Современные возможности проведения комплексного анализа распространения нефтяного загрязнения морской поверхности на примере судового сброса в Лионском заливе

О.Ю. Лаврова, К.Р. Назирова, А.Я. Строчков

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: olavrova@iki.rssi.ru*

В последние годы в связи с запуском новых сенсоров спутникового базирования стали доступны для научных исследований данные, которые обеспечивают качественно новый уровень дистанционных исследований океанических процессов. Благодаря этому на сегодняшний день появились новые возможности, обеспечивающие продвижение в сторону более мелких масштабов в силу улучшения пространственного разрешения сенсоров вплоть до единиц метров; возможность сопоставления радиолокационных и оптических данных, полученных над одним и тем же районом практически одновременно и с одинаковым высоким пространственным разрешением; уменьшение интервала между съемками, что позволяет перейти к изучению развития процессов перемещения и трансформации загрязнений и динамики вод во времени.

В статье представлены результаты использования трех последовательных спутниковых изображений, полученных 19 июня 2017 г. над акваторией Лионского залива Средиземного моря с разницей во времени 5 и 7 ч и пространственным разрешением 10 м, для анализа распространения пленочных загрязнений морской поверхности, вызванных сбросом с судна вод, содержащих нефтепродукты. Наличие спутниковых изображений, полученных в один день, предоставило уникальную возможность детально проследить растекание и дрейф пленочных «нефтяных» загрязнений. Исследовано влияние ветра на распространение пятен поверхностных загрязнений. Выявлено, что в районе начала сброса, ближе к берегу, ветер не оказал влияния на распространение загрязненных вод, происходило только растекание пятен. Высказано предположение, что влияние ветра было скомпенсировано прибрежным противотечением. Мористее, под влиянием юго-юго-восточного ветра, пятна распространялись на северо-запад со средней скоростью 15–19 см/с.

Ключевые слова: нефтяные загрязнения, сброс с судна загрязненных вод, ветровое воздействие, пленочные загрязнения, распространение загрязнений на морской поверхности, радиолокационные изображения, изображения видимого диапазона, Sentinel-1 SAR-C, MSI Sentinel-2, Лионский залив

*Одобрена к печати: 30.08.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-193-203*

Введение

Расширение деятельности нефтегазовой отрасли, строительство и эксплуатация нефтедобывающих платформ на морском шельфе, прокладка по дну моря трубопроводов, интенсификация судоходства, в частности повышение объемов перевозки нефтехимической продукции морским путем, приводит к увеличению загрязнения морской среды пленками нефтепродуктов. Спутниковый мониторинг в настоящее время является основным методом выявления пленочных загрязнений, обобщенно называемых в данной статье «нефтяными» пятнами, а радиолокатор с синтезированной апертурой — основным прибором дистанционного зондирования, позволяющим уверенно выявлять «нефтяное» пятно при умеренных ветрах независимо от погодных условий и времени суток (Лаврова, Митягина, Костяной, 2016; Fiscella et al., 2000; Lavrova et al., 2014; Mityagina, Lavrova, 2016; Shi et al., 2008). Одна из главных проблем, возникающих при проведении мониторинга загрязнений морской поверхности, — это прогноз распространения «нефтяных» пятен. Такой прогноз, как правило, основывается на результатах численного моделирования. Современные региональные модели, как, например, интерактивная оперативная численная модель Seatrack Web (SMHI), разработанная и применяемая для

прогноза дрейфа нефтяных загрязнений в Балтийском море, дают достаточно точные результаты (Kostianoy, Ambjörn, Solovyov, 2014). Однако результаты любого численного моделирования природных процессов необходимо верифицировать натурными измерениями.

До последнего времени достаточно редко удавалось наблюдать эволюцию одного и того же пятна загрязнения морской поверхности пленками нефтепродуктов на последовательных спутниковых изображениях, не считая, естественно, катастрофических разливов нефти. Это можно объяснить двумя причинами: доступностью для научных исследований спутниковых данных преимущественно со средним пространственным разрешением (75–250 м) и большим интервалом во времени между съемками одного и того же района. В 2002–2011 гг. на орбите функционировали два радиолокатора — ERS-2 SAR и Envisat ASAR (а еще раньше тандем ERS-1 и ERS-2 SAR), следующие по одной траектории с разницей во времени 30 мин. Такой промежуток недостаточен для выявления существенных трансформаций поверхностных загрязнений, а за 12 ч между двумя пролетами Envisat на нисходящем и восходящем витках «нефтяные» пятна могли уйти из зоны радиолокационной съемки или сильно деградировать и перестать быть различимыми на изображениях среднего разрешения, которые с 2006 г. предоставлялись Европейским космическим агентством (ЕКА) в свободном доступе.

В течение последних трех лет в связи с запуском спутников с приборами дистанционного зондирования Земли семейства Sentinel (ЕКА) появились данные, которые обеспечивают качественно новый уровень дистанционных исследований океанических процессов. Имеется в виду непрерывный поток данных высокого пространственного разрешения, получаемых в микроволновом, видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра. Благодаря этому на сегодняшний день появились новые возможности, обеспечивающие:

- 1) продвижение в сторону более мелких масштабов в силу улучшения пространственного разрешения сенсоров вплоть до единиц метров;
- 2) возможность сопоставления радиолокационных и оптических данных, полученных над одним и тем же районом практически с небольшим временным интервалом и с одинаковым высоким пространственным разрешением;
- 3) уменьшение интервала между съемками, что позволяет перейти к изучению развития процессов перемещения и трансформации загрязнений и динамики вод во времени;
- 4) последнее, в свою очередь, делает возможным сравнивать результаты спутниковых наблюдений с численным моделированием динамики и трансформации, например, нефтяных загрязнений.

В данной статье представлены результаты использования данных сенсоров спутников Sentinel-1, -2 с целью определения характера эволюции пленочного загрязнения, вызванного сбросом с судна вод, содержащих нефтепродукты в Лионском заливе Средиземного моря.

Район наблюдения и используемые данные

Лионский залив, являющийся частью Средиземного моря, расположен у южного побережья Франции и простирается от Тулона на востоке до границы с Испанией на западе. Глубина в Лионском заливе в основном 50–100 м, максимальная — более 1000 м. Материковый склон очень крутой и прорезан подводными каньонами. На водный режим прибрежной зоны большое влияние оказывает сток реки Рона, образующей в устье дельту с двумя рукавами к западу от Марселя.

Характер течений в Лионском заливе в основном зависит от ветрового режима, пресноводного стока и сезонного прогрева (Houpert et al., 2016). Преобладающим элементом циркуляции является Северное течение — склоновое течение, которое проходит вдоль материкового склона, где оно ограничивает и контролирует внутришельфовую циркуляцию, как правило, разделяя богатые биогенными веществами шельфовые воды и олиготрофные открытые воды Средиземного моря (Ross et al., 2016). Северное течение является частью общей циклонической циркуляции в западной части Средиземного моря (рис. 1).

Рис. 1. Схема основных течений в северо-западной части Средиземного моря (Houpert et al., 2016)

Наблюдается сезонная изменчивость Северного течения. В летний период ширина потока больше (50 км), а глубина проникновения меньше (250 м), при этом его струя отходит мористее. В зимний период основной стержень Северного течения прижимается к берегу, заглубляется до 450 м, а ширина потока при этом уменьшается до 30 км.

При меандрировании Северного течения происходит образование мезомасштабных структур, которые могут проникать внутрь шельфа Лионского залива. Эти «интрузии», как правило, происходят в восточной и центральной части залива, с более редкими случаями — в юго-западной. Тем самым, Северное течение играет ключевую роль в водообмене Лионского залива.

На северо-восточном побережье Лионского залива располагается Марсель, второй по величине город во Франции и один из крупнейших портов Средиземноморья. Он состоит из основного порта, глубоководного района в заливе Фос, нефтеналивной гавани Лавера, районов Каронта и Порт-Сен-Луи-дю-Рон. Основу грузооборота составляют такие морские грузы, как нефть и нефтепродукты. Суммарный оборот морских грузоперевозок основного порта Марсель достигает 110 млн т в год, района Фос — 73,2 млн т в год. Активное судоходство в данном районе способствует частому антропогенному загрязнению морской акватории (Torouzelis et al., 2006).

Исследование распространения одного из таких загрязнений, описанное в данной статье, опирается на данные радиолокационной съемки радиолокаторами с синтезированной апертурой SAR-C Sentinel-1A, -1B, а также на данные видимого диапазона, полученные с помощью прибора Multispectral Imager Instrument (MSI) спутника Sentinel-2A. Основные параметры используемых данных представлены в *табл. 1*.

Таблица 1. Основные характеристики используемых спутниковых данных

<i>Прибор</i>	<i>Спутник</i>	<i>Дата</i>	<i>Время, UTC</i>	<i>Пиксельное разрешение, м</i>	<i>Примечание</i>
SAR-C	Sentinel-1B	19.06.2017	05:43:30	9,8	ВВ-поляризация
MSI	Sentinel-2A	19.06.2017	10:30:21	10,0	Используемые каналы: 4, 3, 2
SAR-C	Sentinel-1A	19.06.2017	17:38:35	9,8	ВВ-поляризация

Следует отметить, что используемые для формирования цветосинтезированного изображения каналы сенсора MSI (красный — 4; зеленый — 3; синий — 2) имеют практически такое же пространственное разрешение — 10 м, как и РЛИ SAR-C Sentinel-1, что облегчает совместный анализ этих данных. Подробное описание технических характеристик Sentinel-1A, -1B и Sentinel-2 и приборов, установленных на этих спутниках, представлено сайте Европейского космического агентства <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides>.

Совместная обработка и анализ спутниковых данных осуществлялись с помощью инструментария спутникового информационного сервиса See The Sea (STS), разработанного в Институте космических исследований РАН (Лупян и др., 2012).

Данные о скорости и направлении ветра были получены с метеорологического сервиса <https://www.meteoblue.com> в рамках совместных исследований с ИКИ РАН. Для расчета параметров ветрового поля в сервисе Meteoblue используется глобальная модель NEMSGLOBAL с пространственным разрешением 30 км и размером ячейки 3×3 км. Моделирование основывается на двух основных технологиях, которые позволяют учитывать/включать в расчеты детальный рельеф, почвенный покров и т. п.:

1) NMM (Nonhydrostatic Meso-Scale Modelling — негидростатическое мезомасштабное моделирование) и

2) NEMS (NOAA Environment Monitoring System — система мониторинга окружающей среды NOAA).

На основе результатов моделирования создается полная ежечасная картина погоды для любой точки на планете, начиная с 1984 г. и по настоящее время. Регулярная валидация данных моделирования и натурных метеоизмерений подтверждает уровень высококачественного прогноза, предоставляемого Meteoblue, и несущественные различия с реальной картиной погоды. Полученные с сервиса Meteoblue данные сравнивались с данными о ветре, переданными скаттерометрами Advanced Scatterometer (ASCAT) METOP-A, -B (<https://manati.star.nesdis.noaa.gov/datasets/ASCATData.php>).

Проявление судового сброса на трех последовательных спутниковых изображениях

19 июня 2017 г. на радиолокационном изображении (РЛИ) SAR-C Sentinel-1B, полученном в 05:43:30 UTC, был выявлен сброс с судна вод, содержащих нефтепродукты (рис. 2). На РЛИ отчетливо в виде яркой белой точки идентифицируется судно, с которого проводился сброс. По информации автоматической системы идентификации судов (AIS), полученной по нашему коммерческому запросу от служб Marine Traffic (<https://www.marinetraffic.com>), было достоверно установлено, что судном-нарушителем являлся нефтехимический танкер (oil/chemical tanker) CATHY THERESA, следующий под датским флагом из Марселя. Полная информация о судне включала его скорость, истинный курс (heading), путевой угол (course), размеры судна и координаты его положения на момент 05:43:52 UTC, т.е. через 22 с после начала радиолокационной съемки (табл. 2). Учитывая, что скорость судна составляла 11,4 узла, что соответствует 5,86 м/с, а длина видимого на РЛИ сброса — 23,22 км, было определено, что сброс загрязненных вод осуществлялся в течение примерно 1 ч 6 мин. Нетрудно подсчитать, что, например, наиболее широкое пятно в начальной части сброса (его ширина по РЛИ определена в 682 м) растекалось со скоростью 19 см/с.

Таблица 2. Основные характеристики судна, полученные по данным АИС на 19 июня 2017 г. в 05:43:52 UTC

Название судна	Тип судна	Флаг	Длина, м	Ширина, м	Скорость, узел	Широта, ° с. ш.	Долгота, ° в. д.
CATHY THERESA	Нефтехимический танкер	Дания	101,39	19,05	11,4	42,8656	4,7366

Практически через пять часов после радиолокационной съемки данная акватория была заснята уже в видимом диапазоне с помощью MSI Sentinel-2A в 10:30:21 UTC (рис. 3). Как видно на изображении MSI, сброс с судна осуществлялся в четыре этапа, три из которых были сделаны уже после радиолокационной съемки и на утреннее РЛИ не попали. Суммарная протяженность сброса составила примерно 35 км.

Рис. 2. Начальный этап сброса загрязненных вод с судна. Фрагмент РЛИ SAR-C Sentinel 1B, полученного над Лионским заливом 19 июня 2017 г. в 05:43:30 UTC

Рис. 3. Проявление «нефтяных» пятен, вызванных сбросом с судна загрязненных вод. Фрагмент MSI Sentinel 2A изображения, полученного 19 июня 2017 г. в 10:30:21 UTC; 2-й спектральный канал — 490 нм

Через семь часов после съемки MSI, в 17:38:35 UTC, была проведена еще одна радиолокационная съемка данного района с помощью SAR-C Sentinel-1A. Выявленный нами ранее сброс был зафиксирован и на вечернем РЛИ (*рис. 4*).

Рис. 4. Проявление «нефтяных» пятен на РЛИ SAR-C Sentinel 1A, полученном 19 июня 2017 г. в 17:38:35 UTC

Анализ параметров распространения загрязнения

Особый интерес представляет совместный анализ всех трех изображений, который проводился в разработанной в ИКИ РАН информационной системе See The Sea (STS). Полуавтоматическим способом (по текстурным характеристикам) на каждом изображении были выделены области поверхностных загрязнений, общая картина представлена на *рис. 5*. Черным цветом отмечен сброс, выявленный на утреннем РЛИ, синим — на MSI и зеленым — на вечернем РЛИ. Была сделана попытка оценить скорость растекания и сноса данного загрязнения морской поверхности и причины, их вызывающие.

Сравним утреннее РЛИ (05:43:30 UTC) и изображение MSI (10:30:21 UTC). В первую очередь обращают на себя внимание пятна в начальной части сброса (область, отмеченная цифрой 1). За шесть часов (пять часов между съемками и примерно один час с начала сброса до утренней радиолокационной съемки) эти пятна загрязнений остались на месте, сноса поверхностного загрязнения практически не наблюдалось, видно, что пятна только растекались. В южной части области 1 можно отметить небольшой снос в восточном направлении. В то же время во второй области наблюдался снос в северо-западном направлении более чем на 2,5 км. Резкое отклонение проявлений «нефтяных» пятен от линии пути

не может быть объяснено резким маневром судна, что подтверждается данными AIS. В этой области сброс с судна осуществлялся прямо во время радиолокационной съемки и сразу после нее. Учитывая разницу во времени между двумя съемками (пять часов), скорость распространения пятен была оценена примерно в 14 см/с.

Рис. 5. Сводная картина распространения загрязнения в Лионском заливе 19 июня 2017 г. Черным цветом отмечен сброс, выявленный на РЛИ, полученном в 05:43:30 UTC; синим — на MSI в 10:30:21 UTC; зеленым — на РЛИ в 17:38:35 UTC. Процессы, происходящие в области 1 и 2, описаны в тексте

Как известно, на распространение пленочных загрязнений влияние оказывают в первую очередь ветер и локальные гидродинамические процессы. По данным метеорологического сервиса <https://www.meteoblue.com>, в интересующий нас период времени с 05:00 по 10:00 UTC скорость ветра увеличивалась с 4,39 до 8,16 м/с, а направление со 120° (юго-восточное) до 163° (юго-юго-восточное) (рис. 6).

Рис. 6. Метеообстановка 19 июня 2017 г. в северо-восточной части Лионского залива (©www.meteoblue.com)

Значит, под действием ветра пленочное загрязнение должно было смещаться в северо-западном направлении. Такая картина и наблюдается в области 2, но этого не происходит в области 1. Одним из объяснений такого несоответствия может служить наличие берегового противотечения. Как показало моделирование, проведенное по основе программы KUST (результаты любезно предоставлены Медведевой А., МГИ РАН, Севастополь), 19 июня 2017 г. в Лионском заливе мог наблюдаться антициклонический круговорот течения, северная ветвь которого, направленная в восточном направлении, теоретически могла оказать компенсирующее ветер влияние. Еще одно объяснение может заключаться в том, что, скорее всего, сброс в области 1 мог быть наиболее обильным, с большим содержанием нефтепродуктов, образовавшаяся здесь пленка была менее подвержена влиянию ветра, который к тому же ближе к берегу мог быть слабее.

Сравнивая вечерний (17:38:35 UTC) РЛИ с изображением MSI, получаем, что наиболее обширное пятно в области 1 (соответствующее максимальному сбросу) за 13 ч (12 ч между съемками и 1 ч с начала сброса до утренней съемки) сместилось на северо-запад только на 3 км, в то же время его площадь увеличилась с 0,61 до 2,24 км². Средняя скорость сноса составила 7 см/с. Скорость сноса в северо-западном направлении остальных пленочных загрязнений составляла от 15 до 19 см/с, вытягиваясь по ветру. При этом ветер в период с 10:00 до 17:00 UTC стихал с 8,16 до 5,7 м/с, а направление менялось с 163° до 175° (практически южное) (рис. 6).

Заключение

Рассмотренный в данной работе пример использования трех последовательных спутниковых изображений для анализа распространения пленочных загрязнений морской поверхности, вызванных судовым сбросом в Лионском заливе, показал, что современные возможности спутникового мониторинга позволяют проводить исследования на новом качественном уровне. Наличие на орбите большого количества приборов дистанционного зондирования, их относительная доступность для широкого круга исследователей, высокое пространственное и временное разрешение позволяют достаточно детально изучать процессы, происходящие на больших морских акваториях, в частности проследить растекание и дрейф нефтяных пятен.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 14-17-00555 с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды (Лупян и др., 2015).

Литература

1. 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.
2. Лупян Е.А., Матвеев А.А., Уваров И.А., Бочарова Т.Ю., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Спутниковый сервис See the Sea — инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–261.
3. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычуглов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
4. Fiscella B., Giancaspro A., Nirchio F., Pavese P., Trivero P. Oil spill detection using marine SAR images // Intern. J. Remote Sensing. 2000. Vol. 21 (18). P. 3561–3566. DOI: 10.1080/014311600750037589.
5. Houpert L., Durrieu de Madron X., Testor P., Bosse A., D'Ortenzio F., Bouin M.N., Dausse D., Le Goff H., Kunesch S., Labaste M., Coppola L., Mortier L., Raimbault P. Observations of open-ocean deep convection in the northwestern Mediterranean Sea: Seasonal and interannual variability of mixing and deep water masses for the 2007–2013 Period // J. Geophysical Research: Oceans. 2016. Vol. 121. P. 8139–8171. DOI: 10.1002/2016JC011857.
6. Kostianoy A.G., Ambjörn C., Solovyov D.M. Seatrack Web — a Numerical Tool for Environmental Risk Assessment in the Baltic Sea // Oil Pollution in the Baltic Sea / eds. A.G. Kostianoy, O.Yu. Lavrova. 2014. Vol. 27. P. 185–220.
7. 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. DOI: 10.2478/ttj-2014-0029.
8. Mityagina M., Lavrova O. Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2016. Vol. 8. Issue 10. 24 p. DOI: 10.3390/rs8100875.
9. Ross O., Frayssé M., Pinazo C., Pairaud I. Impact of an intrusion by the Northern Current on the biogeochemistry in the eastern Gulf of Lion, NW Mediterranean // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2016. Vol. 170. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.022>.
10. Shi L., Ivanov A.Yu., He M.-X., Zhao C. Oil spill mapping in the western part of the East China Sea using synthetic aperture radar imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2008. Vol. 29 (21). P. 6315–6329. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160802175447>.
11. Topouzelis K., Bernardini A., Ferraro G., Meier-Roux S., Tarchi D. Satellite mapping of oil spills in the Mediterranean Sea // Fresenius Environmental Bulletin. 2006. Vol. 15 (9A). P. 1009–1014.

Current capabilities for complex analysis of propagation of oil pollution on the sea surface by example of a ship spill in the Gulf of Lion

O.Yu. Lavrova, K.R. Nazirova, A.Ya. Strochkov

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

In recent years, newly launched satellite sensors have provided data enabling qualitatively higher level of remote sensing of oceanic processes. Better spatial resolution of the data allows examining finer scales down to a few meters; it is now possible to compare radar and optical data obtained almost simultaneously over the same region at close high spatial resolutions; smaller time intervals between data acquisitions allow observing pollution drift and transformation and water dynamics.

This paper presents the results of using three consecutive satellite images captured over the Gulf of Lion in the Mediterranean Sea on the 19th of June 2017 with time intervals of 5 and 7 hours to analyze propagation of oil film occurred on the sea surface due to the discharge of waters contaminated with petroleum products from a ship. The images acquired on the same day presented a unique opportunity to study the spreading and drift of the film in great detail. The effects of wind on the pollution propagation were investigated. It was found that the wind had no effect on the propagation in the immediate region surrounding the source of the spill, near the coastline. The pollutants in this region propagated only by spreading. It was suggested that the effects of wind were partially negated by the coastal counter current. Further out from the coast, the spill patches drifted towards the northwest at an average speed of 15–19 cm/sec, under the influence of a south-southeasterly wind.

Keywords: oil pollution, oil discharge from a ship, wind forcing, oil slicks, spreading of pollution on the sea surface, radar data, visible data, Sentinel 1 SAR-C, Sentinel 2 MSI, Gulf of Lion

Accepted: 30.08.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-193-203

References

1. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Kostianoy A.G., *Sputnikovye metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk), Moscow: IKI RAN, 2016, 335 p.
2. Loupian E.A., Matveev A.A., Uvarov I.A., Bocharova T.Yu., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., *Sputnikovyi servis See the Sea — instrument dlya izucheniya protsessov i yavlenii na poverkhnosti okeana* (Satellite service See the Sea — a tool for investigation of processes and phenomena at the sea surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251–261.
3. Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sydneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
4. Fiscella B., Giancaspro A., Nirchio F., Pavese P., Trivero P., Oil spill detection using marine SAR images, *International Journal of Remote Sensing*, 2000, Vol. 21 (18), pp. 3561–3566. DOI: 10.1080/014311600750037589.
5. Houpert L., Durrieu de Madron X., Testor P., Bosse A., D’Ortenzio F., Bouin M.N., Dausse D., Le Goff H., Kunesch S., Labaste M., Coppola L., Mortier L., Raimbault P., Observations of open-ocean deep convection in the northwestern Mediterranean Sea: Seasonal and interannual variability of mixing and deep water masses for the 2007–2013 Period, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2016, Vol. 121, pp. 8139–8171. DOI: 10.1002/2016JC011857.
6. Kostianoy A.G., Ambjörn C., Solovyov D.M., Seatrack Web — a Numerical Tool for Environmental Risk Assessment in the Baltic Sea, In: *Oil Pollution in the Baltic Sea*, eds. A.G. Kostianoy, O.Yu. Lavrova, 2014, Vol. 27, pp. 185–220.
7. 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, pp. 322–331. DOI: 10.2478/ttj-2014-0029.
8. Mityagina M., Lavrova O., Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution in the Black and Caspian Seas, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, Issue 10, 24 p. DOI: 10.3390/rs8100875.
9. Ross O., Fraysse M., Pinazo C., Pairaud I., Impact of an intrusion by the Northern Current on the biogeochemistry in the eastern Gulf of Lion, NW Mediterranean, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, Vol. 170, pp. 1–9, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.022>.
10. Shi L., Ivanov A.Yu., He M.-X., Zhao C., Oil spill mapping in the western part of the East China Sea using synthetic aperture radar imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 2008, Vol. 29 (21), pp. 6315–6329, <http://dx.doi.org/10.1080/01431160802175447>.
11. Topouzelis K., Bernardini A., Ferraro G., Meier-Roux S., Tarchi D., Satellite mapping of oil spills in the Mediterranean Sea, *Fresenius Environmental Bulletin*, 2006, Vol. 15 (9A), pp. 1009–1014.