Спутниковый мониторинг распространения нефтяного загрязнения вдоль Сирийского побережья, вызванного аварией в городе Банияс 23 августа 2021 года

Н.А. Князев, О.Ю. Лаврова

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mails: nkkniazev@gmail.com, olavrova@iki.rssi.ru

Представлены результаты спутникового мониторинга акватории восточной части Средиземного моря, куда 23 августа 2021 г. вследствие аварии на электростанции г. Банияс (Сирия) попало несколько тонн нефтепродуктов. На протяжении трёх последующих дней нефтяное пятно распространялось в северном направлении вдоль Сирийского берега к провинции Латакия, а к 29 августа нефтяное загрязнение было выявлено в открытом море в 22 км от восточного берега Северного Кипра. В статье рассмотрена динамика распространения нефтяного пятна по исследуемой акватории под действием ветра и вдольберегового течения, а также представлены оценки изменчивости площадей нефтяного загрязнения с течением времени. Максимальная площадь нефтяного пятна была определена по радиолокационному изображению от 30 августа и составила около 1500 км². Мониторинг нефтяного загрязнения проводился с использованием комплексного подхода на основе данных оптического диапазона космических систем PlanetScope (сенсоры Dove), Sentinel-2 (MSI), Landsat-8 (OLI-TIRS) и радиолокационных данных системы Sentinel-1 (C-SAR). Было проанализировано в общей сложности 29 спутниковых изображений за период с 24 августа по 9 сентября 2021 г. Подготовка, анализ и обработка спутниковых данных выполнена в информационной системе спутникового мониторинга морей и океанов See the Sea, разработанной в Институте космических исследований РАН.

Ключевые слова: Средиземное море, нефтяные загрязнения, спутниковый мониторинг, спутниковая радиолокация, информационная система See the Sea

Одобрена к печати: 04.03.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-295-301

Двадцать третьего августа 2021 г. в результате повреждения одного из топливных резервуаров на тепловой электростанции в сирийском г. Банияс (https://wikimapia.org/3321339/ ru/%D0%A2%D0%AD%D0%A1), который расположен на берегу Левантийского залива, нефть попала в Средиземное море. По данным Сирийского арабского информационного агентства SANA (*анел.* Syrian Arab News Agency), в резервуаре хранилось 15 тыс. т топлива (https://www.timesofisrael.com/massive-oil-spill-caused-by-power-plant-leak-spreads-along-syrian-coast/). Какое количество попало в море — не сообщалось. Для оценки площади нефтяного загрязнения морской поверхности нами были проанализированы все доступные данные спутникового дистанционного зондирования Земли как радиолокационного, так и оптического диапазонов. С учётом имеющегося многолетнего опыта в идентификации нефтяных загрязнений на морской поверхности по спутниковым данным основной упор сделан на анализ данных радиолокационного зондирования (Князев и др., 2021; Лаврова, Митягина, 2012; Лаврова и др., 2011; 2016; Brekke, Solberg, 2005; Espedal, Johannessen, 2000; Gade, Alpers, 1999; Mityagina, Lavrova, 2016; Topouzelis, 2008). Помимо данных радиолокаторов C-SAR спутников Европейского космического агентства (англ. ESA — European Space Agency) Sentinel-1A, -1B были также проанализированы данные видимого диапазона сенсоров MSI (анел. Multispectral Instrument) Sentinel-2, OLI (*aHen*. Operational Land Imager) Landsat-8, MODIS (*aHen*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Aqua/Terra, а также данные оптического диапазона, полученные с американской космической системы PlanetScope (https://www.planet.com/ products/planet-imagery/). Отметим, что PlanetScope — самая большая в мире спутниковая группировка из 200 наноспутников, осуществляющих съёмку в четырёх каналах (Red (красный) — 590-670 нм; Green (зелёный) — 500-590 нм; Blue (синий) — 455-515 нм; NIR (*англ.* near infrared, ближний инфракрасный) — 780-860 нм) на солнечно-синхронной орбите высотой 475 км, предоставляющих данные сенсоров Dove со сверхвысоким пространственным разрешением в 3 м. Основное преимущество этих данных состоит в том, что они покрывают практически весь земной шар и поступают в систему PlanetScope ежедневно. Недостаток системы PlanetScope заключается в том, что установленные на её спутниках приборы нацелены на исследование суши, поэтому проводят съёмку только достаточно узкой полосы прибрежной зоны морской поверхности. Вследствие этой особенности съёмки в рамках нашего мониторинга оптические данные PlanetScope были использованы для исследования распространения нефтяного загрязнения только вдоль побережья Сирии.

Подготовка, анализ и обработка спутниковых данных выполнена в информационной системе спутникового мониторинга See the Sea, разработанной в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) (Лаврова и др., 2019).

Основная цель мониторинга состояла в определении динамики перемещения нефтяного пятна в течение двух недель с момента аварии до момента локализации и ликвидации загрязнения на морской поверхности, а также в оценке его скорости распространения и его площади в разные моменты времени.



Рис. 1. Проявление нефтяного загрязнения на радиолокационном изображении C-SAR Sentinel-1A от 24.08.2021, 03:43:42 UTC. Площадь пятна 20 км²

Ни одно спутниковое изображение за 23 августа не содержало никаких проявлений нефтяных загрязнений в районе г. Банияс. Следовательно, авария произошла после 16:00 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время). Первое спутниковое изображение, на котором было идентифицировано нефтяное загрязнение, было получено с помощью радиолокатора C-SAR спутника Sentinel-1A 24 августа в 03:43:42 UTC (*рис. 1*). На радиолокационном изображении (РЛИ) чётко проявляется тёмное пятно пониженного радиолокационного рассеяния, которое явно деформировано под действием юго-западного ветра. Площадь пятна, оценённого по данному изображению, составила около 20 км², а протяжённость — 11,5 км от берега в районе г. Банияс. *Рис. 2.* Распространение нефтяного загрязнения вдоль побережья Сирии. Цветосинтезированное изображение (RGB каналы) Dove PlanetScope от 24.08.2021, 08:20:46 UTC. Площадь пятна 25 км²

Через 4 ч были получены оптические изображения с помощью приборов Dove Classic спутников (https://developers.planet.com/docs/data/ PlanetScope planetscope/): в 07:28, 07:44 и 08:20 UTC. Нефтяное пятно распространилось на 17 км, и его площадь составила уже более 25 км². Отметим, что в районе пятна хорошо проявилась так называемая «гребенчатая структура» (Ермаков и др., 2018; Mityagina, Lavrova, 2016) (*puc. 2*). Подобные структуры наблюдаются на наветренной стороне нефтяных сликов, и их можно наблюдать на оптических или радиолокационных изображениях достаточно высокого пространственного разрешения (Лаврова, Митягина, 2012; Marmorino et al., 2008). Главная особенность «гребенчатой структуры» состоит в изрезанности границы слика, причём длина «зубьев» зависит от времени, прошедшего после образования слика, и параметров ветрового поля (скорости, направления ветра относительно пятна).

Объяснение природы «гребенчатых структур» основано на перераспределении вещества плёнки под действием роликовых течений — ленгмюровских циркуля-



ций, оси которых ориентированы примерно вдоль ветра (Ермаков и др., 2018).

Заметим, что данные PlanetScope, получаемые с промежутком от 20 до 40 мин (как, например, 24 августа), позволили с большой точностью определять растекание и перемещение нефтяного пятна.

На распространение нефтяного пятна влиял не только ветер, который был постоянного юго-западного направления в течение первых двух дней и, соответственно, прибивал пятно к берегу, но и вдольбереговое течение. Как и в Средиземном море, в Левантийском бассейне преобладает циклоническая многолетняя циркуляция поверхностных вод. Именно этот факт стал одной из ключевых причин перемещения нефтяного загрязнения вдоль Сирийского побережья на север от г. Банияс до провинции Латакия.

Следующее радиолокационное изображение было получено 24 августа в 15:33:27 UTC, т.е. через 12 ч после первого РЛИ и примерно через 7 ч после серии оптических изображений PlanetScope. Нефтяное пятно прибилось к берегу на всём протяжении побережья от г. Банияс до г. Джебла и севернее него на 5 км. Площадь пятна увеличилась до 78 км², а протяжённость вдоль береговой черты — до 25 км (*рис. 3*, см. с. 298).

За 25 августа был получен только один радиолокационный снимок. Время съёмки — 03:34:45 UTC (*puc. 4*, см. с. 298). За 12 ч после предыдущей радиолокационной съёмки пятно распространилось северней г. Джеблы только на 7 км, но под действием переменного восточного-северо-восточного ветра, скорость которого составляла 5–7 м/с, оно стало выноситься в открытое море отдельными струями. Особенно это хорошо видно в районе г. Джеблы. Оценка площади пятна по РЛИ составила 117 км² (см. *puc. 4*).

В дальнейшем ветер сменил направление на юго-западное, и, как показал анализ данных PlanetScope за 25–28 августа 2021 г., нефтяное загрязнение достигло п. Латакия и распространилось в открытое море по направлению к северной оконечности о. Кипр. Оптические данные Dove PlanetScope позволили не только определить местоположение нефтяного загрязнения и оценить его площадь, но и изучить тонкую структуру пятна, выявить характер распределения сгустков нефти в самом пятне (*puc. 5*, см. с. 298).



Рис 3. Нефтяное пятно достигло берега и растянулось от г. Банияс до г. Джебла. Фрагмент РЛИ C-SAR Sentinel-1B от 24.08.2021, 15:33:27 UTC. Площадь пятна составила 78 км²



Рис 4. Проявление нефтяного пятна на РЛИ C-SAR Sentinel-1В от 25.08.2021, 03:34:45 UTC. Площадь нефтяного пятна 117 км²



Рис. 5. Проявление тонкой структуры нефтяного пятна на цветосинтезированном изображении (RGB-каналы) Dove PlanetScope от 27.08.2021, 07:33:28 UTC

Наибольший интерес представляют два РЛИ за 29 и 30 августа, когда нефтяное пятно достигло своих максимальных размеров. Что способствовало распространению пятна на восток — не очень понятно. Направление ветра сохранялось практически постоянно юго-югозападным. Возможно, циклоническое вдольбереговое течение имеет в районе п. Латакия направление на восток, точных сведений мы не имеем. Но судя по структуре пятна на этих двух РЛИ, оно было захвачено вихревыми структурами, которые распространялись на восток (*puc. 6*). Для определения площади пятна, имеющего сложную форму, в информационной системе See the Sea была применена классификация с обучением к РЛИ от 29 августа (время съёмки 15:41:42 UTC). На её основании было чётко выделено именно нефтяное пятно и вычислена его площадь, которая составила 788 км² (зелёная область на *puc. 6*). Пятно находилось в 22 км от м. Апостола Андрея (Северный Кипр). В момент съёмки у берегов Сирии наблюдался южный ветер, а у берега Северного Кипра — северо-западный, который не давал пятну распространяться к берегу.



Рис. 6. Результат классификации с обучением нефтяного пятна, выявленного на РЛИ от 29.08.2021, 15:41:42 UTC (зелёная область), наложенный на РЛИ от 30.08.2021, 03:43:03 UTC. Площадь пятна, по данным радиолокационной съёмки, составила около 1500 км²

К 30 августа 2021 г., согласно РЛИ, полученному в 03:43:03 UTC, нефтяное пятно находилось всего в 13,5 км от побережья о. Кипр и сдвигалось на север. Площадь пятна только в открытом море составляла более 1250 км², а вдоль побережья Сирии — 220 км² (см. *рис. 6*). К этому моменту кипрскими и турецкими властями была начата операция по ликвидации нефтяного разлива, которая продолжалась несколько дней. На последующих спутниковых изображениях, которые стали доступны начиная с 4 сентября, следов нефтепродуктов в районе Кипра не наблюдается. А вот вдоль побережья Сирии они идентифицируются как на РЛИ, так и на оптических изображениях как минимум до 12 сентября. Такое длительное нахождение нефтяного загрязнения на морской поверхности вдоль береговой черты может быть объяснено тем, что оно смывалось с берега, а никакие работы по очистке берегов и прибрежной акватории не проводились.

Авторы благодарят Европейское космическое агентство за предоставление данных спутников Sentinel-1 и Sentinel-2, а также компанию Planet Labs (США) за возможность получать данные PlanetScope по индивидуальной научно-образовательной лицензии. Работа выполнена в рамках темы «Мониторинг», госрегистрация № 122012400187-6.

Литература

- 1. Ермаков С.А., Лаврова О.Ю., Капустин И.А., Ермошкин А.В., Мольков А.А., Даниличева О.А. О гребенчатой структуре границ сликов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 208–217. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-208-217.
- 2. *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
- 3. Лаврова О. Ю., Митягина М. И. Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48–65.
- 4. 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. 480 с.
- 5. 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.
- 6. 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.
- Brekke C., Solberg A. Oil spill detection by remote sensing // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 95. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.rse.2004.11.015.
- 8. *Espedal H.A., Johannessen O. M.* Detection of oil spills near offshore installations using synthetic aperture radar (SAR) // Intern. J. Remote Sensing. 2000. V. 21. No. 11. P. 2141–2144.
- Gade M., Alpers W. Using ERS-2 SAR images for routine observation of marine pollution in European coastal waters // Science of the Total Environment. 1999. V. 237–238. P. 441–448. DOI: 10.1016/ S0048-9697(99)00156-4.
- 10. *Marmorino G., Smith G. B., Toporkov J. V., Sletten M.A., Perkovich D., Frasier S.J.* Evolution of ocean slicks under a rising wind // J. Geophysical Research. 2008. V. 115. C04030.
- 11. *Mityagina M., Lavrova O.* Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2016. V. 8. Art. No. 875. DOI: 10.3390/rs8100875.
- 12. *Topouzelis K. N.* Oil spill detection by SAR images: Dark formation detection, feature extraction and classification algorithms // Sensors. 2008. V. 8. P. 6642–6659. DOI: 10.3390/s8106642.

Satellite monitoring of oil pollution spreading along the Syrian coast caused by the accident in Baniyas on August 23, 2021

N.A. Knyazev, O.Yu. Lavrova

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mails: nkkniazev@gmail.com, olavrova@iki.rssi.ru

The paper presents the results of satellite monitoring of the eastern Mediterranean Sea where several tons of oil spilled due to a power plant accident in Baniyas (Syria) on August 23, 2021. Over the next three days the oil slick spread north along the Syrian coast to the province of Latakia. By August 29, oil pollution was detected in the open sea at a distance of 22 km from the eastern coast of Northern Cyprus. The article considers the spreading dynamics of the oil slick over the study area under the influence of wind and alongshore currents and also presents estimates of oil pollution area variability over time. The maximum area of the oil slick was 1500 km², as derived from a radar image of August 30. Oil pollution monitoring was carried out using an integrated approach based on optical data of PlanetScope (Dove), Sentinel-2 (MSI) and Landsat-8 (OLI-TIRS) satellites and Sentinel-1 (C-SAR) radar data. In total, 29 satellite images were analyzed from August 24 to September 9, 2021. Preparation, analysis and processing of the satellite data were performed in the See the Sea information system for satellite monitoring of seas and oceans developed at the Space Research Institute RAS.

Keywords: Mediterranean Sea, oil pollution, satellite monitoring, satellite radar, See the Sea information system

Accepted: 04.03.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-295-301

References

- Ermakov S.A., Lavrova O.Yu., Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Molkov A.A., Danilicheva O.A., On the "comb" structure of the edges of slicks on the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 208–217 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-208-217.
- 2. Knyazev N.A., Lavrova O.Yu., Kostianoy A.G., Satellite radar monitoring of oil pollution in the water areas between Anapa and Gelendzhik in 2018–2020, *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2021, Vol. 49, No. 1, pp. 163–185 (in Russian), DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(1).8.
- 3. 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).
- 4. Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas*, 2011, Moscow: IKI RAN, 480 p. (in Russian).
- 5. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Satellite Methods for Detecting and Monitoring Marine Zones of Ecological Risk*, Moscow: IKI RAN, 2016, 334 p. (in Russian).
- 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.
- Brekke C., Solberg A., Oil spill detection by remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 95, pp. 1–13, DOI: 10.1016/j.rse.2004.11.015.
- 8. Espedal H. A., Johannessen O. M., Detection of oil spills near offshore installations using synthetic aperture radar (SAR), *Intern. J. Remote Sensing*, 2000, Vol. 21, No. 11, pp. 2141–2144.
- 9. Gade M., Alpers W., Using ERS-2 SAR images for routine observation of marine pollution in European coastal waters, *Science of the Total Environment*, 1999, Vol. 237–238, pp. 441–448, DOI: 10.1016/S0048-9697(99)00156-4.
- 10. Marmorino G., Smith G.B., Toporkov J.V., Sletten M.A., Perkovich D., Frasier S.J., Evolution of ocean slicks under a rising wind, *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 115, C04030.
- 11. Mityagina M., Lavrova O., Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution in the Black and Caspian Seas, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, Art. No. 875, DOI: 10.3390/rs8100875.
- 12. Topouzelis K. N., Oil spill detection by SAR images: Dark formation detection, feature extraction and classification algorithms, *Sensors*, 2008, Vol. 8, pp. 6642–6659, DOI: 10.3390/s8106642.