Нефтяной разлив на морском терминале Каспийского трубопроводного консорциума под Новороссийском 7 августа 2021 г.: комплексный анализ спутниковых и метеорологических данных

А. Г. Костяной 1,2 , О. Ю. Лаврова 3 , Е. А. Лупян 3

В статье приводятся результаты комплексного анализа спутниковых радиолокационных и оптических изображений акватории северо-восточной части Чёрного моря, где 7 августа 2021 г. произошёл выброс нефти при заправке танкера Minerva Symphony на морском терминале ВПУ-1 АО «Каспийский трубопроводный консорциум» (АО «КТК-Р») в районе пос. Южная Озереевка под Новороссийском. Анализ распространения нефтяного загрязнения и гидродинамики вод был проведён на основе четырёх радиолокационных изображений (РЛИ), полученных радиолокаторами SAR-C спутников Европейского космического агентства Sentinel-1A/B, и двух оптических изображений приборов MODIS-Aqua и MSI-Sentinel-2A. Приведены оценки площади и объёма нефтяного загрязнения по радиолокационным и оптическим изображениям за 7 и 8 августа. На изображении от 7 августа, полученном через 98 мин после аварии, площадь загрязнённой нефтяной плёнкой морской поверхности составила не менее 0,21 км², а 8 августа площадь нефтяного пятна увеличилась до 83 км². С помощью оптического изображения MODIS-Aqua от 8 августа удалось установить форму и площадь нефтяного пятна в промежутке между двумя РЛИ, что позволило доказать преемственность формы нефтяного загрязнения и подтвердить роль субмезомасштабного циклонического вихря в распространении нефтяного загрязнения по акватории моря. Метеорологические данные о скорости и направлении ветра из разных источников использовались для оценки скорости и направления распространения нефтяного загрязнения от источника.

Ключевые слова: Чёрное море, нефтяное загрязнение, Каспийский трубопроводный консорциум, спутниковая радиолокация, оптические изображения, субмезомасштабный вихрь, SAR Sentinel-1, MSI Sentinel-2, MODIS-Aqua

Одобрена к печати: 15.09.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-28-43

Введение

Седьмого августа 2021 г. в 16:49 местного времени произошёл продолжительный выброс нефти в Чёрное море при загрузке танкера Minerva Symphony нефтью на морском терминале ВПУ-1 (выносное причальное устройство) ЗАО «Каспийский трубопроводный консорциум-Р» (КТК-Р) в районе пос. Южная Озереевка под Новороссийском (рис. 1, см. с. 29). Информация об аварии в результате технической неисправности на ВПУ-1 (разрушение внутренней полости гидрокомпенсатора) поступила в 17:30 местного времени или 14:30 UTC (англ. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время) (Прессрелиз..., 2021). По данным КТК-Р и заявлению главы Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор) (Колганова, 2021; Пресс-релиз..., 2021), сначала было объявлено о выбросе 1 м³, затем — 12 м³ и площади загрязнения в 200 м², позже — о 50 м³. Впоследствии было заявлено, что КТК не будет уточнять объём разлива до окончания следствия

Данный инцидент вызвал широкий резонанс в средствах массовой информации, поскольку авария произошла в непосредственной близости от берега в районе туристических

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: kostianoy@gmail.com

² Московский университет имени С. Ю. Витте, Москва, 115432, Россия ³ Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mails: olavrova@iki.rssi.ru, evgeny@d902.iki.rssi.ru

баз и пансионатов, Утришского заповедника и дельфинария в разгар туристического сезона (Губернатор..., 2021). В результате этого расследование причин аварии, изучение её последствий и оценка ущерба окружающей среде вышли на федеральный уровень. 20 октября 2021 г. Росприроднадзор объявил, что ущерб составил примерно 4,5 млрд руб. (https://rpn.gov.ru/news/rosprirodnadzor podschital ushcherb ot posledstviy razliva nefti v novorossiyske/).



Рис. 1. Нефтяное загрязнение, распространяющееся на юго-восток от ВПУ-1 КТК-Р (кадр из видео, опубликованном в интернете, например на сайте РБК (Γ K «РосБизнесКонсалтинг») https://www.rbc. ru/society/12/08/2021/611533a69a7947fe1f179986) (Зыкина, 2021)

Нефтяной разлив площадью более 80 км² был обнаружен нами западнее места аварии 9 августа утром на радиолокационном изображении (РЛИ) спутника Sentinel-1A от 8 августа в 15:20 UTC (18:20 местного времени) после того, как оно было выставлено на сайте Sentinel-Hub (https://www.sentinel-hub.com/) Европейского космического агентства (англ. European Space Agency — ESA). В результате предварительного анализа данных удалось определить траекторию движения нефтяного пятна по акватории в районе нефтяного терминала, оценить площадь и объём нефтяного разлива и понять, почему не произошла экологическая катастрофа в прибрежной зоне (Костяной и др., 2021). Однако оставался ещё ряд вопросов, связанных с механизмами распространения и трансформации нефтяного пятна, которые требовали привлечения дополнительной спутниковой и метеорологической информации для детального анализа происходящего на исследуемой акватории в интервале времени между РЛИ за 7 и 8 августа. Анализ совокупности спутниковых и гидрометеорологических данных осложняется следующими факторами: данные оптических сенсоров были плохого качества из-за облачности, отсутствует подробная гидрометеорологическая информация по скорости и направлению ветра и течений именно по району аварии, а также фактическая информация по объёму разлива, продолжительности истечения нефти из ВПУ-1, скорости истечения, плотности нефти и пр. В настоящей статье представлен анализ всех собранных данных, имеющих отношение к произошедшей аварии.

Данные и методы

Основным признанным методом дистанционного детектирования нефтяной плёнки на морской поверхности выступает спутниковая радиолокация, которая, в частности, успешно используется для анализа нефтяных разливов на водной поверхности в различных странах на протяжении последних 30 лет (Лаврова и др., 2011, 2016; Kostianoy, Lavrova, 2022; Oil..., 2014, 2016, 2018а, b). Спутниковая радиолокация не является прямым методом определения нефтяных загрязнений на морской поверхности, поскольку радиолокатор не видит непосредственно нефтяную плёнку, но она имеет ряд преимуществ перед оптическими приборами. Например, на радиолокационных изображениях чётко определяются зоны морской поверхности, выглаженные от ряби, практически при любых метеоусловиях, включая наличие облачности или отсутствие солнечного света. Одна из причин выглаживания водной поверхности — её загрязнение различными нефтепродуктами и плёнками поверхностно-активных веществ (ПАВ). Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН) и Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) имеют 30-летний опыт работы с радиолокационными данными и опыт дешифрирования радиолокационных изображений для корректного выявления нефтяных загрязнений на морской поверхности, в частности в рамках коммерческих проектов с ведущими нефтегазовыми компаниями России (Лаврова и др., 2011, 2016; Kostianoy, Lavrova, 2022).

Анализ распространения нефтяного загрязнения и гидродинамики вод был проведён на основе четырёх радиолокационных изображений, полученных радиолокаторами SAR-C (англ. Synthetic Aperture Radar) спутников Европейского космического агентства Sentinel-1A/B (пространственное разрешение 20 м), и двух оптических изображений приборов спутникового базирования MODIS-Aqua (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) среднего разрешения (250 м) и MSI-Sentinel-2A (англ. Multispectral Instrument) высокого пространственного разрешения (10 м), полученных 7, 8 и 12 августа 2021 г. Получение, обработка и анализ спутниковой информации (радиолокационных изображений и оптических данных среднего и высокого пространственного разрешения) проводились с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» (Лупян и др., 2019) с помощью инструментария информационной системы See the Sea (Лаврова и др., 2019).

Информация о скорости и направлении ветра была получена с сайта https://earth. nullschool.net/ru/about.html (рассчитывается по модели GFS (англ. Global Forecast System) NCEP (англ. National Centers for Environmental Prediction, Национальные центры экологических прогнозов) Глобальной системы прогнозов Национальной метеорологической службы США (англ. US National Weather Service)). Также с сайта компании ООО «Расписание погоды» (Санкт-Петербург, Россия, https://rp5.ru/docs/about/ru) были взяты данные по скорости, направлению ветра и осадкам по метеостанциям Новороссийска и Анапы, расположенным северо-восточнее (в 12 км) и северо-западнее (в 37 км) Южной Озереевки соответственно (маблица). В самой Южной Озереевке метеостанции Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) нет.

Анализ метеоусловий во второй половине 7 августа и за весь день 8 августа показал, что ветер был неустойчивый, достаточно слабый 7 августа и в первой половине 8 августа, с усилением в утренние часы 8 августа. По данным метеостанций Анапы и Новороссийска, в ночные и утренние часы 8 августа наблюдалась гроза и дождь, в Новороссийске — ливень. Следует заметить, что 7 августа, по данным метеостанций, в отличие от модельных расчётов, ветер был преимущественно южных и юго-восточных румбов, что привело к первоначальному сносу нефтяного пятна к берегу, а с 03:00 8 августа нефтяное пятно стало относить от берега. Анализ метеоданных показал, что грозовой фронт прошёл в ночь с 7 на 8 августа именно в районе аварии между Новороссийском и Анапой, поэтому данные по направлению и скорости ветра по обеим метеостанциям часто не согласуются между собой, а глобальная атмосферная модель не может воспроизводить условия прохождения локальных грозовых фронтов.

Сводная метеорологическая информация по точке ВПУ-1 по данным модели GFS/NCEP/US National Weather Service за 7—8 августа 2021 г. и по метеостанциям Новороссийска и Анапы (гр5.ru)

Дата	Местное время	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с	Трёхчасовые суммы осадков, мм
7 августа 2021 г.	17:00	280	1,4	0,1
	18:00	320		0,5
		Нврс* — 180	1,0	_
		Анапа — 230	2,0	
	19:00	350	2,2	0,5
	20:00	290	1,7	
	21:00	325	1,1	0,4
		Н врс — 70	5,0	Гроза, ливень
		Анапа — 135	2,0	_
	22:00	55	2,2	0,4
	23:00	100	3,3	,
8 августа 2021 г.	00:00	155	1,9	0,1
		Нврс — штиль	Штиль	_
		Анапа — 180	4,0	
	01:00	175	1,9	0,1
	02:00	185	2,8	- ,-
	03:00	100		
		Нврс — 60	1,0	Гроза, ливень
		Анапа — 310	2,0	Гроза, слабый дождь
	04:00	185	3,9	0,1
	05:00	200	4,2	-,-
	06:00	215	- ′	0,5
	00.00	Нврс — 65	2,0	Гроза, ливень
		Анапа — 90	1,0	Гроза, слабый дождь
	07:00	230	3,6	1,2
	08:00			2,1
	09:00	240	4,2	1,8
		Нврс — 150	1,0	Гроза, ливень
		Анапа — 170	9 (до 14)	Гроза, слабый дождь
	10:00	245	3,9	0,7
	11:00			_
	12:00	255	4,7	
		Нврс — 130	1,0	Слабый дождь
		Анапа — 270	2 (14)	
	13:00	260	5,6	нет
	14:00	275	5,0	0,0
	15:00	280		
		Нврс — 180	2,0	Слабый дождь
		Анапа — 260	5,0	нет
	16:00	285	5,0	0,0
	17:00		4,2	
	18:00	300		
		Нврс — 225	2,0	_
		Анапа — 270	1	
	19:00	315	3,3	

^{*} Новороссийск.

Обсуждение полученных результатов

Первое спутниковое изображение района аварии, которое мы отобрали для анализа, было получено с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой C-SAR спутника Европейского космического агентства Sentinel-1A 7 августа в 03:33 UTC (06:33 местного времени), т.е. примерно за 10 ч до аварии (рис. 2). Это изображение оказалось чрезвычайно важным для дальнейшего анализа динамики вод и понимания механизмов распространения нефтяного загрязнения по акватории. Дело в том, что юго-восточнее ВПУ-1 был обнаружен субмезомасштабный циклонический вихрь (отмечен как ЦВ на рис. 2) с координатами центра вихря в точке $44,6045^{\circ}$ с. ш., $37,6748^{\circ}$ в. д. Вихрь имел эллиптическую форму и размеры 5×8 км вдоль малой оси (с северо-запада на юго-восток) и большой оси (с севера-востока на юго-запад). Как будет показано ниже, вихрь смещался в западном направлении со скоростью примерно 10 см/с. В момент радиолокационной съёмки циклонический вихрь вытягивал прибрежные воды в мористую часть, что хорошо видно по сликам (чёрные полосы), вытянутым от берега в сторону открытого моря чуть восточнее ВПУ-1 (см. рис. 2). Если бы авария произошла в этот момент, нефтяное пятно было бы сразу вовлечено в циклоническое движение и распространялось бы на юго-юго-запад. Именно этот циклонический вихрь был обнаружен нами в головной части нефтяного пятна на РЛИ от 8 августа (Костяной и др., 2021).

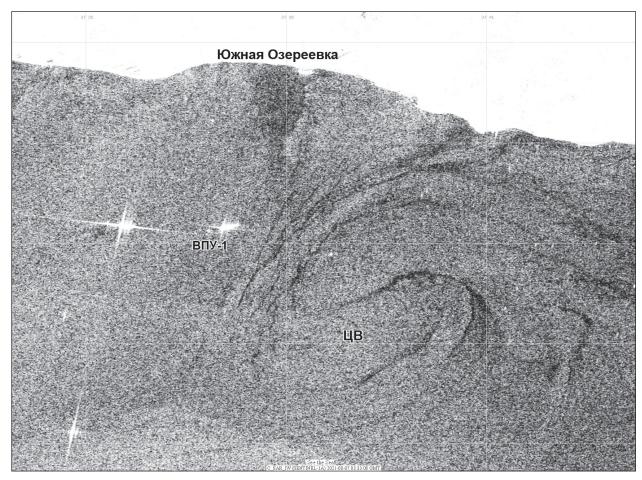
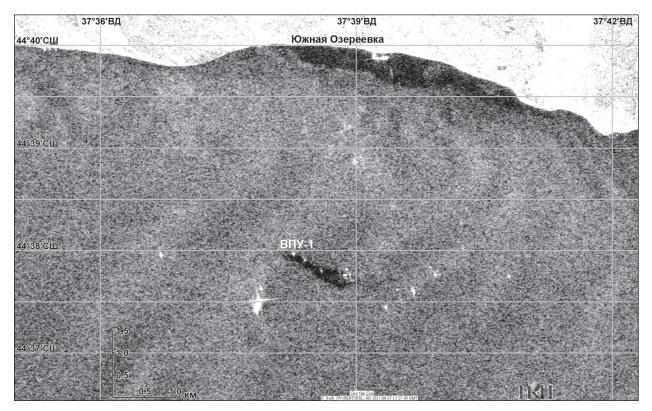


Рис. 2. Фрагмент радиолокационного изображения C-SAR Sentinel-1A от 7 августа 2021 г., полученного в 03:33 UTC. ЦВ — циклонический вихрь (credit: ESA, ИКИ РАН)

Второе спутниковое изображение района аварии было получено с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой C-SAR Sentinel-1B 7 августа в 15:27 UTC (18:27 местного времени), т.е. через 98 мин после начала аварии (*puc. 3*, см. с. 33).



Puc. 3. Нефтяное загрязнение в районе аварии. Фрагмент радиолокационного изображения C-SAR Sentinel-1B от 7 августа 2021 г., полученного в 15:27 UTC (credit: ESA, ИКИ РАН)

На данном РЛИ загрязнение моря нефтью отображается в виде тёмной полосы пониженного радиолокационного сигнала, что обусловлено выглаживанием ряби на водной поверхности. То, что это именно нефть, подтверждается видеозаписью истечения нефти из ВПУ-1, фрагмент которой представлен на рис. 1.

Протяжённость нефтяного следа составила до 1,15 км, площадь нефтяного слика — не менее 0,21 км², что уже в 1000 раз больше площади, объявленной КТК-Р (200 м²). Отметим, что даже на видеозаписи нефтяного разлива в момент аварии, кадр из которой представлен на *рис.* 1, заметно, что площадь разлива (который полностью не виден) не меньше, чем 20×100 м, что уже даёт 2000 м². Минимальное расстояние от места аварии до берега — 4,54 км. Белые точки на снимке — суда на акватории, в том числе в районе нефтяного пятна. Пятно распространяется на юго-восток от ВПУ-1 под действием ветра и течения со скоростью примерно 20 см/с, что рассчитывается по дистанции от ВПУ-1 (источника разлива) до переднего фронта нефтяного пятна и времени между аварией и получением снимка — 98 мин. Достаточно быстрое распространение нефтяного пятна на юго-восток подтверждается и на видеозаписи разлива (по очертаниям береговой линии на кадрах), а также по тому, что всё нефтяное пятно уходит в одну сторону от ВПУ-1 и не растекается вокруг него (см. *рис.* 1).

Метеоданные на момент аварии и приёма РЛИ по скорости хорошо согласуются между собой $(1-2\,\mathrm{m/c})$, но по направлению сильно расходятся. Так, например, в $17:00-18:00\,\mathrm{mect}$ ного времени, согласно модельным данным, ветер дул сначала с запада, потом с северо-запада, что точно соответствует направлению движения нефтяного пятна. По данным с метеостанции Новороссийска, он дул с юга, а с метеостанции Анапы — с юго-запада (см. maблицу). В любом случае такой слабый ветер мог привести к дрейфу пятна только порядка $3-6\,\mathrm{cm/c}$ (считается, что нефтяное пятно в море дрейфует со скоростью примерно $3\,\%$ от скорости ветра), что гораздо меньше зарегистрированных $20\,\mathrm{cm/c}$. Такая большая скорость может быть объяснена только вовлечением в вихревое движение обнаруженного на утреннем снимке (см. $puc.\ 2$) циклонического вихря, который за $10\,\mathrm{ч}$ сместился на северо-запад и своей периферией стал вытягивать нефтяное пятно на юго-восток.

Одновременно головная часть пятна расширилась до 290 м. Это означает, что пятно растекалось и в направлении, поперечном к направлению основного переноса пятна, в результате перепада плотности (гравитационное течение) и поверхностного натяжения со скоростью 4,9 см/с.

Следует отметить, что северо-западный край нефтяного пятна на момент спутниковой радиолокационной съёмки наблюдался непосредственно у ВПУ-1, что может указывать на то, что истечение нефти из ВПУ-1 продолжалось значительное время, как минимум 98 мин, за которые перекрыть утечку нефти на ВПУ-1 не удалось.

Следующее спутниковое изображение, которое было использовано для анализа, — изображение видимого диапазона высокого пространственного разрешения с MSI-Sentinel-2A. Оно было получено 8 августа в 08:27 UTC (11:27 местного времени) над прибрежной акваторией между Южной Озереевкой и Дюрсо (рис. 4). Сплошная облачность, которая стала следствием ночной грозы и дождя (см. таблицу), не позволила получить качественное изображение всей исследуемой акватории, но между облаками достаточно чётко наблюдалась прибрежная зона в непосредственной близости от точки аварии. На снимке хорошо виден речной плюм р. Озерейки, который образовался после сильного дождя ночью и распространялся вдоль берега в сторону Дюрсо. Река Озерейка — это ручей шириной в несколько метров. Речной плюм прижат к берегу, поскольку, согласно метеоданным, дул западный ветер 2—5 м/с (см. таблицу). Нефтяное пятно на данном изображении не просматривается из-за облачности. Необходимо отметить, что отсутствие серьёзного нефтяного загрязнения береговой зоны в этом районе может быть объяснено именно речным плюмом, который всю ночь с 7 на 8 августа распространялся узкой полосой вдоль берега и мог препятствовать контакту нефтяного пятна с берегом.

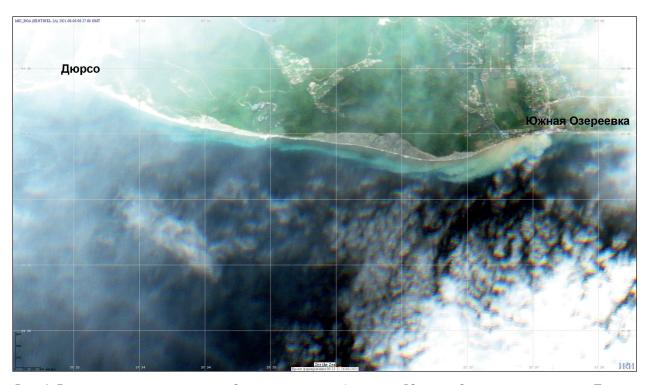


Рис. 4. Распространение плюма р. Озереевки вдоль берега от Южной Озереевки в сторону Дюрсо. Фрагмент изображения MSI Sentinel-2A, полученного 8 августа 2021 г. в 08:27 UTC

Следующее оптическое изображение, которое оказалось более информативным для анализа, было получено 8 августа через $2 \text{ ч} - \text{в}\ 10:25\ \text{UTC}\ (13:25\ \text{местного}\ \text{времени}) - \text{прибором MODIS-Aqua}\ (puc. 5).$ Изображение менее чёткое, чем MSI-Sentinel-2A, поскольку его пространственное разрешение составляет $250\ \text{м}$, и снова облачность и дымка закрыва-

ют большую часть исследуемой акватории. Тем не менее на снимке чётко видно нефтяное пятно, распространяющееся от берега на юг с циклоническим вихрем на конце, которое и вытягивает это пятно от берега в мористую часть. Именно этот циклон и был обнаружен нами на РЛИ от 7 августа (03:33 UTC) (см. *puc. 2*). Координаты центра вихря составляют 44,5947° с. ш., 37,5296° в.д. Таким образом, вихрь «прошёл» 11,53 км за 31 ч со средней скоростью 10,33 см/с. Нефтяное пятно за счёт ветра, дождя и циклонического вихря увеличилось в размерах до 50 км² и вытянулось от берега на расстояние до 12 км.

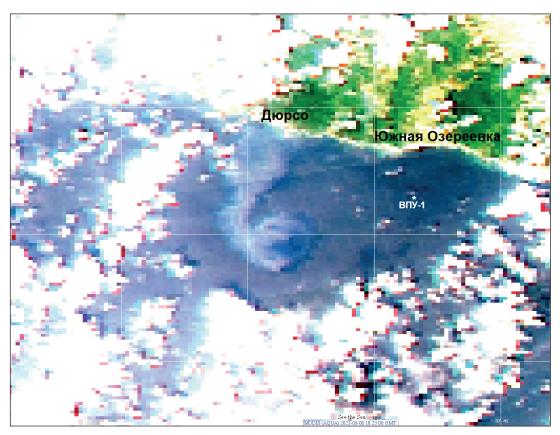
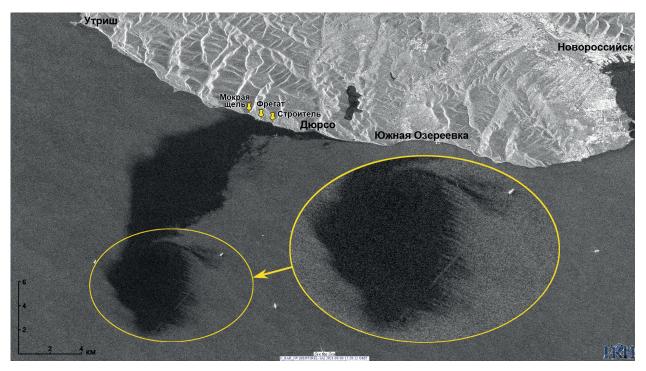


Рис. 5. Проявление нефтяного пятна, вовлечённого в циклонический вихрь, на цветосинтезированном изображении MODIS-Aqua, полученном 8 августа в 10:25 UTC

Смещение нефтяного пятна вдоль берега на северо-запад объясняется влиянием Основного черноморского течения, а его вытягивание на юг от берега (см. *рис.* 5) — ветром, который дул сначала с востока-северо-востока с 03:00 до 09:00, затем он сменился на юго-восточный и продолжался до 12:00. Данные параметры ветра фиксировались на метеостанции Новороссийска, ближайшей к исследуемому району (см. *таблицу*). Циклонический вихрь также вытягивал нефтяное пятно в мористую часть и вовлекал его в своё орбитальное движение (см. *рис.* 5).

Следующее радиолокационное изображение C-SAR Sentinel-1A было получено 8 августа 2021 г. в 15:20 UTC (18:20 местного времени) (рис. 6, см. с. 36), т.е. через 5 ч после оптического изображения MODIS-Aqua (см. рис. 5) и фактически ровно через сутки после второго РЛИ, полученного через 98 мин после аварии (см. рис. 3). Нефтяное пятно под действием ветра (с юго-востока и юга) и вдольберегового течения сместилось в северо-западном направлении и ещё увеличилось по площади с почти 50 до 83 км², по-видимому, уже за счёт вовлечения в циклонический вихрь. Пятно распространилось от берега почти на 20 км в сторону открытого моря сначала на юго-запад, потом на юг. Этому процессу явно способствовал и субмезомасштабный циклонический вихрь, находящийся в головной мористой части нефтяного пятна (см. рис. 6).



Puc. 6. Проявление нефтяного загрязнения морской поверхности на радиолокационном изображении C-SAR Sentinel-1A от 8 августа 2021 г., полученного в 15:20 UTC. На врезке судно, пересёкшее пятно, и след за ним (credit: ESA, ИКИ РАН)

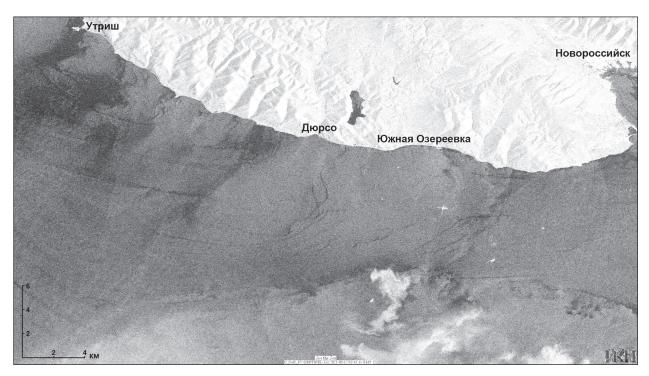


Рис. 7. Фрагмент радиолокационного изображения C-SAR Sentinel-1A от 12 августа 2021 г., полученного в 03:41 UTC (credit: ESA, ИКИ РАН)

На *рис.* 6 видно, что нефтяное пятно касается береговой зоны от пос. Дюрсо до Мокрой щели, что по прямой линии составляет 6 км. В интернете выставлены ролики очевидцев, по-казывающие наличие нефти у берега 8 августа в 19:45 местного времени в районе пансионата «Строитель», 9 августа в 13:00 — в районе пансионата «Фрегат», 10 августа — у пос. Сукко

(севернее Утриша) и 11 августа — в дельфинарии в пос. Большой Утриш (см. *рис.* 6). Следует отметить, что на РЛИ от 8 августа мы не видим нефтяного загрязнения северо-западнее Мокрой щели, однако отдельные нефтяные пятна могут распространяться вдоль берега до Утриша и Сукко, где их наблюдали 10—11 августа.

Обращает на себя внимание судно, которое пересекло южную часть нефтяного пятна в направлении с юго-запада на северо-восток, что на РЛИ проявилось в виде белой прямой линии на фоне тёмного нефтяного пятна. Прямая белая линия в нефтяном пятне — кильватерный след за идущим кораблём (белая точка). Это служит дополнительным косвенным подтверждением, что перед нами именно нефтяное пятно, а не ветровая тень, штилевая область, речной плюм и пр. Координаты судна на момент радиолокационной съёмки составили 44,5105° с. ш., 37,4319° в.д. (см. рис. 6).

На следующем радиолокационном изображении C-SAR Sentinel-1A от 12 августа 2021 г., полученном в 03:41 UTC (06:41 местного времени), явных следов нефтяного загрязнения уже не обнаружено, хотя присутствует масса атмосферных, гидродинамических и других эффектов, дающих сложную картину для интерпретации именно этого радиолокационного изображения (рис. 7). Сравнение РЛИ за 8 и 12 августа показывает, что изображение от 8 августа было лишено всех этих эффектов, что позволило чётко выделить именно нефтяное загрязнение в исследуемом районе.

Собрав и проанализировав все имеющиеся спутниковые изображения и метеоданные, можно сделать следующее предположение о том, как развивалась ситуация с момента возникновения аварии 7 августа в 16:49. Аварийное истечение нефти из ВПУ-1 продолжалась как минимум 98 минут, что подтверждается радиолокационным изображением. Точный объём вытекшей нефти и общее время утечки неизвестны. За это время в море могло вытечь несколько десятков, а может быть и сотен кубометров нефти. Соответствующие оценки приведены в следующем разделе.

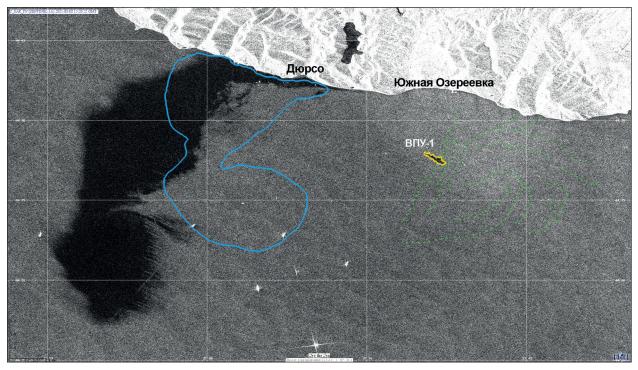


Рис. 8. Смещение нефтяного пятна и циклонического вихря с 7 по 8 августа 2021 г. по серии радиолокационных и оптических спутниковых изображений: жёлтый контур — нефтяное пятно в районе аварии, выявленное на РЛИ от 7 августа в 15:27 UTC; зелёные точки — контур циклонического вихря, выявленного на РЛИ от 7 августа в 03:33 UTC; голубой контур — проявление циклонического вихря на изображении MODIS Aqua от 8 августа в 10:25 UTC. Контуры наложены на РЛИ от 8 августа в 15:20 UTC

Под действием ветра и циклонического вихря нефтяное пятно сначала растянулось на несколько километров на юго-восток, затем его за счёт вовлечения в орбитальное движение циклонического вихря «размазало» по большой акватории и оно достигло берега, одновременно расширяясь по площади за счёт сильного дождя и ветра. Одновременно вихрь с нефтяным пятном переносился на северо-запад Основным черноморским течением со скоростью примерно 10 см/с. С 03:00 до 12:00 8 августа нефтяное пятно вытягивало на юг от берега ветром, дующим сначала с востока-северо-востока (с 03:00 до 09:00), затем — юго-восточным ветром до 12:00 (см. рис. 5). Циклонический вихрь также вытягивал нефтяное пятно в мористую часть и вовлекал его в своё орбитальное движение. В 13:25 площадь нефтяного разлива составила уже почти 50 км², а ещё через 5 ч его площадь увеличилась до 83 км² (рис. 8, см. с. 37). Таким образом, площадь нефтяного разлива в этот период времени увеличивалась примерно со скоростью 6,6 км²/ч, что доказывает возможность быстрого роста площади нефтяного загрязнения ещё на более ранней стадии его развития.

К сожалению, в нашем распоряжении нет радиолокационных изображений в период времени между двумя РЛИ (за 7 августа в 16:49 местного времени и 8 августа в 13:25) для доказательства нашей гипотезы. Если бы не случилась авария на ВПУ-1, то в качестве альтернативной версии произошедшего можно было бы рассматривать сопоставимый по объёму разлив нефти на берегу в районе пос. Дюрсо (см. рис. 8). Однако там нет таких источников нефтепродуктов, местные жители, отдыхающие и природоохранные органы также не сообщали о какой-либо катастрофической аварии, а река (ручей) Дюрсо и пляж в Дюрсо были абсолютно чистыми 8—9 августа, за исключением водорослей, выброшенных на берег ночным штормом.

Оценки объёма нефтяного разлива

ИКИ РАН в своих пресс-релизах не публиковал информацию об объёме нефтяного разлива, поскольку по спутниковым данным его измерить невозможно. Однако оценки объёма нефти, находящейся в пятне от 8 августа (15:20 UTC, см. рис. 6), можно сделать на основе ряда документов и инструкций, в которых имеются таблицы соответствия цветового вида нефтяной плёнки и её толщины (см., например, документы (Воздушное..., 2015; Методика..., 1995)). Учитывая, что после нефтяного разлива прошли сутки, в течение которых происходило интенсивное перемешивание за счёт ночного шторма (утром на пляжи Южной Озереевки, Дюрсо и пансионатов выбросило много водорослей) и дождя в ночь с 7 на 8 августа (см. также интенсивное испарение, можно предположить, что толщина плёнки составляла 0,2-0,4 мкм, что характерно для проявления первых признаков цветности и радужных плёнок. Средняя оценка толщины нефтяной плёнки в 0,2 мкм используется Хельсинкской комиссией по защите морской среды Балтийского моря (ХЕЛКОМ, англ. Helsinki Commission — HELCOM) для оценки объёмов нефтяных пятен на Балтике (Крек и др., 2021; https://helcom.fi/baltic-sea-trends/data-maps). В этом случае объём нефти на 8 августа может быть оценён в 16-32 м³ (18:20 местного времени). Если взять максимальную оценку в 1 мкм, которая упоминается в различных работах и инструкциях (см., например, документы (Воздушное..., 2015; Методика..., 1995)), то объём нефти, содержащийся в этом пятне, составит 80 м^3 , что можно считать максимальной оценкой сверху. Предположив, что 50 %нефти испарилось за сутки после аварии (см. документы (Воздушное..., 2015; Методика..., 1995)), общий объём выброса нефти при аварии можно оценить в 32-64 м³ (максимальный объём составит 160 м³), что примерно соответствует объёму в 50 м³, заявленному КТК (https://www.youtube.com/watch?v=gmorF5qQBew). Реальный объём выброса мог быть и больше с учётом количества собранной нефти, осевшей на дно, ушедшей в промежуточные слои и выброшенной на берег.

Вторую оценку объёма нефтяного пятна можно сделать по РЛИ от 7 августа 2021 г. (15:27 UTC) (см. *puc. 3*). Дело в том, что нефтяное пятно в первые часы после аварии переносилось ветром и течением со скоростью 20 см/с и растекалось поперёк за счёт перепада плотности как гравитационное течение со скоростью 4,9 см/с, поскольку его толщина была

ещё достаточно велика. Очень тонкие плёнки растекаются уже за счёт поверхностного натяжения. В данном случае скорость гравитационного течения при условии двухслойной жидкости можно оценить как $V^2 = g'h$, где V— скорость гравитационного течения; $g' = g \cdot \Delta \rho/\rho$ — редуцированное гравитационное ускорение; h — толщина гравитационного течения; g — сила тяжести; ρ — плотность морской воды; $\Delta \rho$ — перепад плотности между двумя жидкостями (нефть и морская вода). Из этого соотношения следует, что толщина нефтяной плёнки составляет $h = V^2/g' = 0.11$ см при плотности воды Чёрного моря в этом районе примерно 1011.5 кг/m^3 , а тенгизской нефти — 789 кг/m^3 . Площадь нефтяного пятна на снимке от 7 августа (15:27 UTC) (см. puc. 3) составляла 0.21 км^2 , значит объём нефти можно оценить в 230 м^3 , что вполне реалистично для момента аварии с учётом вышеуказанных оценок и факторов.

Третью оценку можно сделать из закона сохранения энергии $mv^2/2 = mgh$ на основе видеозаписи истечения нефти из ВПУ-1. На морском терминале КТК-Р установлены ВПУ системы САLМ производства компании Single Buoy Moorings Inc. (Марчуков, Волков, 2013). Предположим, что ВПУ-1 имеет диаметр 6 м, тогда высоту фонтана нефти по видеозаписи можно оценить в 0,5 м. Из закона сохранения энергии следует, что скорость истечений должна быть равна 3,1 м/с. Предположим, что диаметр трубы, из который вытекает нефть, равен 20 см, тогда расход будет 0,124 м 3 /с и объём вытекшей нефти за 98 мин составит 729 м 3 , если считать, что расход за это время не изменялся. При гидравлическом расчёте фонтанов для истечения жидкости через цилиндрическую насадку применяется коэффициент 0,82, тогда объём вытекшей нефти составит 600 м 3 . К сожалению, отсутствие достоверной информации о размерах ВПУ, расходе нефти и продолжительности аварии не позволяет сделать более точные оценки объёма нефтяного разлива.

Заключение

С начала 2000-х гг. ИКИ РАН и ИО РАН ведут мониторинг нефтяного загрязнения Чёрного моря в рамках ряда национальных и международных проектов. Многочисленные спутниковые и *in situ* наблюдения нефтяного загрязнения Чёрного моря показывают, что северо-восточная часть Чёрного моря и, в частности, прибрежная акватория между Анапой и Геленджиком оказывается зоной экологического риска вследствие большого количества нефтяных пятен, наблюдаемых в этом районе (Литовченко и др., 2007; Лаврова, Митягина, 2012; Лаврова и др., 2016; Мітуадіпа, Lavrova, 2016, Lavrova et al., 2017; Кузнецов, Федоров, 2018; Немировская и др., 2018; Князев и др., 2021). Это объясняется интенсивным судоходством в данном районе, наличием Новороссийского морского торгового порта — крупнейшего порта в России, в состав которого входит несколько нефтяных терминалов, включая КТК-Р в Южной Озереевке, вдольбереговым переносом загрязнений Основным черноморским течением и др. (Князев и др., 2021).

Этот район Чёрного моря требует особого внимания, поэтому здесь необходимо создать систему постоянно действующего комплексного спутникового мониторинга нефтяного загрязнения акватории северо-восточной части Чёрного моря, как это было сделано нами в 2004 г. для Юго-восточной Балтики в связи с началом добычи нефти на платформе D-6 компании «ЛукойлКалининградморнефть» (Лаврова и др., 2011, 2016; Kostianoy et al., 2006; Krek et al., 2021).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Сбор, обработка и анализ спутниковой информации проводился в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164), комплексный анализ динамики наблюдавшегося разлива нефти (А. Г. Костяной) выполнен в ходе проекта «Комплексные исследования экологического состояния вод прибрежной зоны северо-восточного шельфа Чёрного моря в рамках участия в международном проекте DOORS» в рамках Соглашения N 075-15-2021-941. Работа выполнялась с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» (Лупян и др., 2019) и входящей в его состав системы See the Sea (Лаврова и др., 2019).

Литература

- 1. Воздушное наблюдение морских разливов нефти. Практические рекомендации для персонала, отвечающего за управление и ликвидацию чрезвычайных ситуаций: Отчет Международной ассоциации производителей нефти и газа / IPIECA IOGP. № 518. Февр. 2015. 56 с.
- 2. Губернатор Кубани: нефтяное пятно в Черном море не опасно для отдыхающих // vesti.ru. 12 авг. 2021. URL: https://www.vesti.ru/article/2599767.
- 3. *Зыкина Т.* В КТК пришли с обысками после разлива нефти у Новороссийска // rbc.ru. 12 авг. 2021. URL: https://www.rbc.ru/society/12/08/2021/611533a69a7947fe1f179986.
- 4. *Князев Н.А.*, *Лаврова О.Ю.*, *Костяной А.Г.* Спутниковый радиолокационный мониторинг нефтяных загрязнений в акватории Анапа Геленджик за период 2018–2020 гг. // Океанол. исслед. 2021. Т. 49. № 1. С. 163–185. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).8.
- 5. *Колганова В*. Росприроднадзор потребует дисквалификации главы терминала, на котором произошел разлив нефти в Черное море // kommersant.ru. 9 авг. 2021. URL: https://www.kommersant.ru/doc/4936502.
- 6. *Костяной А. Г.*, *Лаврова О. Ю.*, *Лупян Е. А.* Нефтяной разлив на морском терминале Каспийского трубопроводного консорциума под Новороссийском 7 августа 2021 г.: первые результаты спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 304—310. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-304-310.
- 7. *Кузнецов А. Н.*, *Федоров Ю. А.* Нефтяное загрязнение береговой зоны Черного моря в районе г. Новороссийска и динамика его естественной трансформации // Система Черного моря / под ред. А. П. Лисицына. М.: Науч. мир, 2018. С. 705–716. DOI: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.705.
- 8. *Лаврова О. Ю.*, *Митягина М. И.* Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48—65.
- 9. 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.
- 10. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 334 с.
- 11. *Лаврова О. Ю.*, *Митягина М. И.*, *Уваров И. А.*, *Лупян Е. А.* Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
- 12. *Литовченко К. Ц.*, *Лаврова О. Ю.*, *Митягина М. И.*, *Иванов А. Ю.*, *Юренко Ю. И.* Нефтяные загрязнения восточной части Черного моря: космический мониторинг и подспутниковая верификация // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 81—94.
- 13. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151—170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 14. *Марчуков А. Ю.*, *Волков А. А.* Применение ВПУ на международных нефтяных проектах. Опыт КТК // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2013. № 2(10). С. 68–75.
- 15. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах. Минтопэнерго РФ, 1995. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_97 008/0b8c469055ed42b428fb6b30aadeb33fee5bc0b6/.
- 16. *Немировская И.А.*, *Онегина В.Д.*, *Коновалов Б. В.*, *Трубкин И. П.* Углеводороды в водах и донных осадках Черного моря // Система Черного моря / под ред. А. П. Лисицына. М.: Науч. мир, 2018. С. 677—705. DOI: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.677.
- 17. Пресс-релиз от 9 августа 2021 г. // cpc.ru. 9 авг. 2021. URL: http://www.cpc.ru/RU/press/releases/2021/Pages/20210809.aspx.
- 18. *Kostianoy A. G.*, *Lavrova O. Yu*. Satellite instrumentation and technique for oil pollution monitoring of the seas // Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management / eds. A. Di Mauro, A. Scozzari, F. Soldovieri. Springer Nature, 2022. (In press.)
- 19. Kostianoy A. G., Litovchenko K. Ts., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu., Lebedev S. A., Stanichny S. V., Soloviev D. M., Sirota A. M., Pichuzhkina O. E. Operational satellite monitoring of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea: 18 months experience // Environmental Research, Engineering and Management. 2006. No. 4(38). P. 70–77.
- 20. *Krek E. V., Krek A. V., Kostianoy A. G.* Chronic oil pollution from vessels and its role in background pollution in the Southeastern Baltic Sea // Remote Sensing. 2021. V. 13(21). Art. No. 4307. https://doi.org/10.3390/rs13214307.

- 21. *Lavrova O. Yu.*, *Mityagina M. I.*, *Kostianoy A. G.*, *Strochkov M. A.* Satellite Monitoring of the Black Sea Ecological Risk Areas // Ecologica Montenegrina. 2017. V. 14. P. 1–13. URL: http://www.biotaxa.org/em.
- 22. *Mityagina M.*, *Lavrova O*. Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2016. V. 8. Art. No. 75. DOI: 10.3390/rs8100875.
- 23. Oil pollution in the Baltic Sea. The Handbook of Environmental Chemistry / eds. Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu. Berlin; Heidelberg; N. Y.: Springer-Verlag, 2014. V. 27. 268 p.
- 24. Oil pollution in the North Sea / ed. Carpenter A. Cham: Springer, 2016. 312 p. https://doi. org/10.1007/978-3-319-23901-9.
- 25. Oil Pollution in the Mediterranean Sea: Part I The International Context (2018a) / eds. Carpenter A., Kostianoy A. G. Cham: Springer, 2018. 350 p. DOI: 10.1007/978-3-030-12236-2.
- 26. Oil Pollution in the Mediterranean Sea: Part II National Case Studies (2018b) / eds. Carpenter A., Kostianoy A. G. Cham: Springer, 2018. 291 p. DOI: 10.1007/978-3-030-11138-0.

Oil spill at the Caspian Pipeline Consortium marine terminal near Novorossiysk on August 7, 2021: Integrated analysis of satellite and meteo data

A. G. Kostianoy^{1,2}, O. Yu. Lavrova³, E. A. Loupian³

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: kostianoy@gmail.com

² Moscow Witte University, Moscow 115432, Russia

³ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mails: olavrova@iki.rssi.ru, evgeny@d902.iki.rssi.ru

The article presents the results of a comprehensive analysis of satellite radar and optical images of the water area of the northeastern part of the Black Sea where on August 7, 2021, oil was released when loading the Minerva Symphony tanker at the VPU-1 marine terminal of the Caspian Pipeline Consortium JSC (JSC "CPC-R") in the area of the village Yuzhnaya Ozereevka near Novorossiysk. The analysis of the spread of oil pollution and hydrodynamics of water was carried out on the basis of four radar images obtained by SAR-C radars on the European Space Agency Sentinel-1A/B satellites and two optical images from the MODIS-Aqua and MSI-Sentinel-2A satellites. Estimates of the area and volume of oil pollution based on radar and optical images for August 7 and 8 are given. In the SAR image from August 7, obtained 98 minutes after the accident, the area of the sea surface contaminated with oil film was at least 0.21 km², and on August 8, the area of the oil slick increased to 83 km². The optical image of MODIS-Aqua dated August 8 made it possible to establish the shape and area of the oil slick in the interval between the two radar images, which made it possible to prove the continuity of the shape of oil pollution and confirm the role of a submesoscale cyclonic vortex in the spread of oil pollution over the sea. Meteorological data on wind speed and direction from various sources were used to estimate the speed and direction of oil pollution spreading from the source.

Keywords: Black Sea, oil pollution, Caspian Pipeline Consortium, satellite radar, optical images, submesoscale vortex, SAR Sentinel-1, MSI Sentinel-2, MODIS-Aqua

Accepted: 15.09.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-28-43

References

1. *Vozdushnoe nablyudenie morskikh razlivov nefti* (Aerial observation of marine oil spills. Practical guidelines for emergency management and response personnel. International Association of Oil and Gas Producers), IPIECA IOGP, Report No. 518, Feb. 2015, 56 p. (in Russian).

- 2. Gubernator Kubani: neftyanoe pyatno v Chernom more ne opasno dlya otdykhayushchikh (Governor of the Kuban: an oil spill in the Black Sea is not dangerous for vacationers), *vesti.ru*, 12 Aug. 2021 (in Russian), available at: https://www.vesti.ru/article/2599767.
- 3. Zykina T., V KTK prishli s obyskami posle razliva nefti u Novorossiiska (Came to CPC with searches after the oil spill near Novorossiysk), *rbc.ru*, 12 Aug. 2021 (in Russian), available at: https://www.rbc.ru/society/12/08/2021/611533a69a7947fe1f179986.
- 4. Knyazev N. A., Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Satellite radar monitoring of oil pollution in the water area of Anapa—Gelendzhik for the period 2018–2020, *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2021, Vol. 49, No. 1, pp. 163–185 (in Russian), DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).8.
- 5. Kolganova V., Rosprirodnadzor potrebuet diskvalifikatsii glavy terminala, na kotorom proizoshel razliv nefti v Chernoe more (Rosprirodnadzor will require disqualification of the Head of the terminal where the oil spill into the Black Sea took place), *kommersant.ru*, 9 Aug. 2021 (in Russian), available at: https://www.kommersant.ru/doc/4936502.
- 6. Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu., Loupian E. A., Oil spill at the Caspian Pipeline Consortium marine terminal near Novorossiysk on August 7, 2021: first results of satellite observations, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 304–310 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-304-310.
- 7. Kuznetsov A. N., Fedorov Yu. A., Oil pollution of the coastal zone of the Black Sea in the area of Novorossiysk and the dynamics of its natural transformation, In: *Sistema Chernogo morya* (The Black Sea System), A. P. Lisitsyn (ed.), Moscow: Nauchny mir, 2018, pp. 705–716 (in Russian), DOI: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.705.
- 8. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Satellite monitoring of surface film pollution of the Black Sea), *Issledova-nie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 3, pp. 48–65 (in Russian).
- 9. 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. (in Russian).
- 10. 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 areas), Moscow: IKI RAN, 2016, 334 p. (in Russian).
- 11. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A., Loupian E. A., Current capabilities and experience of using the See the Sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 266–287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
- 12. Litovchenko K. Ts., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Ivanov A. Yu., Yurenko Yu. I., Oil pollution of the eastern part of the Black Sea: space monitoring and subsatellite verification, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 1, pp. 81–94 (in Russian).
- 13. Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Radchenko M.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analysis of satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 14. Marchukov A. Yu., Volkov A. A., VPU application in international oil projects. CPC experience, *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov*, 2013, No. 2(10), pp. 68–75 (in Russian).
- 15. Metodika opredeleniya ushcherba okruzhayushchei prirodnoi srede pri avariyakh na magistral'nykh nefteprovodakh (Methodology for determining the damage to the environment in case of accidents at main non-oil pipelines), Mintopenergo RF, 1995 (in Russian), available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_97008/0b8c469055ed42b428fb6b30aadeb33fee5bc0b6/.
- 16. Nemirovskaya I.A., Onegina V.D., Konovalov B.V., Trubkin I.P., Hydrocarbons in the waters and bottom sediments of the Black Sea, In: *Sistema Chernogo morya* (The Black Sea System), A. P. Lisitsyn (ed.), Moscow: Nauchny mir, 2018, pp. 677–705 (in Russian), DOI: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.677.
- 17. Press-reliz ot 9 avgusta 2021 g. (Press release dated August 9, 2021), *cpc.ru*, 9 Aug. 2021 (in Russian), available at: URL: http://www.cpc.ru/RU/press/releas-es/2021/Pages/20210809.aspx.
- 18. Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu., Satellite instrumentation and technique for oil pollution monitoring of the seas, In: *Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management*, A. Di Mauro, A. Scozzari, F. Soldovieri (eds.), Springer Nature, 2022. (In press.)
- 19. Kostianoy A.G., Litovchenko K.Ts., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Bocharova T.Yu., Lebedev S.A., Stanichny S.V., Soloviev D.M., Sirota A.M., Pichuzhkina O.E., Operational satellite monitoring of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea: 18 months experience, *Environmental Research*, *Engineering and Management*, 2006, No. 4(38), pp. 70–77.

- 20. Krek E.V., Krek A.V., Kostianoy A.G., Chronic oil pollution from vessels and its role in background pollution in the Southeastern Baltic Sea, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13(21), Art. No. 4307, https://doi.org/10.3390/rs13214307.
- 21. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., Strochkov M. A., Satellite Monitoring of the Black Sea Ecological Risk Areas, *Ecologica Montenegrina*, 2017, Vol. 14, pp. 1–13, available at: http://www.biotaxa.org/em.
- 22. Mityagina M., Lavrova O., Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution in the Black and Caspian Seas, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, Art. No. 75, DOI: 10.3390/rs8100875.
- 23. *Oil pollution in the Baltic Sea. The Handbook of Environmental Chemistry*, Kostianoy A.G., Lavrova O. Yu. (eds.), Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 2014, Vol. 27, 268 p.
- 24. *Oil pollution in the North Sea*, Carpenter A. (ed.), Cham: Springer, 2016, 312 p., https://doi. org/10.1007/978-3-319-23901-9.
- 25. *Oil Pollution in the Mediterranean Sea: Part I The International Context* (2018a), Carpenter A., Kostianoy A. G. (eds.), Cham: Springer, 2018, 350 p., DOI: 10.1007/978-3-030-12236-2.
- 26. Oil Pollution in the Mediterranean Sea: Part II National Case Studies (2018a), Carpenter A., Kostianoy A.G. (eds.), Cham: Springer, 2018, 291 p., DOI: 10.1007/978-3-030-11138-0.