

Исследование особенностей прибрежных поверхностных течений в Юго-Восточной Балтике по результатам подспутниковых дрейфтерных экспериментов и численного моделирования

М.Н. Голенко¹, Е.В. Краюшкин², 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-mails: box_evk@mail.ru, olavrova@iki.rssi.ru

В работе представлены результаты подспутниковых экспедиционных работ, проведенных в летние периоды 2015–2016 гг. в акватории Юго-Восточной Балтики в районе Самбийского полуострова. Выполнен анализ и численное моделирование траекторий двух дрейфтеров, выпущенных в море во время подспутниковых экспериментов. Показано, что характер дрейфа лагранжевых буев может существенно отличаться из года в год, что во многом объясняется ветровыми условиями и степенью активности вихревой динамики в регионе. Проведено численное моделирование распространения лагранжевых дрейфтеров на основе численной Принстонской модели океана (РОМ), адаптированной к району Юго-Восточной Балтики, со встроенным блоком расчета траекторий лагранжевых частиц. В большинстве случаев получено близкое соответствие траекторий распространения модельных лагранжевых частиц и дрейфтеров. Определены районы и метеосостояния, при которых дрейфтеры совершают в основном адвективное перемещение, при этом ИК (инерционные колебания) не оказывают на них существенного влияния. Также описаны условия, при которых в динамике преобладают ИК, которые «захватывают» частицы, и под их воздействием они описывают замкнутые петли с диаметром ~2–6 км (в приповерхностном слое). Диаметр и форма петель существенно зависят от фоновых течений.

Ключевые слова: подспутниковые эксперименты, поверхностная циркуляция, лагранжевы дрейфтеры, численное моделирование, РОМ, Юго-Восточная Балтика

Одобрена к печати: 05.12.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-280-296

Введение

Циркуляция вод в Юго-Восточной Балтике определяется в первую очередь сильно изменяющимся полем ветра. Поскольку юго-восточная часть Балтийского моря находится, как правило, на южной периферии циклонов, зарождающихся в районе Исландского минимума, то в данном регионе преобладают западные ветра. Тем не менее розы ветров для данного района не являются анизотропными. Западные ветра время от времени сменяются ветрами с преобладанием северного, восточного и южного направлений. Это связано с тем, что траектории циклонов могут меняться, а общая циркуляция атмосферы может подвергаться влиянию полярных, сибирских, азорских и др. антициклонов. Ветровая ситуация над Балтикой изменчива: ветер одного направления, как правило, не наблюдается больше 2-3 дней (Mietus, 1998). По этой причине в Балтике и, в частности, ее юго-восточной части отсутствуют квазипостоянные течения. Во время натурных наблюдений при помощи акустического профилографа течений (ADCP) в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики неоднократно регистрировались вдольбереговые струйные течения разных направлений со скоростью, достигающей 40 см/с, а также вихревые структуры и ИК (Голенко, Голенко, 2012; Голенко и др., 2009; Лаврова и др., 2014, Lavrova et al., 2016).

Как показывают спутниковые наблюдения, район Юго-Восточной Балтики характери-

зуется большой вихревой активностью, особенно в Гданьском заливе, где часто наблюдаются циклонические и антициклонические вихри, а также вихревые диполи и струи (Гинзбург и др., 2015; Лаврова и др., 2011, 2016; Lavrova et al., 2008, 2010; Gade et al., 2012). Диаметры вихревых структур, проявляющихся на спутниковых изображениях, изменяются в широком диапазоне от 2 до 25 км, т.е. наблюдаются как субмезомасштабные вихри (с диаметрами, меньшими бароклинного радиуса деформации Россби Rd), так и мезомасштабные, диаметры которых больше Rd . Для Балтийского моря Rd варьируется в диапазоне 5–20 км в зависимости от глубины и сезонной стратификации (Osinski et al., 2010). Вихри, вихревые диполи и вихревые кластеры, как циклонического, так и антициклонического направлений вращения, регулярно наблюдаются как в самом Гданьском заливе, так и к северу и востоку от м. Таран. Основная причина их формирования, по-видимому, определяется предшествующими ветровыми условиями (Гинзбург и др., 2015; Лаврова и др., 2011, 2016; Gade et al., 2012). Эти вихревые структуры, наряду с прибрежными течениями, оказывают существенное влияние на распространение загрязнений в акватории моря. Учитывая, что данный район является, с одной стороны, районом активного судоходства, а с другой — важнейшей рекреационной зоной, исследование характера прибрежных течений становится насущной практической задачей.

В данной статье рассматривается относительно новый метод исследования прибрежных течений — использование лагранжевых дрейфтеров или буев. Результаты дрейфтерных экспериментов, проведенных нами в районе Самбийского полуострова, сравнивались с результатами численного моделирования, адаптированными для района Юго-Восточной Балтики.

Методика проведения дрейфтерных экспериментов

В последние годы для изучения течений в Мировом океане успешно используются пассивные дрейфующие лагранжевы буи (дрейфтеры), способные нести подводный парус различных размеров и глубины расположения (Tolstosheev, 2010). Лагранжев метод подразумевает использование координат, связанных с положением пассивной частицы, в нашем случае дрейфтеров, в наблюдаемом поле течений в каждый момент времени. Использование лагранжевых буев позволяет изучать поля течений и их характерные особенности в довольно длительные промежутки времени, например, основываясь на информации о вовлечении дрейфтеров в циркуляционные процессы, об остановках в дрейфе, о смене направления распространения; а также получать результаты в режиме реального времени.

Дрейфтер, как правило, имеет надводную и подводную (парус) части. Для уменьшения прямого влияния ветра на движение дрейфтера его подводная часть по площади сечения намного превосходит надводную часть (*рис. 1*). Подводный парус может иметь различную площадь, форму и глубину расположения, что определяет тот объем жидкости, о перемещении которого мы получаем данные. Для определения местоположения дрейфтеров в настоящее время активно применяются глобальные навигационные спутниковые системы (GPS). К преимуществам GPS относятся: отсутствие необходимости в прямом наблюдении позиционируемого

объекта, высокая точность определения координат, большая автономность работы, полное покрытие Мирового океана сигналами GPS, всепогодность наблюдений, компактность и экономичность пользовательской аппаратуры, возможность ее объединения с радио, GSM или спутниковым передатчиком для передачи данных в режиме реального времени (Сильвестрова и др., 2016).

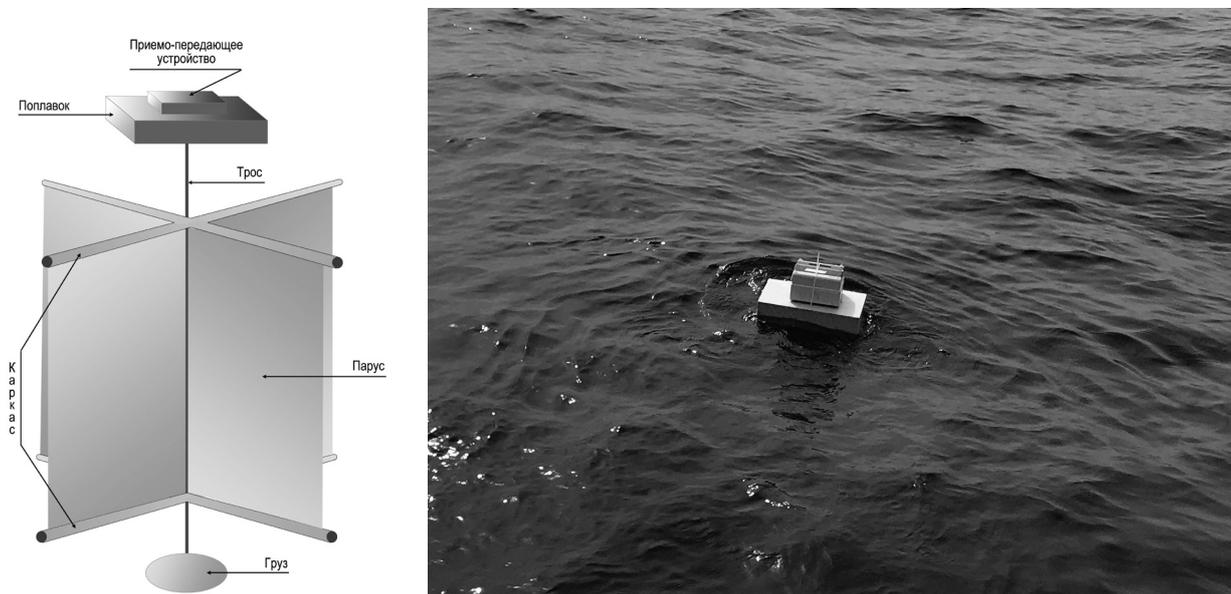


Рис. 1. Схема конструкции лагранжевого буя (слева); запуск буя в море (справа)

В ходе подспутниковых экспедиционных работ в юго-восточной части Балтийского моря в 2015 и 2016 гг. одновременно с буксировкой ADCP с маломерного судна были запущены серии лагранжевых дрейфтеров. 2 августа 2015 г. в акваторию Балтийского моря на траверзе мыса Таран было выпущено два лагранжевых дрейфтера в точках с координатами: $55,0341^{\circ}$ с.ш., $20,0117^{\circ}$ в.д. и $55,0031^{\circ}$ с.ш., $20,0143^{\circ}$ в.д. Дрейфтеры были запущены в ходе выполнения стандартного океанографического разреза на расстоянии $\sim 3,5$ км друг от друга. 28 июля 2016 г. также в районе мыса Таран был запущен один дрейфтер в точке с координатами: $55,0145^{\circ}$ с.ш., $19,8581^{\circ}$ в.д. В обоих экспериментах подводный парус дрейфтера имел площадь 1 м^2 и располагался на глубине в интервале 4–5 м от поверхности воды. Передача данных в реальном времени осуществлялась через GSM-канал связи. Рассмотрим сначала эксперимент 2016 г., в момент проведения которого, как показали спутниковые изображения, вблизи берега вихревых структур не наблюдалось.

Результаты дрейфтерного эксперимента 2016 г.

В 2016 г. были проведены экспедиционные работы в Балтийском море в районе Самбийского полуострова в период с 19 июля по 1 августа. В ходе экспедиционных работ проводилась съемка параметров течений при помощи акустического профилографа течений ADCP, закрепленного на маломерном судне. По ходу выполнения съемки осуществлялось зондирование

толщи вод при помощи СТД-зонда и датчика общей мутности вод. На период проведения подспутниковых измерений и дрейфа буя было получено 11 радиолокационных изображений (РЛИ), из них шесть РЛИ SAR-C Sentinel-1A (21, 23, 28 и 30 июля, 2 и 4 августа), четыре РЛИ Radarsat-2 (22, 25 июля, 1 и 4 августа) и одно РЛИ TerraSAR-X (29 июля). Поскольку большую часть времени стояла облачная погода, изображения видимого диапазона оказались информативными только за три дня: 20, 21 и 27 июля. Анализ всех полученных спутниковых изображений показал, что в районе проведения экспериментальных работ не наблюдалось никаких фоновых гидродинамических процессов, которые могли бы повлиять на прибрежные течения. На РЛИ Radarsat-2 от 25 июля (рис. 2а) и на цветосинтезированном изображении Modis Aqua от 27 июля (рис. 2б) хорошо проявляются вихревые структуры, в частности вихревой диполь, но они находились на достаточном отдалении от западного побережья Самбийского полуострова, где проводился дрейферный эксперимент.

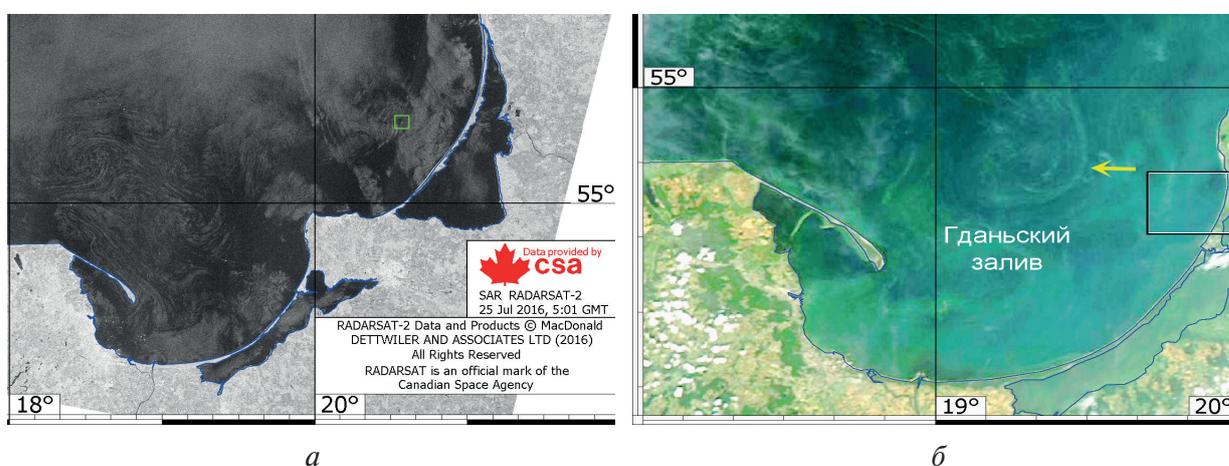


Рис. 2. Проявление вихревых структур в Гданьском заливе на спутниковых изображениях: а) РЛИ Radarsat-2 от 25.07.2016; б) MODIS Aqua от 27.07.2016; зеленым квадратом отмечено положение нефтяной платформы D-6; б) MODIS Aqua от 27.07.2016. Квадрат отмечает положение траектории дрейфера за период 30–31 июля 2016 г., когда наблюдались инерционные колебания. Стрелка указывает на проявление вихревого диполя (Лаврова, Сабинин, 2016)

В ходе экспедиционных работ в момент запуска дрейфера 28 июля 2016 г. по данным судовой метеостанции наблюдался ветер преимущественно северо-восточных румбов со скоростями, не превышающими 5 м/с. Скорость течения на глубине 4 м, как показывали измерения с помощью ADCP, составляла 25 см/с, направление течения — западное-юго-западное.

На рис. 3 показана траектория движения лагранжевого дрейфера во время эксперимента 2016 г.

Дискретность передачи данных в настоящем эксперименте составляла 30 мин. Вследствие слабого GSM-сигнала в регионе запуска связь с дрейфером была практически сразу же потеряна за исключением нескольких удачных сеансов. Скорость распространения дрейфера при запуске составляла 30 см/с. Примечательно, что мгновенная скорость распространения буя близка по абсолютному значению к осредненной величине скорости наблюдаемых течений по данным ADCP на той же глубине. Направление распространения дрейфера на начальном этапе также соответствует направлению местных течений в момент запуска, измеренных

при помощи ADCP. Для дальнейшего восстановления характера дрейфа буя на участках с потерянным сигналом GSM была принята скорость на момент его запуска. Сопоставление пройденного расстояния дрейфтером до момента появления устойчивого сигнала GSM со скоростью движения буя при запуске дает основания говорить, что траектория движения буя не осложнялась какими-либо циркуляционными процессами. Дрейф происходил квазиравномерно. Следующим отличительным этапом дрейфа являлось присутствие двух инерционных петель, при прохождении которых дрейфтер существенно уменьшал скорость движения до 10 см/с. Период дрейфа вдоль каждой из петель составлял порядка 15 ч. После совершения двух петель инерционных колебаний (ИК) дрейфтер продолжил квазиравномерное движение на юго-запад до момента полной остановки и кардинальной смены направления движения на восточное. На заключительном этапе дрейфа буя прошел значительное расстояние вдоль берега в северо-восточном направлении со скоростью 20–30 см/с вплоть до момента остановки в районе поселка Янтарный, где впоследствии был пойман.

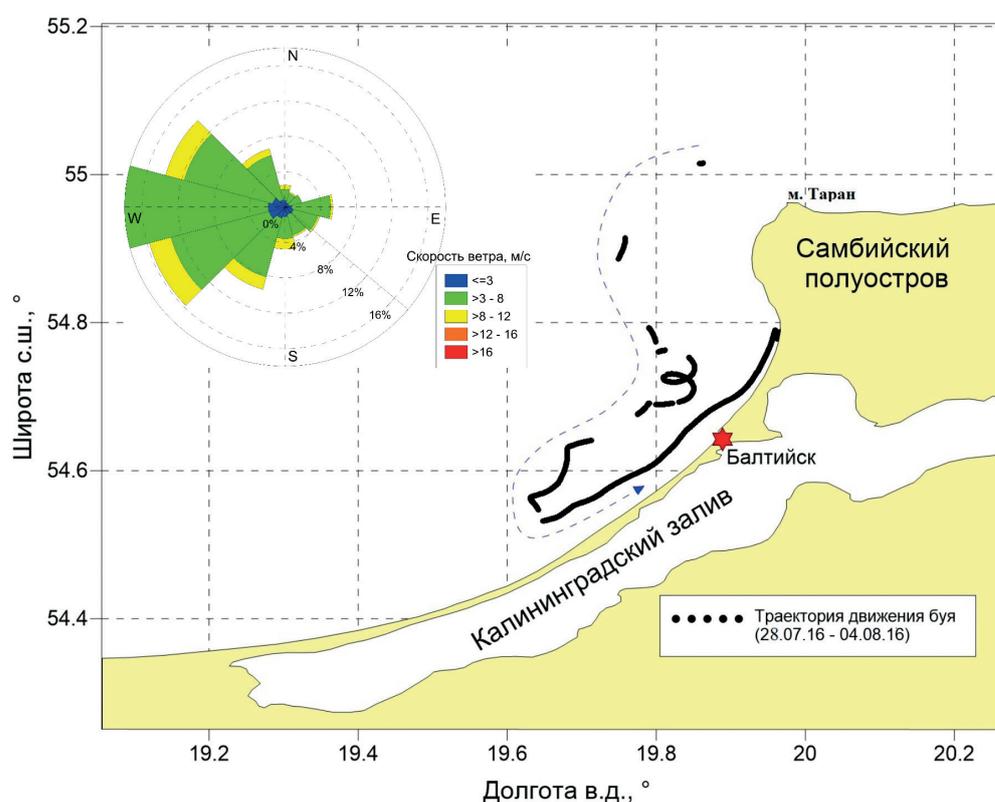


Рис. 3. Траектория дрейфа лагранжевого буя во время эксперимента 2016 г. В левом верхнем углу представлена роза ветров, построенные по данным HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) для периода времени, в течение которого происходил дрейф буя, для всего района Юго-Восточной Балтики

Результаты дрейфа буя в 2016 г. примечательны тем, что дрейфтер двигался на обширной территории от точки своего запуска, а его траектория осложнялась присутствием инерционных колебаний и резких кардинальных разворотов направления дрейфа. Предположительно, дрейф лагранжевого буя происходил преимущественно под воздействием дрейфовых течений, образуемых переменчивым поля ветра.

Результаты дрейферного эксперимента 2015 г.

В 2015 г. экспедиционные работы проводились с 18 июля по 4 августа, они включали в себя измерения параметров прибрежных течений с маломерного судна с помощью ADCP и оценку термохалинной структуры вод с помощью CTD-зондирования. Спутниковые изображения были получены как в видимом, так и в микроволновом диапазонах электромагнитного спектра: пять РЛИ SAR-C Sentinel-1A (22, 24, 27, 29 июля и 8 августа); практически ежедневные безоблачные изображения MODIS Aqua, изображения ETM+ Landsat-7 (3 августа), OLI Landsat-8 (4 августа) и MSI Sentinel-2A (7 и 10 августа). Анализ спутниковых данных показал, что во время проведения дрейферного эксперимента у северной оконечности Самбийского полуострова наблюдалась сильная вихревая активность, можно выделить несколько вихревых структур, как непосредственно за м. Таран и протянувшимся вдоль берега, так и вихревые диполи севернее и северо-западной м. Таран (рис. 4). Следует отметить, что вихревые диполи наблюдались на всех спутниковых изображениях видимого диапазона начиная с 3 по 11 августа, практически оставаясь на месте.

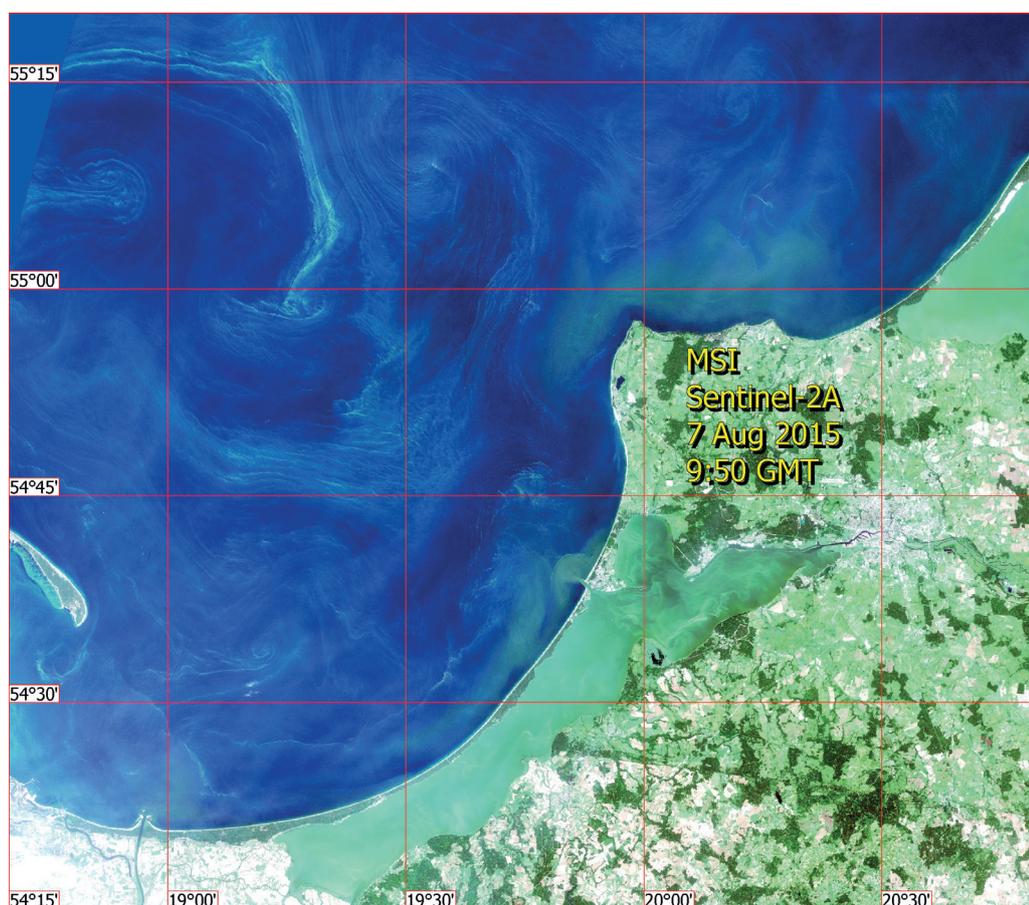


Рис. 4. Проявление вихревой активности на цветосинтезированном изображении MSI Sentinel-2A от 7 августа 2015 г.

В ходе экспедиционных работ 2 августа 2015 г. были запущены два дрейфера. В момент запуска наблюдался ветер южного направления, скорость которого не превышала 5 м/с.

Скорость течения по данным ADCP составляла не более 25 см/с, направление течения — западное. На рис. 5 показаны траектории дрейфа буйев во время эксперимента 2015 г.

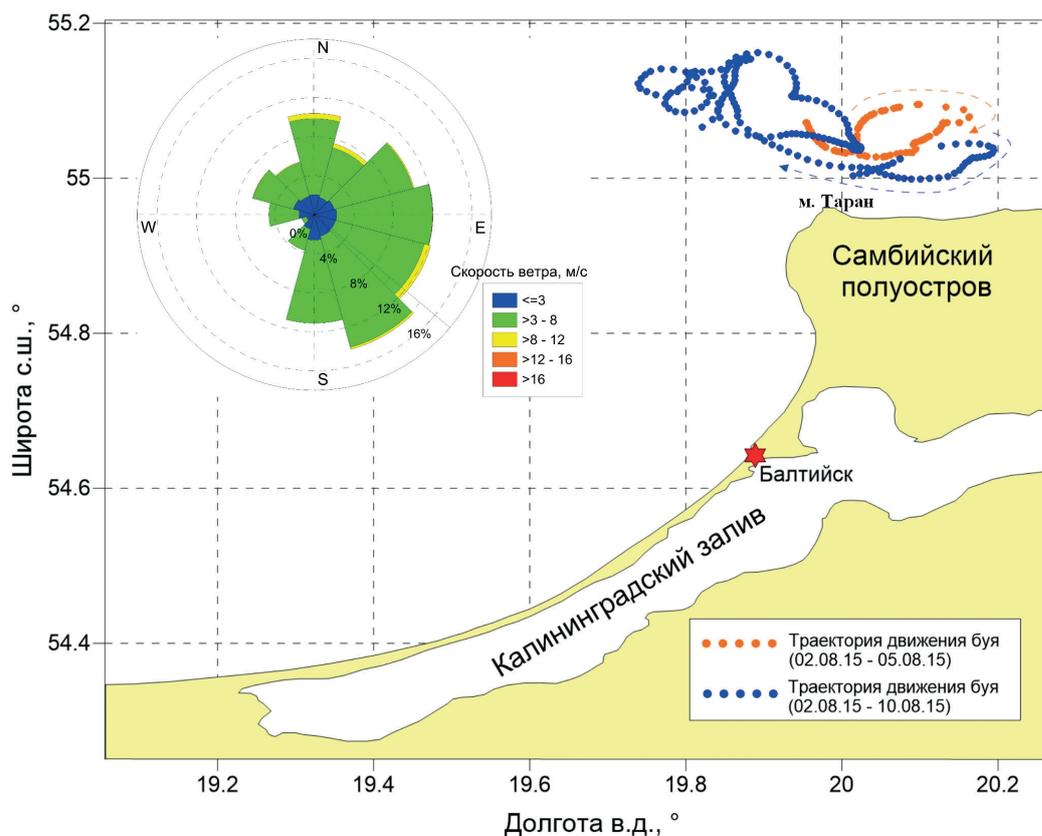


Рис. 5. Траектория дрейфа двух лагранжеских буйев во время эксперимента 2015 г. В левом верхнем углу представлена розы ветров, построенные по данным HIRLAM для периода времени, в течение которого происходил дрейф лагранжеских буйев, для всего района Юго-Восточной Балтики

Дискретность передачи данных в эксперименте 2015 г. составляла 1 ч. Первый буй (рис. 5, оранжевые точки) продрейфовал ~2,5 сут до момента, когда с ним была окончательно потеряна связь. Второй буй (рис. 4, синие точки) продрейфовал почти неделю до момента окончательной потери связи. Дрейф буйев примечателен тем, что в первые двое суток оба дрейфтера описали квазиодинаковые замкнутые траектории, вернувшись практически в начальную точку запуска. Скорости дрейфа на данном участке в отдельные моменты достигали 30–40 см/с — существенно выше измеренных значений по данным ADCP. В дальнейшем дрейфтеры продолжили двигаться в одном и том же направлении, пока с одним из буйев не была потеряна связь. Второй буй на протяжении еще четырех суток дрейфовал в относительно локализованном районе, совершая сложные замкнутые траектории, вновь возвращаясь в точку начального запуска. Дрейф буйа на заключительном этапе был осложнен присутствием инерционных колебаний с периодом порядка 14 ч. Скорость движения дрейфтера на заключительном промежутке составляла в среднем 40 см/с, уменьшаясь до 10 см/с в местах смены направления дрейфа.

За время эксперимента в период со 2 августа по 10 августа 2015 г. наблюдалась переменчивая ветровая ситуация: преобладающее направление ветра в регионе менялась несколько

раз. При этом дрейф буя происходил в очень локализованном районе. Предполагается, что вихревые структуры, которые были выявлены на спутниковых изображениях (рис. 4 и б), способствовали удержанию лагранжевого дрейфтера в районе запуска в течение целой недели.

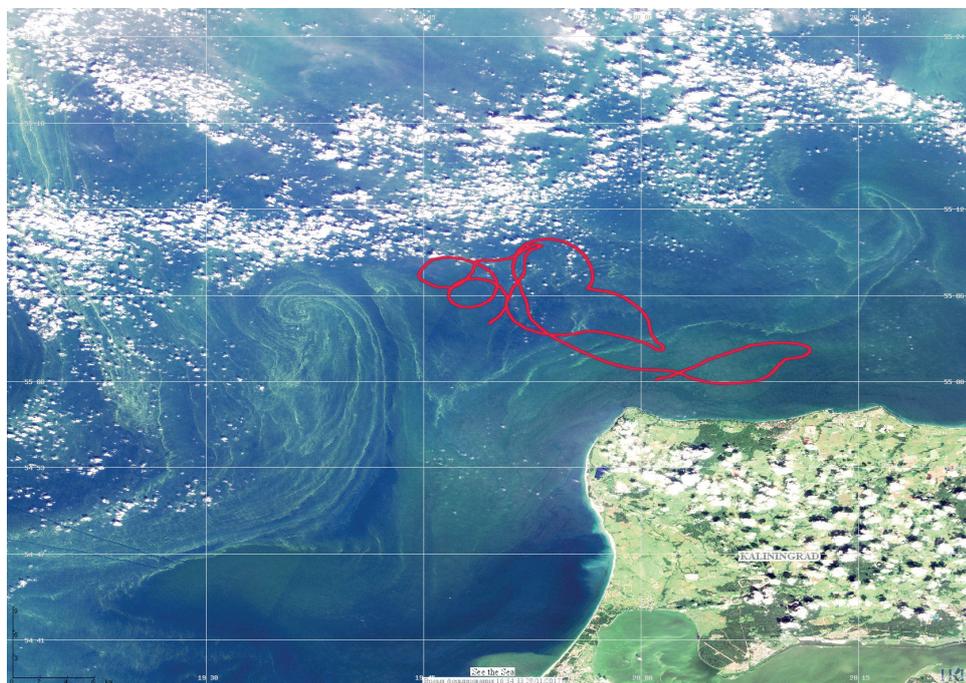


Рис. 6. Проявление вихревых структур в районе м. Таран на цветосинтезированном изображении MSI-Sentinel-2A за 10 августа 2015 г. и наложенная на него траектория дрейфтера за период 2–10 августа 2015 г.

Моделирование траекторий дрейфтеров

С целью исследования влияния гидродинамических процессов на перемещение дрейфтеров было выполнено численное моделирование их траекторий. На рис. 7. представлена батиметрическая карта Юго-Восточной Балтики, данная область являлась областью моделирования; в виде непрерывных линий на карту наложены траектории дрейфтеров. Начала траекторий отмечены точками. Численный расчет траекторий выполнялся на основе Принстонской модели океана (ПОМ), адаптированной к р-ну Юго-Восточной Балтики, со встроенным блоком расчета траекторий лагранжевых частиц (Голенко, Голенко, 2014; Журбас и др., 2010).

Красной линией нанесена траектория, которая началась в точке с координатами ($55,00312^\circ$ с.ш., $20,01436^\circ$ в.д.), расположенной к северу от м. Таран, вблизи изобаты 30 м. Время начала траектории — 2 августа 2015 г. 17:08, время конца — 9 августа 2015 г. 23:08. Данную траекторию условно назовем траекторией № 1. Моделирование было начато с 00:00 1 августа 2015 г. В качестве ветрового воздействия были использованы данные реанализа ERA-Interim базы данных ECMWF (<https://www.ecmwf.int/>) за 2015 г. (временная дискретность данных — 6 ч, пространственное разрешение — ~ 50 км) и данные моделиHIRLAM за 2015 и 2016 г. (временная дискретность данных — 3 ч, пространственное разрешение — ~ 8 км) (Männik, Merilain, 2007). Начальные распределения полей температуры и солёности были

взяты из базы данных COPERNICUS (<http://marine.copernicus.eu/>). На *рис. 8а* представлена траектория № 1 (красная линия), а также фрагменты траекторий, полученных при моделировании путей распространения лагранжевых частиц (фиолетовые линии), выпущенных из различных точек траектории № 1 в соответствующие моменты времени, при ветровом воздействии, основанном на данных ECMWF. Анализ скорости ветра и модельной приповерхностной горизонтальной скорости течения показал, что на начальном этапе распространения дрейфтера преобладали преимущественно ветра западных румбов, под воздействием которых сформировалось вдольбереговое струйное течение, направленное на северо-восток. Траектории 10 лагранжевых частиц, выпущенных из начальной точки траектории № 1, под воздействием вдольберегового течения распространились вдоль берега на северо-восток и сохранили первоначальное направление движения до конца эксперимента. Траектория дрейфтера выглядит иначе. В начальный период дрейфтер также устремился на северо-восток, но затем совершил поворот по часовой стрелке и вернулся почти в начальную точку. Описываемая петля была пройдена за 37 ч. Смена направления траектории, предположительно, могла быть вызвана уменьшением скорости ветра и ослаблением струйного течения, сопровождаемого генерацией ИК. Однако данные реанализа ECMWF такого изменения скорости ветра не воспроизвели. Поскольку указанный промежуток времени существенно превышает инерционный период (14 ч), то распространение дрейфтера в обратном направлении, вероятно, могло быть связано и с другими особенностями прибрежной динамики (противотечениями), которые не были воспроизведены при моделировании. Было принято решение посчитать траектории частиц, выпущенных севернее точки замыкания начальной петли (на изобате 50 м) в момент времени, соответствующий прохождению дрейфтером данной точки. Пример такой траектории также представлен на *рис. 8а*. Лагранжева частица, подобно дрейфтеру, начала двигаться в северном направлении, распространившись значительно дальше дрейфтера, а затем, описав поворот по часовой стрелке, повернула на юг. На этом траектория лагранжевой частицы закончилась, а дрейфтер прошел еще значительное расстояние, описав несколько поворотов и петель. Также была посчитана траектория частицы, выпущенной в начальной точке заключительной петли первого дрейфтера, которую он описал за 16 ч. Данный участок траектории был удовлетворительно воспроизведен моделью: лагранжева частица также за указанное время описала замкнутую петлю в направлении по часовой стрелке. Таким образом, проведенные эксперименты показали, что в рассматриваемый временной период модель довольно реалистично воспроизвела ИК на отдалении от берега (глубже изобаты 50 м).

Также были выполнены модельные расчеты траекторий распространения лагранжевых частиц, выпущенных из точки запуска дрейфтера № 1 при задании атмосферного воздействия, основанного на данных моделиHIRLAM. На *рис. 8б* представлены траектории дрейфтера и одной из лагранжевых частиц (траектории представлены без заключительной петли, ср. с траекторией *рис. 7*, так как заключительная петля, изначально принятая за траекторию отдельного дрейфтера, моделировалась отдельно). Очевидно, что данная траектория лагранжевой частицы намного ближе воспроизвела траекторию дрейфтера по сравнению с траекториями, полученными при задании ветра ECMWF.

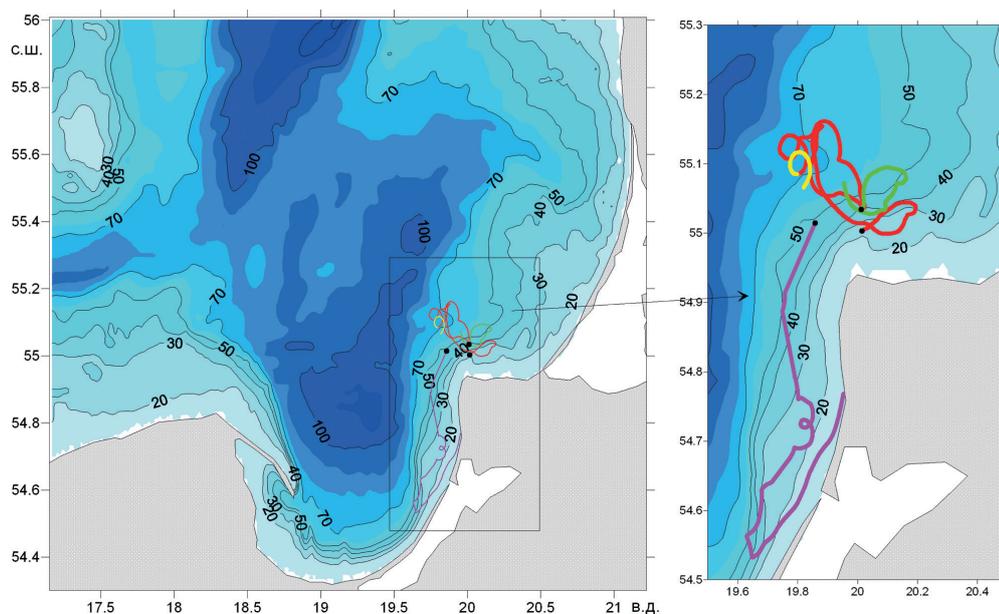


Рис. 7. Батиметрическая карта части Юго-Восточной Балтики, которая являлась областью моделирования. На карту наложены треки дрейфтеров — красная, желтая, зеленая (эксперимент 2015 г.) и сиреневая линии (эксперимент 2016 г.). Желтый трек является продолжением красного трека, они принадлежат одному и тому же дрейфтеру. Начальные местоположения дрейфтеров отмечены черными точками

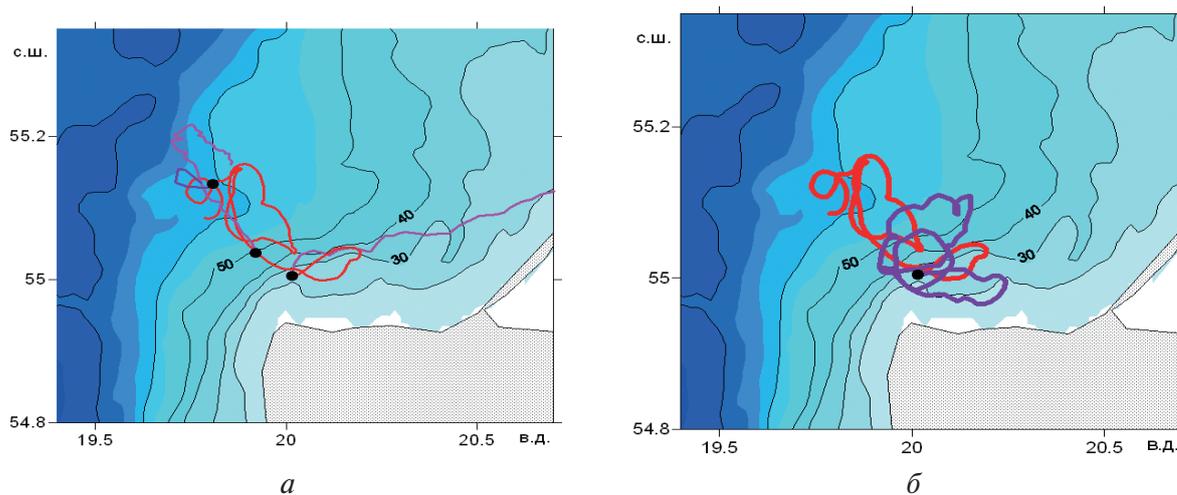


Рис. 8. Траектории трех модельных лагранжевых частиц, которые были выпущены из начальной точки первого дрейфтера, из точки, находящейся на удалении от берега, в районе изобаты 50 м, и начальной точки заключительной петли дрейфтера — фиолетовые линии (а). Начала траекторий лагранжевых частиц обозначены черными точками. Модельные расчеты проводились при атмосферном воздействии, заданном в соответствии с данными ECMWF. Траектория модельной лагранжевой частицы, выпущенной из начальной точки первого дрейфтера — фиолетовая линия (б). Модельные расчеты проводились при атмосферном воздействии, заданном в соответствии с данными HIRLAM. На обоих рисунках красная линия — траектория первого дрейфтера

Частица, как и дрейфтер, начала распространяться в восточном направлении; затем, спустя ~18 ч, в направлении по часовой стрелке она повернула в обратном направлении и вернулась почти в точку старта. После этого, пройдя в северном направлении до изобаты 50 м и вновь вернувшись к точке запуска, частица описала круг. Прodelав схожий путь, дрейфтер распространился дальше на север до изобаты 70 м, а возвращаясь на юг, остановился севернее

точки запуска, на изобате 40 м. Затем дрейфтер и лагранжева частица вновь распространились на север, при этом модельная частица несколько отклонилась на восток. На почти заключительном этапе траектории дрейфтер и частица за время, близкое к инерционному периоду, описали замкнутую петлю.

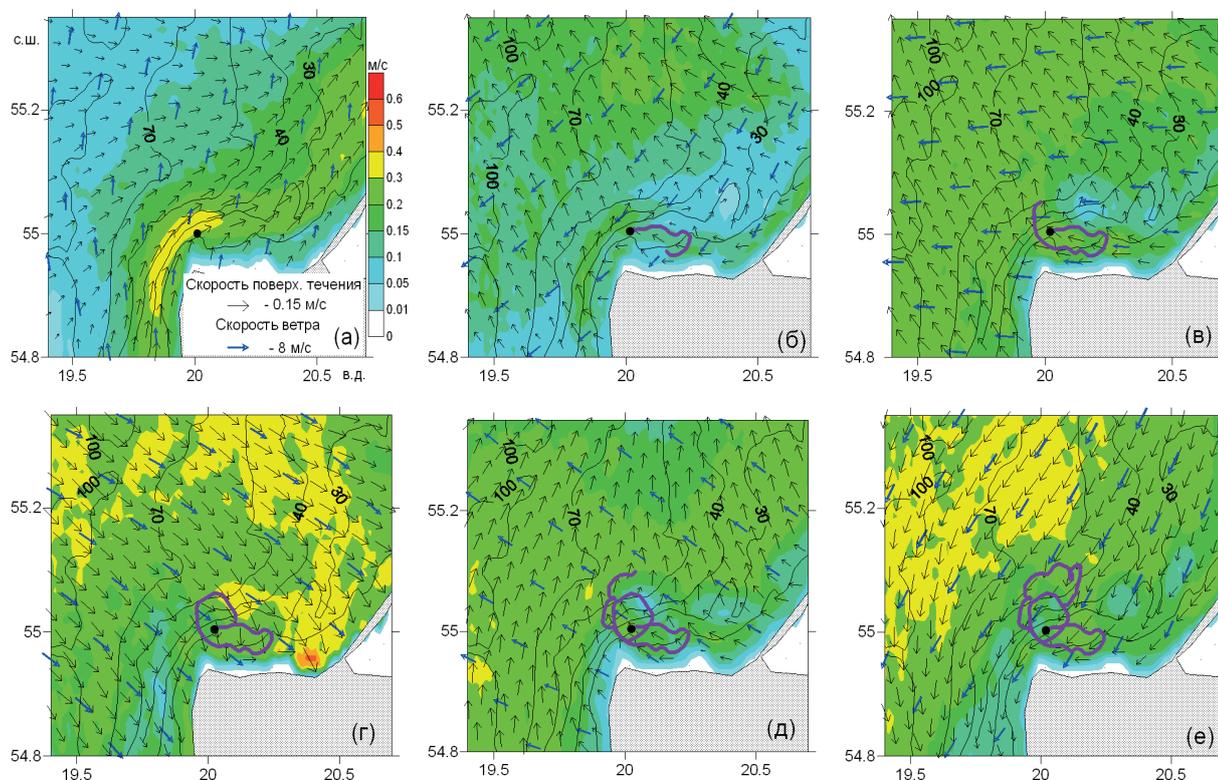


Рис. 9. Фрагменты приповерхностной скорости течения (черные стрелки) и скорости ветра HIRLAM (синие стрелки) на различных этапах распространения первого дрейфтера, описываемых в тексте (в моменты резких изменений направления его распространения). На каждый фрагмент наложена часть модельной траектории лагранжевой частицы, пройденной к данному моменту времени. Черной точкой отмечена начальная позиция дрейфтера. Пропорции стрелок, обозначающих скорости течения и ветра, указаны в правом нижнем углу рис. а

Анализ скорости ветра и модельной приповерхностной горизонтальной скорости течения показал, что до начала запуска лагранжевых частиц во всей исследуемой области наблюдался южный ветер, скорость которого достигала 8–10 м/с. У западного побережья Самбийского п-ва, а также в районе м. Таран южный ветер сформировал интенсивное вдольбереговое струйное течение, направленное на север и северо-восток (рис. 9а). После запуска частиц направление ветра менялось на юго-восточное, ветер усиливался и ослабевал. При этом до 14:00 3 августа струя сохранялась. Затем подул северо-восточный ветер, который изменил направление приповерхностного течения в прибрежной области на противоположное. С этим изменением направления прибрежного течения, очевидно, связан разворот траектории лагранжевой частицы на запад (рис. 9б). Согласно данным скорости ветра HIRLAM, на протяжении всего периода прохождения траектории первым дрейфтером направление ветра постоянно менялось, а по прошествии суток зачастую изменялось на противоположное. Дальнейшее распространение частицы на север обусловлено экмановским переносом, вызванным преобладанием восточного ветра со скоростью до 10 м/с на протяжении последующих 1,5 сут (рис. 9в).

Далее каждый разворот частицы был связан с изменением направления и резким усилением скорости ветра. Последующий поворот частицы на юг был вызван северо-западным ветром ~ 10 м/с (рис. 9г). Очередной поворот на север был вызван усилением юго-восточного ветра (рис. 9д). Последующий поворот на юг, который имеет наиболее резкий характер, был вызван северо-восточным ветром, который подул спустя 2 ч после южного ветра и перешел в почти северный со скоростью 12 м/с (рис. 9е). Сопоставительный анализ данных скорости ветра ECMWF и HIRLAM показал, что ветер ECMWF менялся с запаздыванием, при этом данные HIRLAM также выявили наличие изменений скорости ветра с периодом, меньшим 6 ч, которые не были разрешены данными ECMWF.

Заключительным участком траектории первого дрифтера является ее фрагмент, нанесенный желтой линией (рис. 7). Этот участок траектории начался в 22:08 9 августа 2015 г., время его окончания — 11:08 10 августа 2015 г., таким образом, на заключительном этапе первым дрифтером была описана петля за 13 ч, что свидетельствует о ее инерционной природе. Похожие очертания имеют траектории лагранжевых частиц, выпущенных из начальной точки заключительной части траектории первого дрифтера (рис. 10). Расхождение состоит лишь в том, что дрифтер описал более длинную траекторию (более широкую петлю). Диаметр квазикруговой траектории, описанной дрифтером, составил ~ 6 км, что соответствует средней скорости перемещения частицы под воздействием ИК, равной 0,4 м/с. В период прохождения первым дрифтером заключительной части траектории изменений скорости ветра почти не наблюдалось, поэтому данные ECMWF позволили весьма удовлетворительно воспроизвести траекторию.

Поскольку траектория второго дрифтера по форме почти аналогична начальному участку траектории первого дрифтера (рис. 5), то, очевидно, на начальном этапе они перемещались под воздействием одних и тех же гидродинамических процессов, поэтому описание модельного эксперимента по воспроизведению траектории второго дрифтера мы опустим.

Рассмотрим теперь результаты моделирования траектории дрифтера, запущенного 28 июля 2016 г. (сиреневая линия на рис. 7, а также на рис. 11а, условимся называть ее траекторией №2). Координаты точки запуска дрифтера: $55,01452^\circ$ с.ш., $19,85810^\circ$ в.д. Время запуска дрифтера — 12:43 28 июля 2016 г., время окончания регистрации его местоположения — 09:57 4 августа 2016 г. Как было отмечено в предыдущем разделе, регистрация координат данного дрифтера происходила в неустойчивом режиме, многие участки его траектории

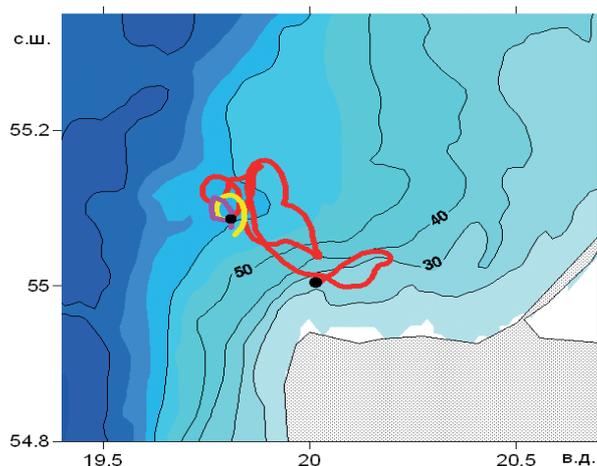


Рис. 10. Основная часть траектории первого дрифтера (красная линия), и ее заключительный участок (желтая линия), а также траектория модельной лагранжевой частицы (сиреневая линия), выпущенной из точки, предшествующей заключительной петле дрифтера. Модельные расчеты проводились при атмосферном воздействии, заданном в соответствии с данными ECMWF

пропущены. Четко были зарегистрированы лишь участки, на которых дрейфтер описывает две петли в направлении по часовой стрелке при движении вдоль побережья Самбийского п-ва на юго-запад, а также весь участок траектории после поворота в обратном направлении, при движении на северо-восток (рис. 11а). Данные местоположения дрейфтера показали, что петли на траектории были описаны за 12,5 и 15 ч, что близко к инерционному периоду. Траектории, полученные при моделировании, выглядят более извилистыми (рис. 11б), на многих участках присутствуют петли ИК. Модель весьма удовлетворительно воспроизвела основное направление перемещения дрейфтера вдоль побережья Самбийского п-ва на юго-запад, а также поворот дрейфтера в обратном направлении, который произошел 2 августа 2016 г. При этом модельная траектория оказалась несколько смещенной в сторону открытого моря, и после поворота на северо-восток частица прошла меньший путь по сравнению с дрейфтером. Видимо, это связано с тем, что по мере отдаления от берега скорость течений уменьшилась.

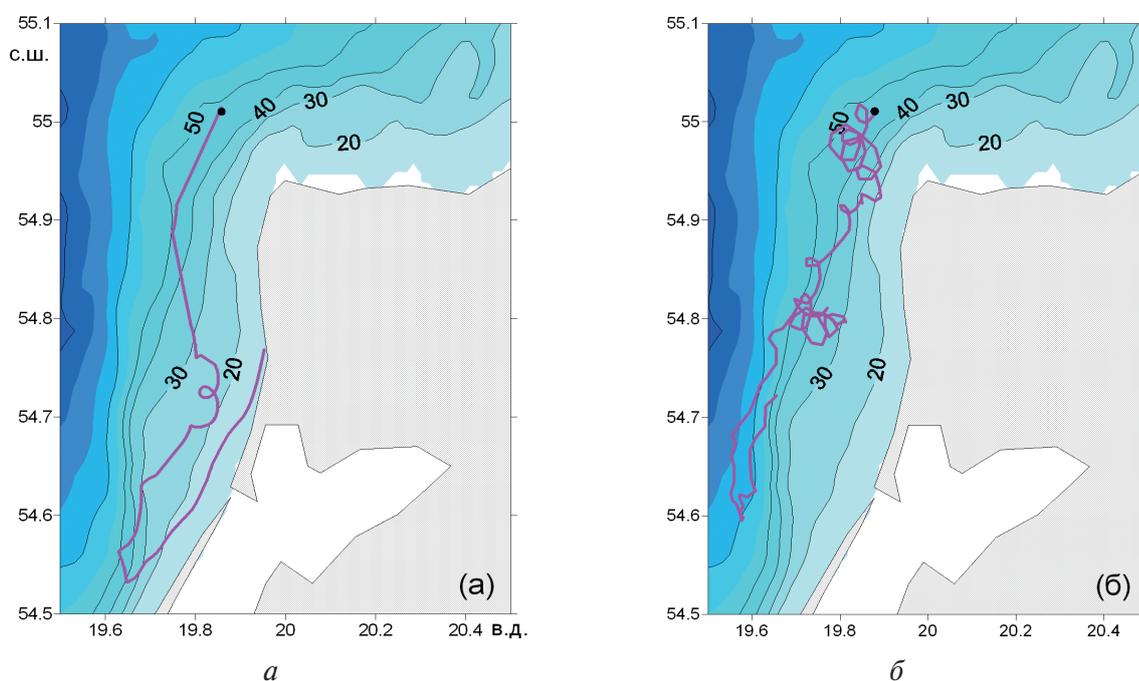


Рис. 11. Траектории дрейфтера, запущенного в 2016 г. (а) и соответствующей лагранжевой частицы (б)

Данные моделирования приповерхностной скорости течения показали, что в течение большей части времени распространения дрейфтера в динамике вод Юго-Восточной Балтики (как в прибрежной зоне, так и в открытом море) преобладали ИК. Анализ метеоданных показал, что в течение всего исследуемого периода направление ветра менялось, оставаясь постоянным на протяжении не более 1 сут. При этом ветры западных румбов повторялись наиболее часто (рис. 3), что с учетом поверхностного экмановского переноса и формы береговой линии, по-видимому, вызвало генерацию наиболее интенсивных скоростей приповерхностных течений в секторе от направления на юг до направления на запад (см. серию приповерхностных распределений модельной скорости, представленных на рис. 12). Этим можно объяснить основной перенос дрейфтера и лагранжевой частицы на юго-запад. На рис. 12 представлены фрагменты приповерхностной скорости течения и скорости ветра HIRLAM на различных

этапах распространения дрейфера. На *рис. 12а* представлен момент запуска дрейфера. Рисунок 12б иллюстрирует период времени, когда ИК наложились на вдольбереговую струю, и инерционные петли на траектории стали более редкими и незамкнутыми. Траектория представляла собой трохойду, или как еще называют такую кривую — удлиненную циклоиду (Лаврова, Сабинин, 2016). Повороту дрейфера на северо-восток, произошедшему 2 августа 2016 г., почти в течение суток предшествовали интенсивные ветры западных румбов, при этом ветер менял направление с северо-западного на юго-западное (*рис. 12в, г*). В таком же направлении (против часовой стрелки) поворачивались траектории дрейфера и модельной лагранжевой частицы (*рис. 12г*). Позже в исследуемом районе ветер почти прекратился, поверхностное течение в месте нахождения дрейфера также значительно ослабло. При этом дрейфер совершил незначительное перемещение на север (*рис. 12д*). Затем до конца траектории дрейфера ветер сохранял западное и юго-западное направления, что привело к формированию вдольбереговой струи в районе Вислинской косы, направленной на северо-восток, обусловившей распространение дрейфера в том же направлении (*рис. 12е*).

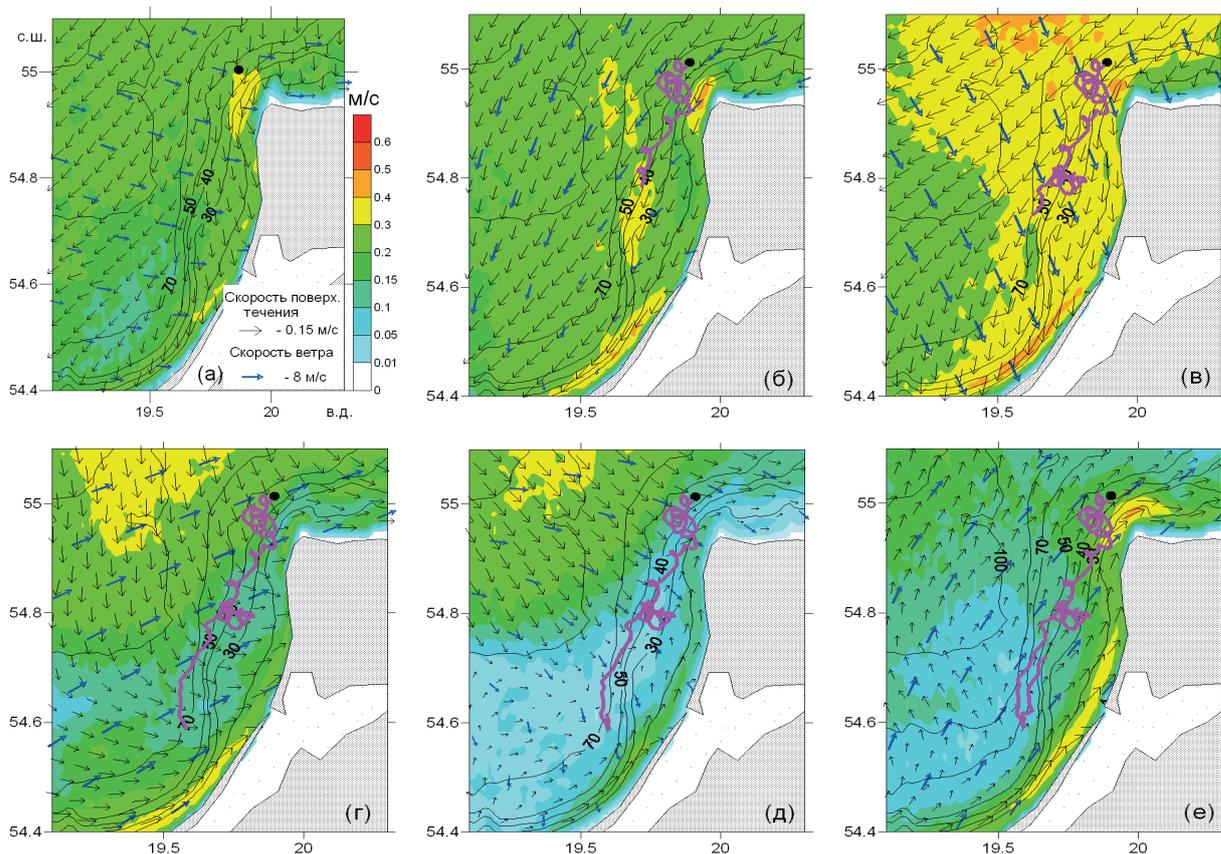


Рис. 12. Фрагменты приповерхностной скорости течения (черные стрелки) и скорости ветра HIRLAM (синие стрелки) на различных этапах распространения дрейфера, выпущенного в 2016 г.: а) в момент запуска дрейфера; б) в момент наложения ИК на вдольбереговое струйное течение; в) на этапе после преобладания ИК в динамике Юго-Восточной Балтики; г) перед замедлением движения дрейфера и его поворотом на север; д) на этапе замедления движения дрейфера и его поворотом на север; е) на конечном этапе движения дрейфера, в период преобладания вдольберегового струйного течения, направленного на северо-восток, сформировавшегося под воздействием юго-западного ветра. На каждый фрагмент наложена часть модельной траектории лагранжевой частицы, пройденной к данному моменту времени. Черной точкой отмечена начальная позиция дрейфера. Пропорции стрелок, обозначающих скорости течения и ветра, указаны в правом нижнем углу рис. а

Анализ скорости ветра также показал, что в периоды интенсификации ИК (в начальный период распространения дрейфера, а также в период с 14:00 30 июля по 18:00 31 июля 2016 г.) в исследуемом районе наблюдались ветры от северо-западного до южных направлений. При этом частица оказывалась «захваченной» ИК и заметного ее адвективного перемещения не происходило.

Заключение

Результаты анализа и численного моделирования траекторий двух дрейферов, выпущенных в летние периоды 2015 и 2016 гг. из прибрежной области Юго-Восточной Балтики, показали, что в большинстве случаев траектории лагранжевых частиц, полученные при моделировании, весьма удовлетворительно отобразили основное направление и некоторые детальные особенности перемещения дрейферов. Почти на всех траекториях были отмечены инерционные петли, описываемые частицами, на фоне более длиннопериодных петель и разворотов. Совместный анализ скорости ветра, модельной скорости приповерхностного течения и траекторий лагранжевых частиц показал, что относительно длиннопериодные изменения направления движения вызваны резким усилением (до 9 м/с) и изменением направления скорости ветра. При этом большую часть времени дрейферы (частицы), как правило, совершали адвективное перемещение в направлении ветра и экмановского переноса, ИК накладывались на траектории, но существенно не меняли их направление. Однако в отдельных районах открытого моря, а также шельфовой зоны, где, как правило, направление ветра перпендикулярно береговой линии, в динамике преобладают ИК, которые «захватывали» частицы, и под их воздействием они описывали замкнутые петли, не распространяясь за пределы данных областей. Диаметр петель, описываемых частицами вдоль траектории, равен ~2–6 км (в приповерхностном слое) и существенно зависел от фоновых течений. Например, попадая в область вдольбереговой струи, сформировавшейся вследствие геострофического баланса, частицы описывали вытянутые незамкнутые петли. Период таких петель, как правило, меньше инерционного (11–12 ч). В глубоководных отдаленных от берега районах частицы описывают замкнутые круги.

Проведение подспутниковых дрейферных экспериментов, обработка и анализ экспериментальных данных, проведение численного моделирования движения лагранжевых частиц в акватории Юго-Восточной Балтики, а также анализ данных моделирования были выполнены при финансовой поддержке гранта РФФ № 14-17-00555. Анализ характеристик инерционных колебаний, совершенных дрейферами и модельными лагранжевыми частицами, выполнен при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-05-04198_а. Авторы выражают особую благодарность всем членам экспедиционных работ и командам судов, на которых они проводились, а также Д.М. Соловьеву (МГИ РАН, Севастополь) за подготовку к печати спутниковых изображений.

Литература

1. Гинзбург А.И., Булычева Е.В., Костяной А.Г., Соловьев Д.М. О роли вихрей в распространении нефтяных загрязнений по акватории Юго-Восточной Балтики (по данным спутникового мониторинга) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 149–157.
2. Голенко Н.Н., Голенко М.Н., Шука С.А. Наблюдение и моделирование апвеллинга в юго-восточной Балтике // Океанология. 2009. Т. 49. № 1. С. 20–27.
3. Голенко М.Н., Голенко Н.Н. О структуре динамических полей в юго-восточной Балтике при ветровых воздействиях, приводящих к апвеллингу и даунвеллингу // Океанология. 2012. Т. 52. № 5. С. 654–667.
4. Голенко М.Н., Голенко Н.Н. Исследование распространения пассивной примеси и лагранжевых частиц в прибрежной зоне Юго-Восточной части Балтийского моря // Вестник Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта. 2014. Серия: естественные науки. Вып. 1. С. 42–50.
5. Журбас В.М., Элькен Ю., Вяли Г., Кузьмина Н.П., Пака В.Т. Пути переноса взвешенных частиц в придонном слое южной Балтики в зависимости от ветровых условий (численные эксперименты) // Океанология. 2010. Т. 50. № 6. С. 890–903.
6. 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. 470 с.
7. 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.
8. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 335 с.
9. 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.
10. Сильвестрова К.П., Мысленков С.А., Зацепин А.Г., Краюшкин Е.В., Баранов В.И., Самсонов Т.Е., Куклев С.Б. Возможности использования грпс-дрифтеров для исследования течений на шельфе Черного моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 159–166.
11. Gade M., Seppke B., Dreschler-Fischer L. Mesoscale surface current fields in the Baltic Sea derived from multi-sensor satellite data // Intern. J. Remote Sensing. 2012. Vol. 33. Issue 10. P. 3122–3146.
12. Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Gade M. Multichannel observation of eddies and mesoscale features in coastal zones. Remote sensing of the European Seas / eds. V. Barale, M. Gade. Springer Verlag, 2008. P. 463–474.
13. Lavrova O., Karimova S., Mityagina M. Eddy Activity in the Baltic Sea Retrieved from Satellite SAR and Optical Data // Proc. 3rd Intern. Workshop SeaSAR 2010. 25–29 Jan. 2010. ESRIN, Frascati, Italy. 2010. Vol. ESA-SP-679. 5 p.
14. 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. P. 5193–5201. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2580602.
15. Männik A., Merilain M. Verification of different precipitation forecasts during extended winter-season in Estonia, HIRLAM Newsletter. 2007. Vol. 52. P. 65–70.
16. Mielus M. The climate of the Baltic Sea basin // Marine meteorology and related oceanographic activities. Report 41, WMO/td 993, Geneva. 1998. 64 p.
17. Osinski R., Rak D., Walczowski W., Piechura J. Baroclinic radius of deformation in the southern Baltic Sea // Oceanologia. 2010. Vol. 52. No. 3. P. 417–429.
18. Tolstosheev A.P. A method of estimation of the results of reconstruction of the trajectories of drifting buoys // Physical Oceanography. 2010. Vol. 19. No. 6. P. 358–365.

Investigation of coastal surface currents in the South-East Baltic based on concurrent drifter and satellite observations and numerical modeling

M.N. Golenko¹, E.V. Krayushkin², 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-mails: box_evk@mail.ru, olavrova@iki.rssi.ru

The results of field work carried out concurrently with satellite imaging in the summer periods of 2015–2016 in the South-East Baltic near the Sambian Peninsula are presented. Analysis and numerical simulation of the trajectories of

two drifters released into the sea are performed. It is shown that the character of the drift of Lagrangian buoys can differ substantially from year to year, which is largely due to wind conditions and the intensity of vortex dynamics in the region. Numerical simulation of the Lagrangian drifters' paths is carried out based on the Princeton Ocean Model (POM) adapted to the South-East Baltic and enhanced with a unit for calculating the trajectories of Lagrangian particles. In most cases, a close correspondence between the trajectories of model Lagrangian particles and drifters is obtained. Areas and meteorological conditions are determined in which drifters (particles) are mainly subject to advective displacement, while inertial oscillations do not significantly influence them. Also, we defined the conditions when inertial oscillations predominate, so that the particles get entrained into a drifting pattern of closed loops with diameters of ~2–6 km (in the near-surface layer). The diameter and shape of the loops essentially depend on background currents.

Keywords: concurrent experiments, surface circulation, Lagrangian drifters, numerical simulation, POM, South-East Baltic

Accepted: 05.12.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-280-296

References

1. Ginzburg A.I., Bulycheva E.V., Kostianoy A.G., Solovyev D.M., O roli vihrey v rasprostraneniі neftnykh zagryazneniy po akvatorii Yugo-Vostochnoy Baltiki (po dannym sputnikovogo monitoringa) (On the role of vortices in the transport of oil pollution in the Southeastern Baltic Sea (according to satellite monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 149–157.
2. 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.
3. Golenko M.N., Golenko N.N., Structure of dynamic fields in the Southeastern Baltic during wind forcings that cause upwelling and downwelling, *Oceanology*, 2012, Vol. 52, No. 5, pp. 604–616.
4. Golenko M.N., Golenko N.N., Issledovaniye rasprostraneniya passivnykh primesi i lagranzhevyykh chastits v pribrezhnoy zone Yugo-Vostochnoy chasti Baltiyskogo moray (Investigation of the propagation of passive additives and Lagrangian particles in the coastal area of South-East Baltic), *Vestnik Baltiyskogo Federal'nogo universiteta im. I. Kanta*, 2014, Seriya: Estestvennyye nauki, Issue 1, pp. 42–50.
5. Zhurbas V.M., Elken Yu., Vali G., Kuzmina N.P., Paka V.T., Pathways of suspended particles transport in the bottom layer of the Southeastern Baltic Sea depending on wind forcing (numerical simulations), *Oceanology*, 2010, Vol. 50, No. 6, pp. 841–854.
6. 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, 470 p.
7. Lavrova O.Yu., Krayushkin E.V., Solovyev D.M., Golenko M.N., Golenko N.N., Kalashnikova N.A., Demidov A.N., Vliyaniye vetrovogo vozdeystviya i gidrodinamicheskikh protsessov na rasprostraneniye vod Kalinigradskogo zaliva v akvatorii Baltiyskogo moray (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.
8. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Kostyanoy A.G., *Sputnikovyye metody vyiyavleniya i monitoring zon ekologicheskogo riska morskikh akvatoriy* (Satellite Methods for Detecting and Monitoring Marine Zones of Ecological Risk), Moscow: IKI RAN, 2016, 335 p.
9. Lavrova O.Yu., Sabinin K.D., Proyavleniya inertsiyonykh kolebaniy na sputnikovyykh izobrazheniyakh morskoy 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.
10. Silvestrova K.P., Myslenkov S.A., Zatsepin A.G., Krayushkin E.V., Samsonov T.E., Baranov V.I., Kuklev S.B., GPS-drifters for study of water dynamics in the black sea shelf zone, *Oceanology*, 2016, Vol. 56, No. 1, pp. 150–156.
11. Gade M., Seppke B., Dreschler-Fischer L., Mesoscale surface current fields in the Baltic Sea derived from multi-sensor satellite data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2012, Vol. 33, Issue 10, pp. 3122–3146.
12. Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Gade M., Multichannel observation of eddies and mesoscale features in coastal zones, *Remote sensing of the European Seas*, Springer Verlag, 2008, pp. 463–474.
13. Lavrova O., Karimova S., Mityagina M., Eddy Activity in the Baltic Sea Retrieved from Satellite SAR and Optical Data, *Proc. 3rd Intern. Workshop SeaSAR 2010, 25–29 Jan, 2010*, ESRIN, Frascati, Italy, 2010, Vol. ESA-SP-679, 5 p.
14. 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 Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, Issue 9, pp. 5193–5201. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2580602.
15. Männik A., Merilain M., Verification of different precipitation forecasts during extended winter-season in Estonia, *HIRLAM Newsletter*, 2007, Vol. 52, pp. 65–70.
16. Mietus M., The climate of the Baltic Sea basin, Marine meteorology and related oceanographic activities, *Report 41, WMO/td 993*, Geneva, 1998, 64 p.
17. Osinski R., Rak D., Walczowski W., Piechura J., Baroclinic radius of deformation in the southern Baltic Sea, *Oceanologia*, 2010, Vol. 52, No. 3, pp. 417–429.
18. Tolstosheev A.P., A method of estimation of the results of reconstruction of the trajectories of drifting buoys, *Physical Oceanography*, 2010, Vol. 19, No. 6, pp. 358–365.