an eddy dipole at Cape Taran in the southeast Baltic Sea), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 214–221, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221.
- 10. Lavrova O. Yu., Sabinin K. D., Proyavleniya inertsionnykh kolebanii na sputnikovykh izobrazheniyakh morskoi poverkhnosti (Manifestations of inertial oscillations in satellite images of the sea surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 60–73, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-21-60-73.
- Lavrova O. Yu., Kostianoy 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, 472 p.
- Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Solovyev D. M., Golenko M. N., Golenko N. N., Kalashnikova N. A., Demidov A. N., Vliyanie vetrovogo vozdestviya i gidrodinamicheskikh protsessov na rasprostranenie vod Kaliningradskogo zaliva v akvatorii Baltiskogo morya (Influence of wind and hydrodynamic processes on propagation of the Vistula Lagoon waters into the Baltic Sea), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 76–99.
- Golenko M. N., Golenko N. N., Emelyanov E. M., Nekrasov M. A., Role of quasi-geostrophic currents and inertial waves in elution of fine sediments in the southeastern part of the Baltic, *Estuarine*, *Coastal and Shelf Science*, 2017, Vol. 195, pp. 60–68, DOI: 10.1016/j.ecss.2017.01.004.
- Gurova E., Chubarenko B., Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the southeastern Baltic, *Oceanologia*, 2012, Vol. 54(4), pp. 631–654, DOI: 10.5697/oc.54-4.631.
- 15. Gurova E., Lehmann A., Ivanov A., Upwelling dynamics in the Baltic Sea studied by a combined SAR/infrared satellite data and circulation model analysis, *Oceanologia*, 2013, Vol. 55, No. 3, pp. 687–707.
- Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Y., Mityagina M. I., Satellite Remote Sensing of Submesoscale Eddies in the Russian Seas, In: *The Ocean in Motion, Circulation, Waves, Polar Oceanography*, Velarde M., Tarakanov R., Marchenko A. (eds.), Springer, Cham, Switzerland, 2018, pp. 397–413, available at: https:// doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_24.
- 17. Krayushkin E., Lavrova O., Strochkov A., Application of GPS/GSM Lagrangian mini-drifters for coastal ocean dynamics analysis, *Russian J. Earth Science*, 2019, Vol. 19, ES1001, DOI: 10.2205/2018ES000642.
- 18. Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Nazirova K. R., Strochkov A. Ya., Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: satellite observations and concurrent measurements, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, Proc. SPIE 10784*, 2018, 1078404, DOI: 10.1117/12.2325463.
- 19. Männik A., Merilain M., Verification of different precipitation forecasts during extended winter-season in Estonia, *HIRLAM Newsletter*, 2007, Vol. 52, pp. 65–70.
- 20. Mellor G. L., *User's Guide for a Three-dimensional, Primitive Equation, Numerical Model. The revision,* Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University, Princeton, NJ, 2004, 56 p.
- 21. Zhurbas V., Laanemets J., Vahteraa E., Modeling of the mesoscale structure of coupled upwelling/downwelling events and the related input of nutrients to the upper mixed layer in the Gulf of Finland, Baltic Sea, *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, C05004, DOI: 10.1029/2007JC004280.