# Авария танкера Sanchi в Восточно-Китайском море: обнаружение и мониторинг нефтяного загрязнения по радиолокационным и оптическим спутниковым изображениям

### Л. М. Митник, Е. С. Хазанова

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН Владивосток, 690041, Россия E-mails: mitnik@poi.dvo.ru, khazanova@poi.dvo.ru

Изображения, полученные 15–20 января 2018 г. радарами с синтезированной апертурой (РСА) со спутников ALOS-2 на длине волны  $\lambda = 23$  см, Sentinel-1В ( $\lambda = 5,6$  см) и COSMO-SkyMed  $(\lambda = 3 \text{ см})$ , а также камерой Multi Spectral Instrument (MSI) со спутника Sentinel-2, использованы для анализа загрязнения моря конденсатом (сверхлёгкой нефтью), вытекавшим с затонувшего иранского танкера Sanchi. Танкер 6 января столкнулся с сухогрузом в Восточно-Китайском море, загорелся и дрейфовал в юго-восточном направлении до взрыва 14 января. Рассмотрено влияние ветра и течений, найденных по спутниковым данным, на дрейф и форму нефтяных пятен. Отмечено примерное соответствие моделей дрейфа конденсата данным спутниковых наблюдений. Показана корреляция изображений PCA PALSAR-2 и MSI, полученных с разницей во времени в 1 ч 13 мин. Определены контрасты нефти на фоне взволнованной морской поверхности. Выделено несколько градаций загрязнения, отличающихся, по-видимому, степенью однородности и толщины плёнок. Разница между удельной эффективной площадью рассеяния чистой морской поверхности и тёмной полосой конденсата шириной ~1,5 км составляла 2–2,5 дБ. Контраст тёмно-серых плёнок (с небольшим процентом зон чистой воды) составлял ~1,5–2 дБ. Для плёнок, имевших на изображении PCA PALSAR-2 светло-серый тон, контраст был равен ~1 дБ. Контрасты конденсата на  $\lambda = 5.6$  см были больше и менялись от 6-7 до 2-3 дБ при изменении тона плёнок от чёрного до серого при ветре 5 м/с. На изображениях MSI на фоне хорошо различимых ветровых волн выделены циркуляции Ленгмюра: светлые полосы конденсата, чередующиеся с тёмными полосами воды.

Ключевые слова: нефтяные плёнки, конденсат, танкер Sanchi, изображения PCA, MSI, ALOS-2, COSMO-SkyMed, Sentinel-1, Sentinel-2, AMSR2

Одобрена к печати: 21.07.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-246-255

### Введение

6 января 2018 г. произошла крупнейшая за последние десятилетия катастрофа с нефтяными танкерами: иранский танкер Sanchi, перевозивший 111 000 т конденсата природного газа и 1940 т нефтяного топлива, столкнулся в Восточно-Китайском море в точке  $30^{\circ}42'42''$  с. ш.,  $124^{\circ}56'42''$  в.д. с грузовым судном под флагом Гонконга. После взрыва на Sanchi возник пожар, вытекающий конденсат воспламенился на морской поверхности. Под действием ветра горящий танкер сдрейфовал в исключительную экономическую зону Японии. Через 8 дней в 16:45 UTC 14 января после второго взрыва танкер затонул в точке  $28^{\circ}22'$  с. ш.,  $125^{\circ}55'$  в.д. на глубине 115 м. Пожар продолжался до утра 15 января (Hunt, 2018).

Конденсат, в отличие от сырой нефти, не образует пятен на поверхности воды, что затрудняет его обнаружение и мониторинг. Бо́льшая часть просочившегося при дрейфе конденсата, вероятно, растворилась, испарилась и сгорела. Объём конденсата, оставшегося в обломках при затоплении танкера, его химический состав и другие характеристики неизвестны. Поэтому невозможно предсказать экологические последствия аварии Sanchi (Carswell, 2018).

Основные сведения о характеристиках и трансформации в море четырёх классов нефти (удельный вес, относительная плотность (в единицах API — American Petroleum Institute), вязкость, точка застывания и др.) приведены в работе, подготовленной Международной Федерацией владельцев танкеров по предотвращению загрязнения (*англ*. International Tanker Owners Pollution Federation Limited — ITOPF) (Fate..., 2014). В первом классе упомянуты сверхлёгкая нефть и два вида конденсата. Скорее всего, данные ITOPF могут быть использованы и для конденсата танкера Sanchi при моделировании рассеяния радиолокационных (РЛ) сигналов и интерпретации спутниковых изображений PCA (радар с синтезированной апертурой) морской поверхности.

### Дрейф танкера и динамика загрязнения

Положение горящего танкера отслеживалось по дневным и ночным изображениям, полученным сканирующим радиометром VIIRS (*англ*. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) в канале Day/Night Band (500–900 нм) со спутника SNPP (*англ*. Suomi National Polar-orbiting Partnership). Канал предназначен для регистрации слабых сигналов. Координаты дрейфующего танкера определялись по световым/тепловым аномалиям путём применения алгоритма Nightfire ко всем пикселям, включая ситуации с облачностью (Sun et al., 2018). По результатам моделирования было также оценено воздействие ветра на дрейф пятна.

Покрытые нефтью участки моря определялись по изображениям PCA, полученным со спутников ALOS-2 (*англ*. Advanced Land Observing Satellite) на длине волны  $\lambda = 23$  см, Sentinel-1В ( $\lambda = 5,6$  см) и COSMO-SkyMed (*англ*. Constellation of Small Satellites for Mediterranean basin Observation) ( $\lambda = 3$  см), а также камерой MSI (*англ*. Multi Spectral Instrument) со спутника Sentinel-2. На изображениях PCA плёнки выглядят темнее фона. Плёнки гасят мелкомасштабное волнение, и значения удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) о° загрязнённой поверхности меньше, чем у взволнованной чистой. На изображениях MSI пятна нефти на фоне чистой морской поверхности выделялись по светлому тону, в том числе на краях и в просветах облаков. Изображения MSI были получены 13, 18 и 20 января. Траектория дрейфа танкера и изображения со спутников Sentinel приведены в материале (Sentinel Vision EVT-183, 2018, URL: https://visioterra.fr/transfert/CLIENT\_ESRIN/P268\_ESRIN\_SENTINEL\_VISION/stories/EVT-183-SVP\_Sanchi\_China\_Sea\_oil\_spill.pdf).

Зондирование РСА активизировалось из-за угрозы загрязнения после затопления танкера. Национальная служба Китая по применению спутниковых данных для океана получила изображения с группировки спутников Италии COSMO-SkyMed за 15–22 января. 18 января были выполнены измерения со спутника Японии ALOS-2, а 20 января нефтяные плёнки были обнаружены на двух изображениях Европейского космического агентства (*англ.* Еuropean Space Agency — ESA) со спутника Sentinel-1В. Последующий анализ основан на изображениях нескольких PCA, которые с разной степенью детальности приведены в публикациях (Hunt, 2018; Li et al., 2019; Qiao et al., 2019; Sanchi..., 2018), а также предоставлены ESA и JAXA (Японское агентство аэрокосмических исследований, *англ.* Japan Aerospace Exploration Agency).

15—16 января под действием южных ветров пятно конденсата находилось севернее места затопления танкера (*рис. 1*, см. с. 248). 15 января площадь пятна *S* составляла ~60 км<sup>2</sup>. 16 января нефть отмечалась в широкой полосе площадью 70 км<sup>2</sup>, ориентированной с юго-востока на северо-запад. К ней примыкала узкая полоса. 17 января по данным COSMO-SkyMed за 17:42 и 21:11 UTC площадь нефтяных пятен превысила 100 км<sup>2</sup>. Площадь самого большого пятна  $S_{\rm M} \approx 56$  км<sup>2</sup>. С ним соединялась длинная узкая полоса, начинавшаяся у места затопления танкера. Под воздействием ветра северных румбов направление полосы изменилось с северного на восточное. 19 января площадь пятен достигла максимума *S* ≈ 260 км<sup>2</sup> при  $S_{\rm M} \approx 164$  км<sup>2</sup>. Как и в предшествующие дни, к пятну от места затопления тянулась узкая полоса конденсата.

Быстрая изменчивость загрязнения моря отражена на *puc. 1a* (адаптированный и обновлённый puc. 1 из работы (Li et al., 2019)), на котором различным цветом показано положение пятен конденсата по изображениям PCA со спутников COSMO-SkyMed и ALOS-2 за 15– 19 января 2018 г. Пятно на изображении PCA PALSAR-2 (Phased Array type L-band Synthetic Арегture Radar) со спутника ALOS-2 за 18 января отмечено оранжевым цветом (*puc. 16*). Тон плёнки на изображении PALSAR-2 меняется от почти чёрного (узкая полоса внизу *puc. 16*) до светло-серого на краях плёнки, что, возможно, вызвано вариациями толщины и соотношения нефть/вода в пикселях изображения. Вариации яркости связаны также с неоднородностями поля ветра (вверху справа на *puc. 16*) и динамическими явлениями в море. Контуры плёнки на изображениях PCA за 17 (зелёный цвет) и 18 января (оранжевый цвет) (см. *puc. 1a*) хорошо согласуются при разнице во времени в 2 ч. Они близки и к изображению COSMO-SkyMed, полученному через 1,5 ч после PALSAR-2 (Qiao et al., 2019) (не показано).



Рис. 1. Контуры нефтяных плёнок на изображениях РСА, полученных со спутника COSMO-SkyMed в 06:19 UTC 15 января 2018 г. (тёмно-серый цвет), в 04:51 UTC 16 января (синий), в 17:42 UTC 17 января (зелёный), в 05:32 UTC 19 января (фиолетовый) и PALSAR-2 в 03:33 UTC 18 января (оранжевый) (а). Изображение PALSAR-2 на горизонтальной поляризации в 03:33 UTC 18 января (б). Красные линии на *рис. 1а* отмечают границы изображения PALSAR-2, а пунктирный прямоугольник на *рис. 16* — границы фрагмента на *рис. 3*. Красная звёздочка указывает место, где затонул танкер

Изменения положения и очертания пятен на *рис. la*, скорее всего, были вызваны вариациями скорости и направления ветра и поверхностных течений, что следует из анализа спутниковых данных, полученных различными сенсорами. Не исключено также, что менялся и объём конденсата, поступавшего с затонувшего танкера. Пространственно-временная изменчивость ветра была изучена по данным скаттерометра ASCAT (*англ.* Advanced Scatterometer) со спутников MetOp-A/-B (*англ.* Meteorological Operational satellite programme) (https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/coastwatch/products/ascat), многоканальных сканирующих микроволновых радиометров AMSR2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer) со спутника GCOM-W1 (*англ.* Global Change Observation Mission) и GMI (*англ.* Microwave Imager) со спутника GPM (*англ.* Global Precipitation Measurement), данным продукта Blended ASCAT-SSM/I – 6 Hourly wind speed (http://marine.copernicus.eu/web/34-products-and-services-faq.php), прогностической модели GFS (*англ.* Global Forecast System) Национального центра экологических прогнозов США (*англ.* National Centers for Environmental Prediction — NCEP) и картам приземного анализа Японского метеорологического агентства JMA (*англ.* Japan Meteorological Agency).

Район Восточно-Китайского моря между 25–35° с.ш. и 125–135° в.д., где наблюдались слики, 15–20 января 13 раз находился в пределах полосы обзора радиометров AMSR2 и GMI.

По яркостным температурам, измеренным AMSR2 и GMI с использованием алгоритма (Митник, Митник, 2011, 2013), были восстановлены скорость ветра у поверхности *W*, водозапас облаков и паросодержание атмосферы. На *рис. 2* приведены поля ветра за 17 и 18 января, когда плёнка была обнаружена на PCA PALSAR-2 и MSI.



*Рис. 2.* Приводный ветер (м/с) в юго-восточной части Восточно-Китайского моря 17–18 января 2018 г.: по данным AMSR2, полученным в 04:30 UTC (*a*) и 16:30 UTC (*б*) 17 января, в 16:30 UTC 18 января (*в*); по данным GMI в 03:00 UTC (*г*) и 12:00 UTC (*д*) 18 января; по данным ASCAT в 12:22 UTC 17 января (*е*); комбинация данных ASCAT и SSM/I в 6:00 UTC за 18 января (*ж*). Белый круг отмечает место, где затонул танкер

Из анализа формы сликов и временных рядов скорости и направления ветра следует, что 18 января в первые часы после выхода конденсата на поверхность плёнки под действием ветра и течений дрейфовали на запад-северо-запад, а перед этим — преимущественно в восточном направлении до западной периферии течения Куросио примерно до  $126^{\circ} 20'$  в.д. (см. зелёные и оранжевые пятна на *puc. 1*). «Старые» плёнки, образованные конденсатом, вытекшим 15-16 января, под действием течения и вихревых образований дрейфуют на север против ветра. Динамические образования в рассматриваемом районе выделяются при обработке данных альтиметров, видны в поле температуры поверхности океана (ТПО) и на изображениях РСА (*puc. 5*, а также продукт Daily sea water velocity (https://marine.copernicus.eu)). Совместное действие мезо- и субмезомасштабной изменчивости ветра и течений влияет на процесс трансформации плёнок конденсата и затрудняет прогнозирование дрейфа загрязнений (Li et al., 2019; Qiao et al., 2019).

#### Радиолокационные и оптические изображения плёнок конденсата

18 января радиолокационное (PALSAR-2) и оптические (MSI) изображения нефтяного разлива были приняты с интервалом 1 ч 13 мин. Камера MSI, установленная на спутнике Sentinel-2A, снимает полосу шириной 290 км в 13 зонах спектра в диапазоне 443–2190 нм с разрешением от 10 до 60 м. Ширина полосы обзора PCA PALSAR-2 на спутнике ALOS-2 равна 50 км, размер пикселя —  $2,5 \times 2,5$  м. Данные были обработаны в программе Sentinel Application Platform (SNAP). Обработка данных PALSAR-2 включала усреднение исходного изображения до  $10 \times 10$  м. Для снижения уровня спекл-шумов применялся фильтр Lee размером  $25 \times 25$  м.

На фрагментах изображений PALSAR-2 и MSI размером 10×10 км (*рис. 3*) видно резкое изменение направления дрейфа конденсата между участками А и Б. На участке А ширина плёнки составляет ~0,5−0,6 км, а на участках Б и В — ~0,8−1,0 км. В зоне Г полоса размывается, видимо из-за вариаций направления и скорости ветра.



*Рис. 3.* Нефтяные плёнки в районе затопления танкера Sanchi на изображениях PALSAR-2, полученных 18 января 2018 г. в 03:33 UTC со спутника ALOS-2 (*a*, *b*) и MSI, полученных в 02:20 UTC со спутника Sentinel-2 (каналы 4, 3, 2) (*б*, *c*); пунктирные прямоугольники (*a*, *б*) отмечают границы фрагментов (*b*, *c*). Профили УЭПР о° (*д*, *ж*) и коэффициента отражения *R* (*e*, *s*) вдоль сечений 1–3 на *рис. 3а–е.* Красная звёздочка на *рис. 3a*, *б* отмечает место затопления танкера

На изображении MSI яркость плёнки конденсата заметно выше, чем у чистой морской поверхности (см. *рис. 36*). Несмотря на помехи в виде ярких пятен (облака) и тёмных (тени от облаков), плёнка надёжно идентифицируется на участках  $A-\Gamma$ . В зоне  $\Gamma$  узкие полосы конденсата чередуются с полосами воды, что лучше видно на *рис. 36* и 4, а также на участках моря после выхода нефти на поверхность, показанных с лучшим разрешением на *рис. 36*, *е*.

Профили УЭПР и коэффициента отражения *R* вдоль сечений 1, 2 и 3 (красные стрелки) приведены на *puc. 3д*, *з.* Разница значений УЭПР морской поверхности и нефтяной плёнки составляла ~2–2,5 дБ даже вблизи от места выхода нефти на поверхность (профиль 3 на *puc. 3ж*). Здесь, судя по коричневатому цвету плёнки (см. *puc. 3г*), присутствовала бункерная нефть и/или эмульсия нефти с водой. Контраст темно-серых плёнок (с небольшим процентом чистой воды)  $\Delta \sigma^{\circ} \approx 1,0-1,5$  дБ, а для плёнок, имеющих на изображении PCA светло-серый тон (полоса Е на *puc. 3*), контраст  $\Delta \sigma^{\circ} < 1$  дБ (профили 1 и 2 на *puc. 3д*).

На изображении MSI в истинном цвете (см. *рис. 36*) максимальной яркостью обладают облака, а минимальной — тени от них. Различимы и слабоконтрастные полосы, пересекающие

изображение с запада-северо-запада на восток-юго-восток, сигнализирующие о грядовой конвекции в морском пограничном слое атмосферы. Контраст конденсата на фоне чистой поверхности моря значителен, что иллюстрируют *puc. 36, г* и профили коэффициента отражения *R* вдоль разрезов 1–3, на которых выделяются пики при пересечении полос A, Б и B (см. *puc. 3e, 3*). Разница коэффициентов отражения от плёнки конденсата и от поверхности воды меняется от ~0,01 (разрезы 2 и 3) до ~0,017 (разрез 1). В области Г отчётливо выделяются ся вытянутые по ветру узкие полосы конденсата шириной ~100–200 м (см. *puc. 36*). На изображении PCA (см. *puc. 3a*) полосы видны хуже из-за спекл-шумов и небольшого контраста «нефть–вода».



*Рис. 4.* Полосы конденсата на фрагменте изображения MSI в истинном цвете (каналы 4, 3, 2), полученного со спутника Sentinel-2A в 02:20 UTC 18 января 2018 г.

Фрагмент изображения MSI размером  $3,9 \times 3,2$  км, приведённый на *puc.* 4, даёт детальное представление о распределении конденсата на морской поверхности. Наиболее вероятным механизмом образования полос конденсата (сликов) и воды является циркуляция Ленгмюра, при которой наблюдаются чередующиеся зоны конвергенции и дивергенции (Simecek-Beatty, Lehr, 2017). Сликовые полосы конденсата вытянуты по ветру и ориентированы по нормали к волнам, которые распространяются в юго-западном направлении. Длина полос достигает нескольких километров. В нижней части более длинных полос (правая часть *puc.* 4) их направление меняется и, скорее всего, следует за ветром. На карте приземного анализа JMA за 00:00 UTC 18 января в районе нефтяного пятна отмечались слабые ветры 2-3 м/с. В то же время на картах приземного ветра (Blended ASCAT-SSM/I – 6 Hourly wind speed) и по данным AMSR2 и GMI (см. *puc.* 2) в рассматриваемом районе в интервале 00:00–12:00 UTC отмечена более высокая скорость ветра, равная 5-7 м/с. Гребни волн хорошо различимы на изображении MSI. Применение алгоритма быстрого преобразования Фурье даёт значение длины волны 75–80 м и направление распространения 195–200°.

## Завершение мониторинга

20 января нефтяное загрязнение в виде тёмных и серых по тону полос длиной до 60 км и шириной от 0,3 до 1,5 км было обнаружено на изображениях РСА на  $\lambda = 5,6$  см со спутника Sentinel-1B в 09:29 и 21:34 UTC (см. *рис. 5*). Контрасты конденсата менялись от 6–7 дБ (тёмные плёнки) до 2–3 дБ (серые плёнки) при скорости ветра 5 м/с, что заметно выше, чем на длине волны  $\lambda = 23$  см, и соответствует имеющимся представлениям (Fingas, Brown, 2018). Плёнки отмечались на западной периферии течения Куросио в районе  $28^{\circ}40'-29^{\circ}35'$  с. ш.,  $126^{\circ}45'-127^{\circ}055'$  в.д., который характеризуется ярко выраженной динамикой. Помимо плёнок на изображениях РСА были зарегистрированы внутренние и ветровые волны, вихревые образования, фронты течений, которые определённо влияли на дрейф и трансформацию пятен конденсата. Почти на всей площади изображений РСА за 20 января наблюдаются организованные вариации яркости, вызванные ячейковой конвекцией в морском пограничном слое атмосферы. Типичный размер ячеек — ~1,5–2,0 км. Ячейки служат индикатором взаимодействия океана и атмосферы.

Из сопоставления с положением пятен за предыдущие сроки (см. *рис. 1*) следует, что на изображениях со спутника Sentinel-1В видна только часть загрязнённой поверхности. Действительно, нефтяные плёнки на изображении за 21:34 UTC (*рис. 56*) находились севернее и частично перекрывались с обширным пятном, обнаруженным ранее на изображение ях COSMO-SkyMed (The Sanichi's incident..., 2018). Этот вывод подтверждает и изображение MSI, полученное 20 января (не показано) за 7 ч до зондирования Sentinel-1В. На изображении в полосе длиной ~75 км выделяются светлые пятна, в которых видны направленные по ветру узкие длинные полосы конденсата, образованные циркуляцией Ленгмюра. Коэффициент отражения конденсата заметно выше, чем у чистой морской поверхности (Sanchi..., 2018).



*Рис. 5.* Изображения Восточно-Китайского моря с плёнками конденсата, полученные PCA SAR-C на вертикальной поляризации со спутника Sentinel-1В 20 января 2018 г.: *а* — в 09:29 UTC; *б* — в 21:34 UTC

21 января за 16 ч между наблюдениями COSMO-SkyMed в 05:00 и 21:00 UTC площадь пятен стремительно сократилась (Qiao et al., 2019) из-за испарения и растворения конденсата. На следующий день на изображении PCA были обнаружены лишь небольшие по площади разрозненные пятна, и мониторинг района был прекращён (The Sanichi's incident..., 2018).

### Обсуждение и выводы

Авария танкера Sanchi является крупнейшей катастрофой за последние годы. Она привела к обширному загрязнению моря сверхлёгкой нефтью — газовым конденсатом. Взаимодействие конденсата со средой резко отличается от сырой нефти, что усложняет мониторинг, прогноз распространения и эволюции слика. Характеристики конденсата изучены явно недостаточно. В работе (Carswell, 2018) отмечено, что некоторые из химических компонентов конденсата могут существовать недели и даже месяцы и, таким образом, представлять угрозу для экосистемы моря.

Для мониторинга разлива на акватории Восточно-Китайского моря между Китаем и Японией был задействован арсенал различных спутниковых средств, правда с запозданием и не полностью. Из анализа всей совокупности данных следует, что для оценки текущего состояния и прогноза эволюции разлива нефти и снижения ущерба от загрязнения наибольшую ценность имеют спутниковые оптические и радиолокационные изображения с высоким разрешением, которые визуализируют положение разливов, вихревых образований, течений и других динамических образований в океане, а также восстановленные по спутниковым данным поля ветра, охватывающие большую площадь, но с разрешением, значительно уступающим разрешению радиолокационных станций и инструментов в видимом диапазоне.

Ориентация и небольшая ширина полос нефти на изображениях PCA со спутников COSMO-SkyMed и ALOS-2 за 15–19 января (см. *рис. 1*) и Sentinel-1В за 20 января (см. *рис. 5*), а также на видимом изображении, полученном со спутника Sentinel-3 в 02:01 UTC 17 января 2019 г. сенсором OLCI (*англ.* Ocean and Land Color Instrument) с разрешением 300 м (не показано), могут быть обусловлены влиянием ветра, течений и примерным постоянством объёма нефти, вытекающей из затонувшего танкера (Sanchi..., 2018). Нефтяной слик является чувствительным индикатором процессов на поверхности и в подповерхностных слоях моря (Mitnik et al., 2006). Из рассмотрения последовательности изображений PCA, полей приводного ветра, восстановленных по спутниковым данным, и синоптических условий следует, что на дрейф нефтяных пятен оказывали влияние сложные гидрологические и атмосферные условия в районе, где затонул танкер. Очевидно, что учёт поверхностных течений и характеристик ветра необходим как при интерпретации спутниковых изображений нефтяного загрязнения, так и при прогнозе дрейфа нефтяных плёнок, что подтверждают результаты моделирования дрейфа конденсата, вытекавшего из танкера Sanchi (Li et al., 2019; Qiao et al., 2019; Sun et al., 2018).

Для снижения ущерба экосистеме Восточно-Китайского моря и минимизации расходов в результате аварии танкера Sanchi необходимо было располагать оперативной, быстро меняющейся информацией как о разливе конденсата, нового вида нефтяного загрязнения, так и о состоянии поверхности и атмосферы в динамичном районе моря, что могло быть реализовано при активации хартии по катастрофам.

Количество спутников с РСА быстро увеличивается, и поэтому вполне обосновано рассматривать РСА в качестве основного инструмента мониторинга разливов нефти, особенно при измерении на 2–4 поляризациях (Fingas, Brown, 2018).

Облачность и время суток не мешают зондированию поверхности океана. Важным дополнительным, а в ряде случаев и основным источником сведений о нефтяном загрязнении являются изображения MSI. На изображениях MSI нефть обнаруживается и при слабом ветре, когда контрасты «нефть – вода» на изображениях РСА отсутствуют. Кроме того, по спектральным особенностям может быть оценена толщина плёнки и выявлены плёнки эмульсии «нефть – вода» (Gascon, 2020).

Авторы благодарят японское агентство JAXA за изображение PCA со спутника ALOS-2, европейское агентство ESA за изображения со спутников Sentinel-1 и Sentinel-2 и сотрудников Тихоокеанского океанологического института им. В.И.Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук Кулешова В.П., Митник М.Л. и Баранюк А.В. за сбор и обработку данных радиометров AMSR2 и GMI. Работа выполнена в рамках госбюджетных тем № AAAA-A17-117030110037-8 и AAAA-A19-119122090009-2.

# Литература

- 1. *Митник Л. М., Митник М. Л.* Алгоритм восстановления скорости приводного ветра по измерениям микроволнового радиометра AMSR-E со спутника Aqua // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 34–44.
- 2. *Митник Л. М., Митник М. Л.* Мультисенсорный спутниковый мониторинг явлений и процессов в океане и атмосфере // Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана. Кн. 1 / гл. ред. В.А. Акуличев. Владивосток: Дальнаука, 2013. С. 208–230.
- 3. *Carswell C*. Unique oil spill in East China Sea frustrates scientists // Nature. 2018. V. 554. P. 17–18. URL: https://doi.org/10.1038/d41586-018-00976-9.
- 4. Fate of marine oil spills / International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF). 2014. URL: https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/fate-of-oil-spills/ (accessed: 14.07.2020).
- 5. *Fingas M., Brown C.E.* A Review of Oil Spill Remote Sensing // Sensors. 2018. V. 18(1). No. 91. URL: https://doi.org/10.3390/s18010091.
- 6. *Gascon F.* Copernicus Sentinel-2 Mission Overview // GSICS Quarterly Newsletter. 2020. V. 14. No. 1. URL: https://doi.org/10.25923/enp8-6w06.
- 7. *Hunt A*. SANCHI: The ITOPF Perspective. 16 p. 2018. URL: http://www.pcs.gr.jp/doc/esymposium/2018/ ITOPF\_Mr\_Alex\_Hunt\_ppt\_E.pdf (accessed: 14.07.2020).
- Li Y., Yu H., Wang Z., Li Y., Pan Q., Meng S., Yang Y., Lu W., Guo K. The forecasting and analysis of oil spill drift trajectory during the Sanchi collison accident, East-China Sea // Ocean Engineering. 2019. V. 187. 106231. URL: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106231.
- 9. *Mitnik L., Chen K.-S., Wang C.-T.* Reconstruction of surface currents from ERS SAR images of oiltank cleaning slicks // Marine Surface Films. Physico-Chemical Characteristics, Influence on Air-Sea Interactions, and Remote Sensing / eds. M. Gade, H. Hühnerfuss. Germany: Springer, 2006. P. 315–336.
- Qiao F., Wang G., Yin L., Zeng K., Zhang Y., Zhang M., Xiao D., Jiang S., Chen H., Chen G. Modelling oil trajectories and potentially contaminated areas from the Sanchi oil spill // Science of the Total Environment. 2019. V. 685. P. 856–866. URL: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.255.
- 11. Sanchi oil spill seen by Sentinel-1/2/3. 2018. 6 p. URL: https://visioterra.fr/telechargement/A003\_ VISIOTERRA\_COMMUNICATION/HYP-062-VtWeb\_S1+CMEMS\_Sanchi\_oil\_spill\_China\_v03.pdf (accessed 14.07.2020).
- 12. *Simecek-Beatty D., Lehr W.J.* Extended oil spill spreading with Langmuir circulation // Marine Pollution Bull. 2017. V. 122. Iss. 1–2. P. 226–235. URL: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.047.
- Sun S., Lu Y., Liu Y., Wang M., Hu C. Tracking an oil tanker collision and spilled oils in the East China Sea using multisensor day and night satellite imagery // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. No. 7. P. 3212–3220. URL: https://doi.org/10.1002/2018GL077433.
- 14. The Sanichi's incident in the Chinese Sea: a case study. 2018. URL: http://earth.realvista.it/news-media/ item/352-sanichi.html (accessed 14.07.2020).

# Sanchi tanker accident in the East China Sea: Oil pollution detection and monitoring from satellite radar and optical imagery

## L. M. Mitnik, E. S. Khazanova

Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia E-mails: mitnik@poi.dvo.ru, khazanova@poi.dvo.ru

SAR images obtained on January 15–20, 2018 by ALOS-2 at wavelength  $\lambda = 23$  cm, Sentinel-1B at  $\lambda = 5.6$  cm, and COSMO-SkyMed at  $\lambda = 3$  cm and a Multi Spectral Instrument (MSI) camera from the Sentinel-2 satellite, used to analyze sea pollution with condensate (ultra-light oil) leaking from the sunken Iranian tanker Sanchi. On January 6, the tanker collided with a cargo ship in the East China Sea, caught fire and drifted southeast before the explosion on January 14. The influence of wind and currents found from satellite data on the drift and shape of oil spots is considered. The approximate correspondence of condensate drift models with satellite observation data is noted. The correlation of the PALSAR-2 SAR and MSI images obtained with a time difference of 1 hour 13 minutes is shown.

The contrasts of oil against the rough water surface are determined. Several gradations of contamination were distinguished, apparently differing in the degree of uniformity and films thickness. The difference between the clean sea NRCS and NRCS with a condensate film in a strip of ~1.5 km was 2–2.5 dB. The contrast of the dark gray films (with a small percentage of clean water) was approximately 1.5–2 dB. PALSAR-2 SAR image with light gray films has a contrast about 1 dB. The condensate contrasts at  $\lambda = 5.6$  cm were greater and varied from 6–7 to 2–3 dB with a change in the film tone from black to gray with a wind of 5 m/s. Langmuir circulations are highlighted in MSI images against the background of clearly distinguishable wind waves: light condensate streaks alternating with dark streaks of water.

Keywords: oil films, condensate, tanker Sanchi, SAR images, MSI, ALOS-2, COSMO-SkyMed, Sentinel-1, Sentinel-2, AMSR2

Accepted: 21.07.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-246-255

## References

- 1. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Algoritm vosstanovleniya skorosti privodnogo vetra po izmereniyam mikrovolnovogo radiometra AMSR-E so sputnika Aqua (Algorithm of sea surface wind speed retrieval from Aqua AMSR-E measurements), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 6, pp. 34–44.
- Mitnik L. M., Mitnik M. L., Mul'tisensornyi sputnikovyi monitoring yavlenii i protsessov v okeane i atmosfere (Multisensor satellite monitoring of phenomena and processes in the ocean and atmosphere), In: Okeanologicheskie issledovaniya dal'nevostochnykh morei i severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana: Kniga 1 (Oceanological studies of the Far Eastern seas and the northwestern Pacific: Book 1), Vladivostok: Dal'nauka, 2013, pp. 208–230.
- 3. Carswell C., Unique oil spill in East China Sea frustrates scientists, *Nature*, 2018, Vol. 554, pp. 17–18, available at: doi.org/10.1038/d41586-018-00976-9.
- 4. https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/fate-of-oil-spills/ (accessed: 14.07.2020).
- 5. Fingas M., Brown C. E., A Review of Oil Spill Remote Sensing, *Sensors*, 2018, Vol. 18(1), No. 91, available at: https://doi.org/10.3390/s18010091.
- 6. Gascon F., Copernicus Sentinel-2 Mission Overview, *GSICS Quarterly Newsletter*, 2020, Vol. 14, No. 1, available at: https://doi.org/10.25923/enp8-6w06.
- 7. http://www.pcs.gr.jp/doc/esymposium/2018/ITOPF\_Mr\_Alex\_Hunt\_ppt\_E.pdf (accessed: 14.07.2020).
- Li Y., Yu H., Wang Z., Li Y., Pan Q., Meng S., Yang Y., Lu W., Guo K., The forecast and analysis of oil spill drift trajectory during the Sanchi collision accident, East-China Sea, *Ocean Engineering*, 2019, Vol. 187, 106231, available at: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106231.
- 9. Mitnik L., Chen K.-S., Wang C.-T., Reconstruction of surface currents from ERS SAR images of oiltank cleaning slicks, In: *Marine Surface Films. Physico-Chemical Characteristics, Influence on Air-Sea Interactions, and Remote Sensing*, M. Gade, H. Hühnerfuss (eds.), Germany: Springer, 2006, pp. 315–336.
- Qiao F., Wang G., Yin L., Zeng K., Zhang Y., Zhang M., Xiao D., Jiang S., Chen H., Chen G., Modelling oil trajectories and potentially contaminated areas from the Sanchi oil spill, *Science of the Total Environment*, 2019, Vol. 685, pp. 856–866, available at: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.255.
- 11. https://visioterra.fr/telechargement/A003\_VISIOTERRA\_COMMUNICATION/HYP-062-VtWeb\_ S1+CMEMS\_Sanchi\_oil\_spill\_China\_v03.pdf (accessed 14.07.2020).
- 12. Simecek-Beatty D., Lehr W.J., Extended oil spill spreading with Langmuir circulation, *Marine Pollution Bull.*, 2017, Vol. 122, pp. 226–235, available at: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.047.
- Sun S., Lu Y., Liu Y., Wang M., Hu C., Tracking an oil tanker collision and spilled oils in the East China Sea using multisensor day and night satellite imagery, *Geophysical Research Letters*, 2018, Vol. 45, No. 7, pp. 3212–3220, available at: https://doi.org/10.1002/2018GL077433.
- 14. http://earth.realvista.it/news-media/item/352-sanichi.html (accessed: 14.07.2020).