

О РОЛИ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПЯТЕН НЕФТЕПРОДУКТОВ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ (СПУТНИКОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ)

Гинзбург А.И.¹, Крек Е.В.¹, Костяной А.Г.^{1,2}, Соловьев Д.М.³

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997,
Москва, Нахимовский проспект, д. 36, Россия*

e-mail: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, elenka_krek@mail.ru

²*Московский университет им. С.Ю. Витте, 115432,
Москва, 2-й Кожуховский пр-д, 12, стр.1, Россия*

³*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011,
ул. Капитанская, д.2, Россия*

e-mail: solmit@gmail.com

Статья поступила в редакцию 18.02.2019, одобрена к печати 26.08.2019

В данной статье на основе анализа последовательных спутниковых оптических (MODIS-Aqua, TIRS Landsat-8, AVHRR NOAA-18) и радиолокационных (SAR-C Sentinel-1A, SAR-C Radarsat-2) изображений 8–11 июня 2015 г. впервые продемонстрировано влияние мезомасштабного вихревого движения (антициклона с диаметром примерно 35 км и присоединенного циклона) на перемещение цепочки пятен нефтепродуктов в северной части Гданьского залива. Оценены скорости этого перемещения; наблюдаемая картина перемещения пятен сопоставлена с их переносом согласно модели Seatrack Web. Наибольшая (около 20 см/с) скорость дрейфа соответствовала пятну, оказавшемуся вблизи периферии антициклонического вихря (области максимальных скоростей), наименьшая – у пятна вблизи центра вихря. При скорости ветра не более 5 м/с 10 июня и предполагаемой орбитальной скорости антициклона порядка 20 см/с вклад вихревого движения в суммарный перенос пятен под влиянием ветра и вихря должен был быть определяющим. Наблюдавшийся дрейф пятен не соответствовал прогнозу их перемещения численной моделью Seatrack Web, которая не учитывает вихревую динамику вод.

Ключевые слова: Юго-Восточная Балтика, радиолокационные изображения, оптические изображения, нефтяное загрязнение, вихри, вихревые диполи, прогноз дрейфа нефтяных загрязнений, модель Seatrack Web

Введение

Внутреннее Балтийское море подвержено нефтяному загрязнению из-за утечки или сброса нефтепродуктов с морских судов (Булычева, Костяной, 2014; Lavrova et al., 2014; Kostianoy et al., 2014; Булычева и др., 2016; Лаврова и др., 2016). Поэтому важными задачами контроля экологического состояния моря являются оперативное обнаружение пятен нефтепродуктов и прогноз их распространения

по акватории. Эти задачи с 2004 г. успешно решаются, в том числе и российскими учеными (Лаврова и др., 2011; Лаврова и др., 2016), на основе комплексного спутникового мониторинга Балтики и применения интерактивной численной модели Seatrack Web Шведского метеорологического и гидрологического института (SMHI) и ХЕЛКОМ (HELCOM, Хельсинская комиссия по защите морской среды Балтийского моря). Однако, как было показано в работе (Гинзбург и др., 2015б), модель Seatrack Web учитывает только постоянные и дрейфовые течения, но не учитывает мезомасштабную циркуляцию вод, которая, как следует из работ разных лет, основанных главным образом на анализе спутниковой информации, в Балтийском море весьма интенсивна (Horstmann, 1983; Бычкова, Викторов, 1988; Лаврова, 2005; Lavrova et al., 2008; Каримова и др., 2011; Гурова, Иванов, 2011; Лаврова и др., 2011; Гурова, 2012; Gurova, Chubarenko, 2012; Лаврова и др., 2014; Гинзбург и др., 2015а, б; Гинзбург и др., 2017).

Известно, что в Балтийском море отсутствуют интенсивные постоянные течения, а скорость непостоянных по направлению дрейфовых течений чаще всего не превышает 10–15 см/с (Гидрометеорология..., 1992). В таком случае можно было предполагать, что при орбитальной скорости мезомасштабных вихрей в Балтике порядка 20 см/с и более вклад вихревых течений в дрейф пятен нефтепродуктов окажется определяющим (Гинзбург и др., 2015б). Однако последовательность информативных спутниковых изображений нефтяных пятен в области вихря в интервале времени, соизмеримом с их временем жизни, до недавнего времени отсутствовала. Имелись лишь единичные подобные наблюдения (Лаврова и др., 2011; Kostianoy et al., 2014; Гинзбург и др., 2015б; Булычева и др., 2016). Это объясняется рядом факторов: малым временем жизни самих пятен (от нескольких часов до первых суток (Manual..., 2005)); нерегулярностью получения информативных спутниковых изображений оптического диапазона из-за высокого процента дней с облачностью в рассматриваемом регионе (Гинзбург и др., 2015а; Лаврова и др., 2016); ограниченным диапазоном скоростей ветра (примерно 3–5 м/с), при которых вихри проявляются на изображениях «всепогодных» радиолокаторов с синтезированной апертурой (Лаврова, 2005; Lavrova et al., 2008; Каримова и др., 2011; Лаврова и др., 2011 и др.). Мало известно также о времени жизни мезомасштабных вихрей в Балтике и механизмах их образования. Известны наблюдения мезомасштабных антициклонов в прибрежной зоне у мыса Таран в течение 8 дней (Гурова, 2012), а также в северной части Гданьского залива на протяжении двух недель в июле–августе 2004 г. (Lavrova et al., 2008; Гинзбург и др., 2015б) и примерно полутора месяцев в мае–июле 2015 г. (Гинзбург и др., 2017).

В данной статье на основе анализа последовательных спутниковых изображений впервые продемонстрировано влияние мезомасштабного вихревого движения на перемещение пятен нефтепродуктов в северной части Гданьского залива и оценены скорости этого перемещения в зависимости от места их попадания в область антициклонического вихря и его присоединенного циклона (вихревого диполя). Отмечено несоответствие наблюдаемой картины перемещения пятен их модельному переносу, полученному в результате использования модели Seatrack Web.

Данные

В работе использованы оптические (видимого и инфракрасного диапазонов спектра) и радиолокационные (РЛИ) спутниковые изображения, соответствующие датам наблюдения на них пятен нефтепродуктов (9 и 10 июня 2015 г.) и ближайшим к ним дням. Это оптические изображения радиометра MODIS спутника Aqua (9 июня, пространственное разрешение $R = 250$ м), AVHRR NOAA-18 (9–10 июня, $R = 1$ км), TIRS Landsat-8 (8 июня, $R = 100$ м), а также РЛИ радаров с синтезированной апертурой (SAR) спутников Sentinel-1A (9 и 11 июня, $R = 10$ м) и Radarsat-2 (10 июня, $R = 100$ м). Наблюдение за мезомасштабной динамикой района исследования охватывал более длительный период примерно в полтора месяца (с 15 мая по 7 июля 2015 г.). Эволюция мезомасштабного антициклонического вихря с присоединенными циклонами в этот период рассмотрена в работе (Гинзбург и др., 2017).

Скорость и направление ветра определялись по метеорологическим данным для открытой части моря по ежедневным прогнозам Междисциплинарного центра математического и компьютерного моделирования Варшавского университета (http://www.meteo.pl/index_en.php). Наблюдавшиеся на спутниковых изображениях перемещения пятен нефтепродуктов сравнивались с результатами прогноза их дрейфа на основе трехмерной модели Seatrack Web, которая учитывает обновляющийся каждые 3 часа прогноз поля ветра и течений и дает прогноз перемещения пятен нефтепродуктов с хорошим пространственным (1 морская миля) и временным (60 мин) разрешением. При этом «модельный» дрейф мог быть рассчитан на 5 суток вперед или восстановлен до 6 суток назад (Лаврова и др., 2011; Лаврова и др., 2016). В нашем случае использовался обратный прогноз дрейфа от времени последнего наблюдения пятен на РЛИ 10 июня 2015 г. ко времени их первоначального обнаружения 9 июня 2015 г.

Наблюдение пятен нефтепродуктов на спутниковых изображениях

Цепочка из пяти пятен нефтепродуктов (1–5) прослеживалась на трех последовательных спутниковых изображениях. Первое ее наблюдение имело место 9 июня 2015 г. в 11:40 GMT на изображении MODIS-Aqua (рис. 1), следующее – через $\Delta t_{1,2} = 4$ ч 47 мин в 16:27 GMT на РЛИ спутника Sentinel-1A 9 июня (рис. 2а) и последнее – через $\Delta t_{2,3} = 23$ ч 47 мин на РЛИ спутника Radarsat-2 10 июня (рис. 3а). Общее время между первым и последним наблюдениями пятен нефтепродуктов составило примерно 29 часов. Длина цепочки пятен на рис. 1, 2а и 3а в течение этого времени практически не менялась (23, 21 и 23 км соответственно); суммарная площадь фрагментов к моменту получения последнего изображения (рис. 3а) заметно увеличилась (9.8, 7.6 и 25.8 км² соответственно), при этом контраст пятен 2–4 заметно уменьшился. Пятна не наблюдались на инфракрасном (ИК) изображении TIRS Landsat-8, принятом 8 июня в 09:42 GMT (рис. 5 в работе

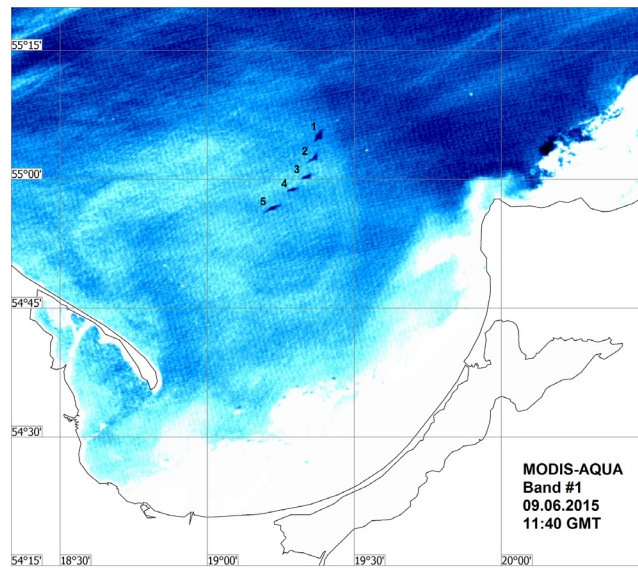


Рис. 1. Фрагмент изображения видимого диапазона (канал 1) радиометра MODIS-Аква, 09.06.2015, 11:40 GMT. Здесь и далее: черные пятна – пятна нефтепродуктов на принятом изображении, цифры 1–5 – номера пятен нефтепродуктов.

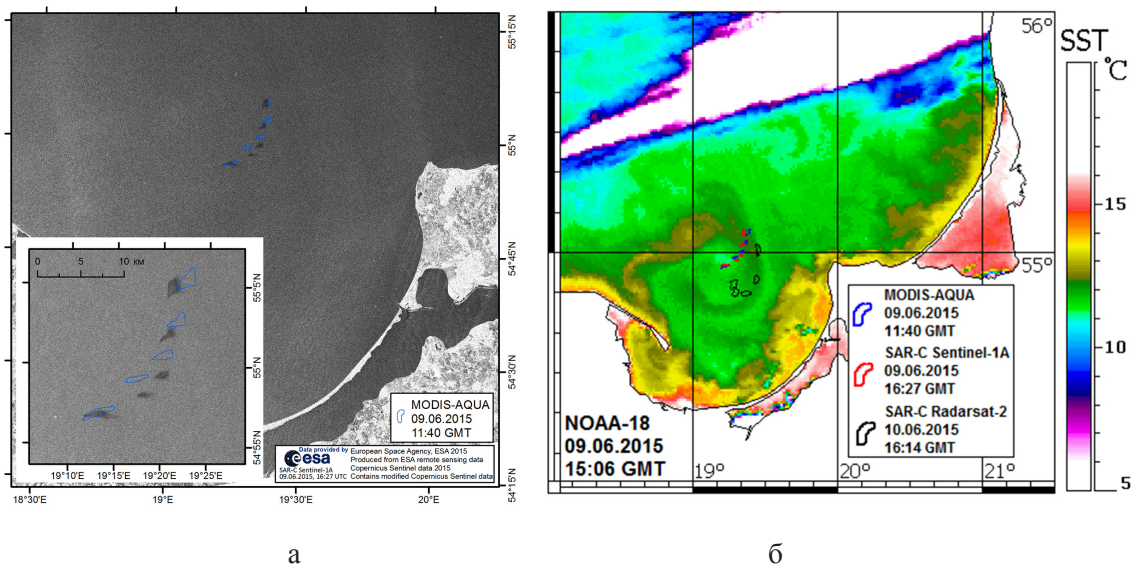


Рис. 2. Фрагменты: а – РЛИ SAR-C Sentinel-1A, 09.06.2015, 16:27 GMT; б – ИК-изображения AVHRR NOAA-18, 09.06.2015, 15:06 GMT. Цветные контуры – очертания пятен нефтепродуктов в соответствии с их положением на предыдущем/ последующих изображениях (указано в легенде на рисунке).

(Гинзбург и др., 2017)); их не было также на РЛИ Sentinel-1A 11 июня (04:59 GMT). Таким образом, время жизни пятен нефтепродуктов не превышало 2.5 суток. Судя по расположению пятен в цепочке, их источником являлось движущееся судно, осуществлявшее сброс нефтесодержащих вод после промывки топливных танков (Булычева и др., 2016).

Рис. 1–4 показывают, что цепочка пятен 1–5 оказалась в области мезомасштабного вихревого диполя из антициклонического вихря с диаметром примерно 35 км и присоединенного циклона на его северной периферии. Этот антициклон не

проявлялся на РЛИ (рис. 2а и 3а), хотя был хорошо виден на близких по времени ИК-изображениях (рис. 2б, 3б). «Невидимость» вихря на РЛИ могла быть обусловлена как скоростью ветра больше 5 м/с, так и недостаточным количеством пленок биогенного происхождения на поверхности моря. 9 июня в районе нефтяного загрязнения наблюдался северный и северо-восточный ветер около 8 м/с, однако днем 10 июня скорость ветра северных направлений не превышала 4–5 м/с.

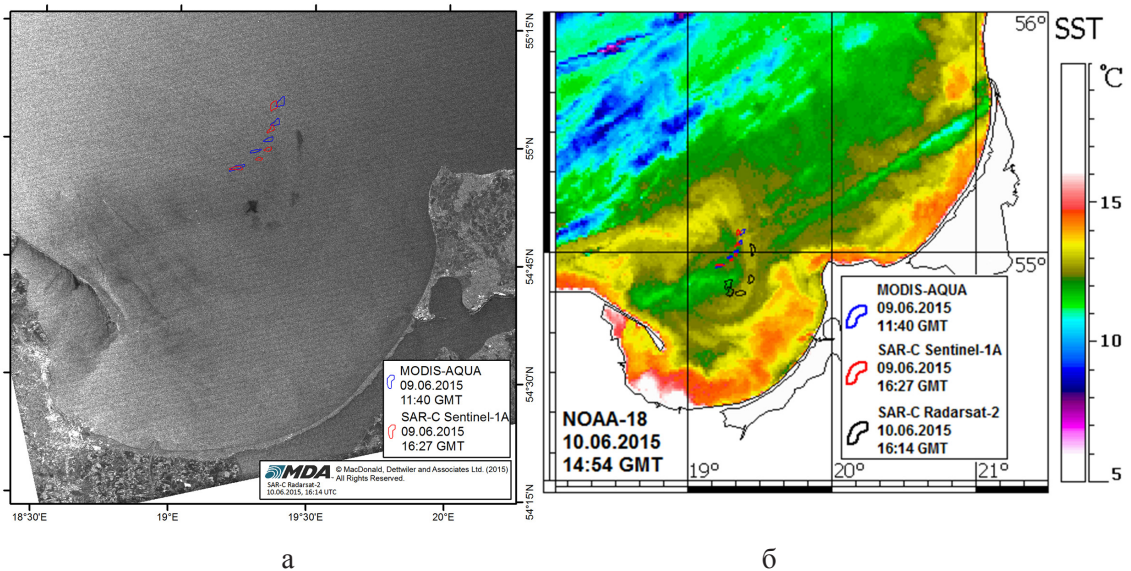


Рис. 3. Фрагменты: а – РЛИ SAR-C Radarsat-2, 10.06.2016, 16:14 GMT; б – ИК-изображения AVHRR NOAA-18, 10.06.2015, 14:54 GMT.

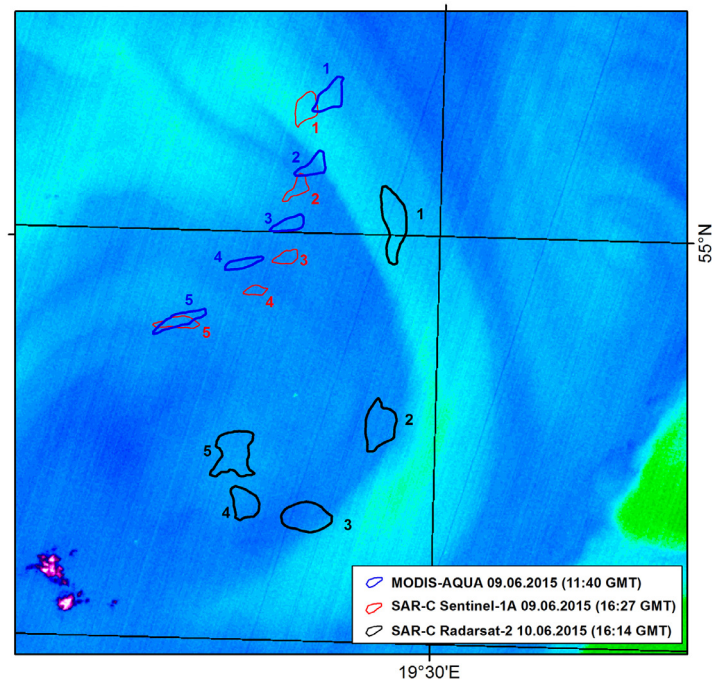


Рис. 4. Фрагмент ИК-изображения TIRS Landsat-8, 08.06.2015, 09:42 GMT, с наложенными контурами пятен нефтепродуктов в соответствии с их положениями на рис. 1, 2а и 3а.

Возможно, недостаточное количество пленок биогенного происхождения было связано как с необычно поздним началом массового цветения цианобактерий в 2015 г. (обычно оно приходится на июнь) из-за холодной погоды (Oberг, 2016; Лаврова и др., 2016), так и со скоплением диатомовых водорослей (весеннее цветение) не на поверхности моря, а в поверхностном слое. В пользу предположения о «невидимости» вихря из-за отсутствия пленок биогенного происхождения на поверхности моря свидетельствует хорошее проявление на рис. 3а кильватерного следа за движущимся судном. Турбулентность в следе, как и наличие на поверхности моря пленок биогенного происхождения и нефтепродуктов, приводит к гашению гравитационно-капиллярных волн и образованию сликов (Лаврова и др., 2016).

Можно видеть, что за время Δt_{1-2} между изображениями на рис. 1 и 2а пятна 1 и 2 цепочки слегка сместились на запад и юго-запад соответственно, 3 и 4 – на юг, а пятно 5 практически осталось на месте. При этом цепочка пятен слегка изогнулась. За время Δt_{2-3} между рис. 2а и 3а за счет более интенсивного смещения в южном направлении пятен 2–4 по сравнению с пятном 5, она приобрела *J*-образную форму.

Наблюдаемый и модельный переносы пятен нефтепродуктов в области вихревого диполя

Как следует из рис. 1 и 4, три южных пятна 3–5 цепочки в момент ее первой регистрации оказались в области мезомасштабного антициклонического вихря, а самое северное – в районе присоединенного циклона на его северной периферии. В период 8–11 июня антициклон практически не менял своего положения (центр – примерно на $54^{\circ}55' \text{с.ш.}$, $19^{\circ}12' \text{в.д.}$). Совместное воздействие течения в присоединенном циклоне на северо-запад и дрейфового течения на юго-запад могло привести к наблюдавшемуся смещению пятна 1 за время Δt_{1-2} на запад. Пятно 5 оказалось наиболее близким к центру антициклона, поэтому его положение за то же время мало изменилось, пятно 2 – на границе между антициклоном и присоединенным циклоном, а пятна 3 и 4 – в области вихревого движения в антициклоне.

За время Δt_{2-3} пятна 1–4 выстроились по периферии антициклона, пятно 5 сместилось ближе к периферии. Положения пятен 1–5 на рис. 4 позволяют оценить средние за интервалы $\Delta t_{1-2} = 4 \text{ ч } 47 \text{ мин}$ и $\Delta t_{2-3} = 23 \text{ ч } 47 \text{ мин}$ скорости их переноса (таблица).

Таблица. Скорость переноса пятен нефтепродуктов, вовлеченных
в вихревое движение

№ пятна	Скорость пятна в интервале Δt_{1-2} , см/с	Скорость пятна в интервале Δt_{2-3} , см/с
1	10.5	11.7
2	10.5	20.2
3	12.8	21.0
4	11.0	17.3
5	0	11.6

Очевидно, что максимальные скорости переноса в обоих интервалах времени были у пятна 3, которое оказалось ближе к периферии антициклона (области наибольших скоростей), наименьшие – у пятна 5, находившегося ближе к центру. Большие скорости перемещения всех пятен наблюдались в интервале $\Delta t_{2,3}$, существенная часть которого пришлась на 10 июня с меньшими скоростями ветра (не более 5 м/с) по сравнению с предыдущим днем (примерно 8 м/с) и с изменившимся направлением ветра (с северо-восточного на северный и северо-западный). При ветровом коэффициенте 0.03 для пятен нефтепродуктов (Manual..., 2005) скорость их перемещения под влиянием ветра могла бы быть не более 15 и 24 см/с соответственно. Орбитальная скорость антициклонического вихря, в области которого находились пятна нефтепродуктов 9 и 10 июня, нам неизвестна. Если предположить, основываясь на результатах измерений орбитальной скорости сравнительно короткоживущего мезомасштабного антициклонического вихря у мыса Таран с диаметром около 20 км (20 см/с, (см. Гурова, 2012)), такой же порядок ее величины, то в интервале $\Delta t_{2,3}$ вклад вихревого течения в суммарный вектор переноса пятен под влиянием вихря и ветра должен был быть определяющим.

Интересно сравнить наблюдавшиеся перемещения нефтяных пятен (рис. 4) с результатами модельного дрейфа на основе модели Seatrack Web (рис. 5). Использовалось моделирование назад с шагом 1 час. На рис. 5 показаны 3 последовательных положения цепочки пятен: в 16:15 GMT 10 июня (принято за начало обратного модельного расчета), в 16:15 GMT 9 июня и в 11:15 GMT 9 июня, близкие по времени к изображениям на рис. 3а, 2а и 1 соответственно. Модель показала лишь равномерное смещение цепочки пятен, при этом ее *J*-образная форма сохранялась. Направление перемещения также не совпадало: вместо наблюдаемого смещения на юг–юго-восток модель показала перемещение цепочки пятен на юго-запад. Очевидно, что восстановленная история переноса пятен с использованием модели, которая не учитывает вихревого движения, не соответствовала наблюдениям.

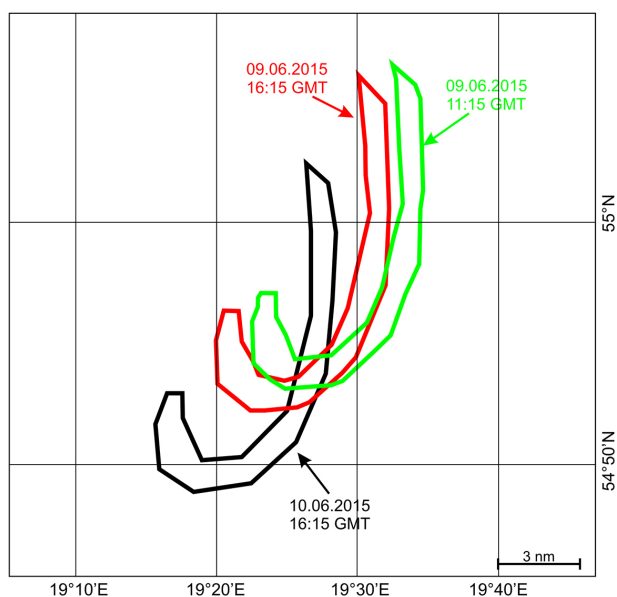


Рис. 5. Последовательные положения цепочки пятен нефтепродуктов в результате моделирования назад с использованием модели Seatrack Web.

Заключение

Выполненный анализ последовательных спутниковых изображений цепочки пятен нефтепродуктов, попавших в область вихревого диполя (мезомасштабного антициклонического вихря и присоединенного циклона), подтвердил предположение о возможном преобладающем влиянии мезомасштабной динамики вод на перемещение пятен нефтепродуктов при типичных для Балтики скоростях дрейфовых течений (Гинзбург и др., 2015б). Три последовательных спутниковых изображения для 9–10 июня 2015 г. (рис. 1–3), принятых в течение времени, соизмеримого со временем жизни пятен нефтепродуктов, впервые наглядно продемонстрировали, как менялась форма цепочки пятен в течение примерно 29 часов из-за различий в скоростях ее отдельных пятен, вовлеченных в вихревое движение, в зависимости от их положения относительно центра/периферии вихря. Наибольшая (около 20 см/с) скорость дрейфа наблюдалась у пятна, оказавшегося в области периферии антициклона (области максимальных скоростей). Наблюдавшийся дрейф пятен под совместным действием ветра и течений в вихревой системе не соответствовал его прогнозу на основе численной модели Seatrack Web, которая не учитывает вихревую динамику. Очевидно, что прогноз перемещения нефтяных и других загрязнений в таких динамически активных районах, как Юго-Восточная Балтика, требует учета локальной мезомасштабной циркуляции вод.

Благодарности: Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М. выполнили исследование за счет темы госзадания № 0149-2019-0004 «Механизмы формирования циркуляционных структур Мирового океана: ключевые процессы в пограничных слоях и их роль в динамике океана на основе экспедиционных исследований, дистанционного зондирования, численного и лабораторного моделирования», Крек Е.В. – по теме госзадания № 0149-2019-0013 «Морские природные системы Балтийского моря и Атлантического океана: формирование природных комплексов Балтийского моря и их изменение под влиянием Атлантического океана и антропогенного воздействия». Авторы выражают благодарность ООО «ЛУКОЙЛ-КМН» за предоставленные радиолокационные изображения.

Литература

- Булычева Е.В., Костяной А.Г. Итоги спутникового мониторинга нефтяного загрязнения морской поверхности Юго-Восточной Балтики за 2004–2013 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 111–126.
- Булычева Е.В., Костяной А.Г., Крек А.В. Межгодовая изменчивость нефтяного загрязнения морской поверхности Юго-Восточной Балтики в 2004–2015 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 74–84.
- Бычкова И.А., Викторов С.В. Параметры вихревых структур и грибовидных течений в Балтийском море по спутниковым изображениям // Исследование Земли из космоса. 1988. № 2. С. 29–35.

А.И. Гинзбург и др.

- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект “Моря СССР”. Т. III. Балтийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф.С. Терзиева, В.А. Рожкова, А.И. Смирновой. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 450 с.
- Гинзбург А.И., Булычева Е.В., Костяной А.Г., Соловьев Д.М. Вихревая динамика в Юго-Восточной Балтике по данным спутниковой радиолокации // *Океанология*. 2015а. Т. 55. № 6. С. 893–902.
- 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*. 2015б. Т. 12. № 3. С. 149–157.
- Гинзбург А.И., Крек Е.В., Костяной А.Г., Соловьев Д.М. Эволюция мезомасштабного антициклонического вихря и вихревых диполей/мультиполей на его основе в Юго-Восточной Балтике (спутниковая информация: май–июль 2015 г.) // *Океанологические исследования*. 2017. Т. 45. № 1. С. 10–22.
- Гурова Е.С. О формировании и динамике вихря у побережья юго-восточной Балтики по данным дистанционного зондирования // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. 2012. Вып. 1. С. 16–21.
- Гурова Е.С., Иванов А.Ю. Особенности проявления гидродинамических структур в юго-восточной части Балтийского моря по данным спектрорадиометров MODIS и космической радиолокации // *Исследование Земли из космоса*. 2011. № 4. С. 41–54.
- 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.
- Лаврова О.Ю. Стики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2005. Т. 2. С. 118–123.
- 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.
- Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., Соловьев Д.М., Голенко М.Н., Голенко Н.Н., Калашиникова Н.А., Демидова 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.
- 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.
- Gurova E., Chubarenko B. Remote sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic // *Oceanologia*. 2012. Vol. 54. No. 4. P. 631–654.
- Horstmann U. Distribution Patterns of Temperature and Water Colour in the Baltic Sea as recorded in Satellite Images: Indicators for Phytoplankton Growth. Kiel: Berichte Institute für Meereskunde, 1983. Vol. 1. No. 106. 147 p.
- Kostianoy A.G., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Solovyev D.M., Lebedev S.A. Satellite monitoring of oil pollution in the Southeastern Baltic Sea // *Oil Pollution in the Baltic Sea / A.G. Kostianoy and O.Yu. Lavrova (Eds.)*. Springer Verlag, 2014. Vol. 27. P. 125–154.
- Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Gade M. Multisensor observation of eddies and mesoscale features in coastal zones // *Remote Sensing of the European Seas / V. Barale, M. Gade (Eds.)*. Springer Verlag, 2008. P. 463–474.
- Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Kostianoy A.G., Semenov A.V. Oil pollution in the southeastern

Baltic Sea in 2009–2011 // Transport and Telecommunication. 2014. Vol. 15. No. 4. P. 322–331.

Manual on oil pollution. Section IV. Combating oil spills. London: IMO Publication, 2nd edition, 2005. 228 p. ISBN 978-92-801-4177-1.

Oberg J. Cyanobacteria blooms in the Baltic Sea // HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets, 2016. URL: <http://helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/eutrophication/cyanobacterial-blooms-in-the-baltic-sea/>.

ON THE ROLE OF MESOSCALE VORTICES IN THE OIL SPILL TRANSPORT IN THE SOUTH-EASTERN BALTIC SEA (SATELLITE INFORMATION)

Ginzburg A.I.¹, Krek E.V.¹, Kostianoy A.G.^{1,2}, Soloviev D.M.³

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russia, e-mail: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, elenka_krek@mail.ru

² S. Yu. Witte Moscow University, Moscow, 115432, Russia

³ Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, 299002, Russia, e-mail: solmit@gmail.com

Submitted 18.02.2019, accepted 26.08.2019

In this paper, on the basis of an analysis of the successive satellite optical images (MODIS-Aqua, TIRS Landsat-8, AVHRR NOAA-18) and radar images (SAR-C Sentinel-1A, SAR-C Radarsat-2) on June 8–11, 2015, the effect of the mesoscale vortex movement (anticyclone with diameter of 35 km and associated cyclone) on the transport of oil spots in the northern part of the Gdansk Bay was demonstrated for the first time. The velocities of this transport are estimated; the observed picture of the movement of the spots is compared with their transfer according to the Seatrack Web model. The largest (about 20 cm/s) drift velocity corresponded to the spot that appeared near the periphery of the anticyclonic vortex (the region of maximum velocities), the smallest one was at the spot near the center of the vortex. At a wind speed of not more than 5 m/s on June 10 and an assumed orbital velocity of the anticyclone of the order of 20 cm/s, the contribution of the vortex motion to the total transport of the spots under the influence of wind and vortex should be decisive. The observed drift of the spots did not correspond to the forecast of their movement by the Seatrack Web numerical model, which did not take into account the vortex dynamics of the waters.

Keywords: the Southeastern Baltic Sea, radar images, optical images, oil pollution, vortices, vortex dipoles, forecast of oil spill drift, model Seatrack Web

References

Bulycheva E.V. and Kostianoy A.G. Itogi sputnikovogo monitoringa neftyanogo zagryazneniya morskoi poverkhnosti Yugo-Vostochnoi Baltiki za 2004-2013 gg. (Results of satellite monitoring of sea surface oil pollution in the Southeastern Baltic Sea in 2004-2013). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 111–126.

Bulycheva E.V., Kostianoy A.G., and Krek A.V. Mezhdogovaya izmenchivost' neftyanogo zagryazneniya morskoi poverkhnosti Yugo-Vostochnoi Baltiki v 2004–2015 gg.

- (Interannual variability of sea surface oil pollution in the southeastern Baltic Sea in 2004–2015). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 74–84.
- Bychkova I.A. and Viktorov S.V.* Parametry vikhrevykh struktur i gribovidnykh techenii v Baltiiskom more po sputnikovym izobrazheniyam (Parameters of eddy structures and mushroom-shaped currents in the Baltic Sea from satellite data). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1988, No. 2, pp. 29–35.
- Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei SSSR. Proekt “Morya SSSR”. (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Project “The seas of the USSR”). Vol. III. The Baltic Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions, ed. F.S. Terziev, V.A. Rozhkov, A.I. Smirnova. St. Peterburg: Gidrometeoizdat, 1992, 450 p.
- Ginzburg A.I., Bulycheva E.V., Kostianoy A.G., and Solovyev D.M.* Vihrevaya dinamika v Yugo-Vostochnoi Baltike po dannym sputnikovoi radiolokatsii (Vortex dynamics in the Southeastern Baltic Sea from satellite radar data). *Okeanologiya*, 2015a, Vol. 55, No. 6, pp. 893–902 (*Oceanology*, 2015, Vol. 55, No. 6, pp. 805–813).
- Ginzburg A.I., Bulycheva E.V., Kostianoy A.G., and Solovyev D.M.* O roli vikhrei v rasprostranении neftnykh zagryaznenii po akvatorii Yugo-Vostochnoi 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*, 2015b, Vol. 12, No. 3, pp. 149–157.
- Ginzburg A.I., Krek E.V., Kostianoy A.G., and Soloviev D.M.* Evolyutsiya mezomasshtabnogo antitsiklonicheskogo vikhrya i vikhrevykh dipolei/multipolei na ego osnove v Yugo-Vostochnoi Baltike (sputnikovaya informatsiya: mai–iyul’ 2015 g.) (Evolution of mesoscale anticyclonic vortex and vortex dipoles/multipoles on its base in the South-Eastern Baltic (satellite information: May–July 2015)). *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2017, Vol. 45, No. 1, pp. 10–22.
- Gurova E.S.* O formirovani i dinamike vikhrya u poberezh’ya Yugo-vostochnoi Baltiki po dannym distantsionnogo zondirovaniya (On formation and dynamics of eddy near the coast of the south-eastern Baltic). *Vestnik Baltiiskogo federalnogo universiteta im. I. Kanta*, 2012, Issue 1, pp. 16–21.
- Gurova E. and Chubarenko B.* Remote sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic. *Oceanologia*, 2012, Vol. 54, No. 4, pp. 631–654.
- Gurova E.S. and Ivanov A.Yu.* Osobennosti proyavleniya gidrodinamicheskikh struktur v yugovostochnoi chasti Baltiiskogo morya po dannym spektrometrov MODIS i sputnikovoi radiolokatsii (Peculiarities of manifestation of hydrodynamic structures in the south-eastern part of the Baltic Sea according spectroradiometer MODIS and radar imagery). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 4, pp. 41–54.
- Horstmann U.* Distribution Patterns of Temperature and Water Colour in the Baltic Sea as recorded in Satellite Images: Indicators for Phytoplankton Growth. *Berichte Institute fur Meereskunde*, Kiel, 1983, Vol. 1, No. 106, 147 p.
- Karimova S.S., Lavrova O.Yu., and Solovyev D.M.* Nablyudeniye vikhrevykh struktur Baltijskogo morya s pomoshch’yu radiolokatsionnykh i radiometricheskikh dannykh (Observation of vortical structures in the Baltic Sea by satellite radar and radiometer data). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 5, pp. 1–9.
- Kostianoy A.G., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Solovyev D.M., and Lebedev S.A.* Satellite monitoring of oil pollution in the Southeastern Baltic Sea, Oil Pollution in the Baltic Sea, A.G. Kostianoy and O.Yu. Lavrova (Eds.). Springer-Verlag, 2014, Vol. 27, pp. 125–154.

- Lavrova O. Yu.* Sliki kak indikatory vikhrevoi aktivnosti v pribrezhnoi zone (Slicks as indicators of vortical activity in the coastal zone). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 2, pp. 118–123.
- Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., and Sheremet N. A.* Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii (Integrated satellite monitoring of Russian seas). Moskva: IKI RAN, 2011, 470 p.
- Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Soloviev D. M., Golenko M. N., Golenko N. N., Kalashnikova N. A., and Demidova A. N.* Vliyanie vetrovogo vozdeistviya i gidrodinamicheskikh protsessov na rasprostranenie vod Kaliningradskogo zaliva v akvatorii Baltiiskogo morya (Influence of wind and hydrodynamic processes on the distribution of waters of the Vistula lagoon in the Baltic Sea). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 76–99.
- Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., and Gade M.* Multisensor observation of eddies and mesoscale features in coastal zones, Remote Sensing of the European Seas. V. Barale, M. Gade (Eds.), Springer Verlag, 2008, pp. 463–474.
- Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., and Kostianoy A. G.* Sputnikovye metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii (Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk). Moskva: IKI RAN, 2016, 335 p.
- Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., and Semenov A. V.* Oil pollution in the southeastern Baltic Sea in 2009-2011. *Transport and Telecommunication*, 2014, Vol. 15, No. 4, pp. 322–331.
- Manual on oil pollution. Section IV. Combating oil spills. London: IMO Publication, 2nd edition, 2005, 228 p., ISBN 978-92-801-4177-1.
- Oberg J.* Cyanobacteria blooms in the Baltic Sea. HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets, 2016. URL: <http://helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/eutrophication/cyanobacterial-blooms-in-the-baltic-sea/>.