

Квазипостоянные источники плёночных загрязнений морской поверхности в Мраморном море

С. В. Станичный, А. В. Медведева

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mail: Suomi-npp@mail.ru

Исследуется проявление квазипостоянных источников плёночных структур в Мраморном море на основе анализа радиолокационных спутниковых данных C-SAR (*англ.* C-Band Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1 и оптических сенсоров MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2 и OLI (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-8, -9. Выделен район регулярного проявления этих источников в северо-западной части акватории, выполнено картирование связанных с ними плёночных структур по радиолокационным изображениям. Проведено сопоставление обнаруженных плёнок с рельефом морского дна исследуемого района и отмечено, что наиболее частое их проявление наблюдается в зоне свала глубин и над плато между глубоководными котловинами, что соответствует данным акустического зондирования газовых интрузий. Рассмотрены типичные формы проявления, а также выполнены оценки пространственных характеристик плёночных структур и максимального времени их существования. По результатам анализа оптических спутниковых снимков приведены примеры с изменением коэффициента отражения системы «вода – плёнка». Для случая с оптически «толстой» плёнкой показана методика оценки объёма загрязнения.

Ключевые слова: Мраморное море, нефтяные слики, плёночные структуры, естественные источники, спутниковое зондирование, C-SAR, OLI, MSI

Одобрена к печати: 04.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-303-310

Введение

Плёнки поверхностно-активных веществ (ПАВ) на морской поверхности — достаточно часто наблюдаемое явление (Ермаков, 2010). ПАВ могут быть результатом антропогенного воздействия, а также иметь естественное происхождение. Вторые можно условно разделить на плёнки биологического происхождения и плёнки, сформированные за счёт поступления природных углеводородов из донных источников. Типичными такими источниками стали так называемые грифоны, сипы, грязевые вулканы (Лаврова и др., 2016). Подобного рода ПАВ достаточно широко наблюдаются в районах добычи нефти и газа в Каспийском море (Иванов и др., 2007), Мексиканском зал., регистрируются также и в Чёрном море (Mityagina, Lavrova, 2017; Zamshin et al., 2021). Основное физическое воздействие ПАВ на характеристики морской поверхности — это уменьшение коэффициента поверхностного натяжения и возможное изменение коэффициента отражения системы «вода – плёнка». Изменение коэффициента поверхностного натяжения вызывает изменение структуры поверхностного волнения (шероховатости поверхности), т. е. гашение мелкомасштабной ряби. Именно эти два фактора позволяют регистрировать плёнки ПАВ в сигналах дистанционных оптических датчиков и на радарных изображениях (Fingas, Brown, 2018). Если для радарных изображений наличие ПАВ просто уменьшает сигнал за счёт гашения береговой компоненты волнения, то в оптическом диапазоне изменения отражённой компоненты солнечного излучения носят более сложный характер: сигнал изменяется как из-за усиления или ослабления шероховатости поверхности, так и по причине вариаций коэффициента отражения системы «вода – плёнка» в зависимости от толщины плёнки. Второй фактор не только даёт возможность выделить пространственную структуру ПАВ, но и для ряда случаев позволяет оценить толщину (объём) загрязнения (Лебедев, 2015). Отметим, что проявление ПАВ в оптическом диапазоне зависит от взаимной геометрии положения спутникового сенсора и Солнца. Это приводит к тому,

что при уменьшении шероховатости отражённый от морской поверхности сигнал может как уменьшаться, так и увеличиваться.

Донные сипы в Мраморном море исследовались с помощью контактных акустических измерений (Palabiyik et al., 2020), однако до настоящего времени спутниковые данные для их изучения не использовались.

Цель настоящей работы состоит в изучении особенностей проявления квазипостоянных источников формирования ПАВ на основе анализа оптических и радарных спутниковых данных высокого пространственного разрешения в Мраморном море.

Данные

Работа основана на анализе данных оптических сканеров OLI (англ. Operational Land Imager) Landsat-8, -9 и MSI (англ. Multi-Spectral Instrument) Sentinel-2, а также радарных данных C-SAR (англ. C-Band Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1 за период с 2018 до 2022 г. Для выделения плёночных загрязнений на поверхности в отражённой компоненте был использован канал NIR (англ. near infrared, ближний инфракрасный) (8 — MSI и 5 — OLI), для радарных снимков выбирались данные с VV-поляризацией (вертикально-вертикальная, V от англ. vertical). На *рис. 1* выделен район исследования проявления плёночных загрязнений.



Рис. 1. Карта Мраморного моря с выделенным районом исследований

Примеры проявления в различных спектральных интервалах

Как отмечалось выше, основной механизм проявления плёночных загрязнений поверхности реализуется через изменение шероховатости морской поверхности и, соответственно, влияние на отражённую компоненту в оптическом диапазоне и рассеянную — в радиолокации. Как правило, этот фактор приводит к уменьшению регистрируемого сигнала за счёт снижения доли единичных площадок, отражающих солнечное излучение в оптике, и гашения береговой ряби в радиолокации. Типичный пример проявления ПАВ в оптическом диапазоне приведён на *рис. 2* (см. с. 305), где плёнки выглядят как более тёмные области.

Аналогично ПАВ проявляются и в данных C-SAR. На *рис. 3* (см. с. 305) продемонстрированы плёнки, имеющие вид более тёмных зон из-за меньшего рассеяния. На обоих снимках хорошо видны множественные источники, загрязнения от которых распространяются на расстояния до 5–10 км: на оптическом снимке — на юго-восток, а на радиолокационном — на северо-запад.

На радиолокационных изображениях идентификация плёночных образований регулярна из-за проницаемости облачного покрова для микроволнового излучения, хотя и менее

точна. Значительным ограничением становится воздействие ветра: при ветрах со скоростью от 8–10 м/с выраженное волнение поверхности не позволяет обнаружить плёнки, а при штилевых условиях (или близких к таковым) на водной поверхности регистрируется большое количество снимков, схожих с плёнками иного происхождения. Поэтому оптимальным для выявления плёнок представляется зондирование района при ветрах примерно от 2–3 до 7–8 м/с.

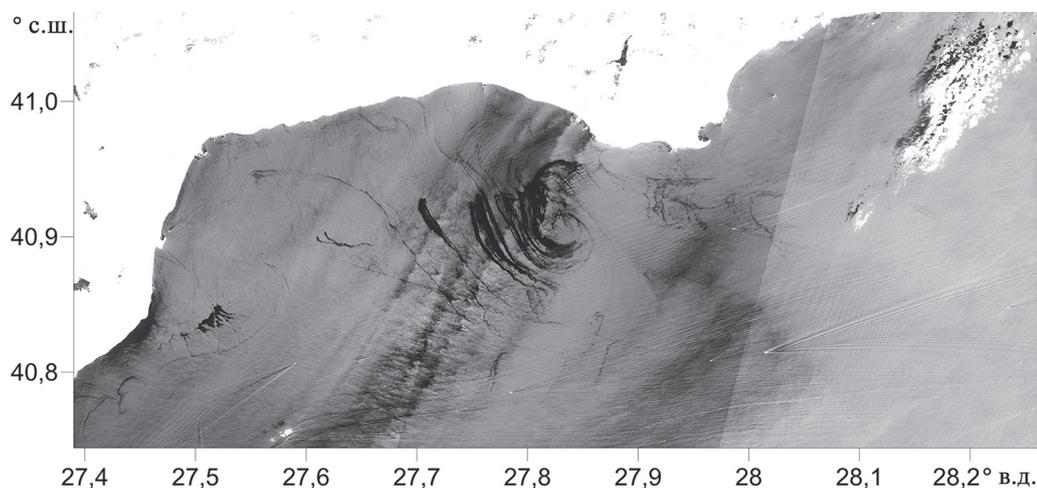


Рис. 2. Проявление ПАВ (тёмные структуры) на фрагменте оптического снимка MSI Sentinel-2 от 21.06.2020

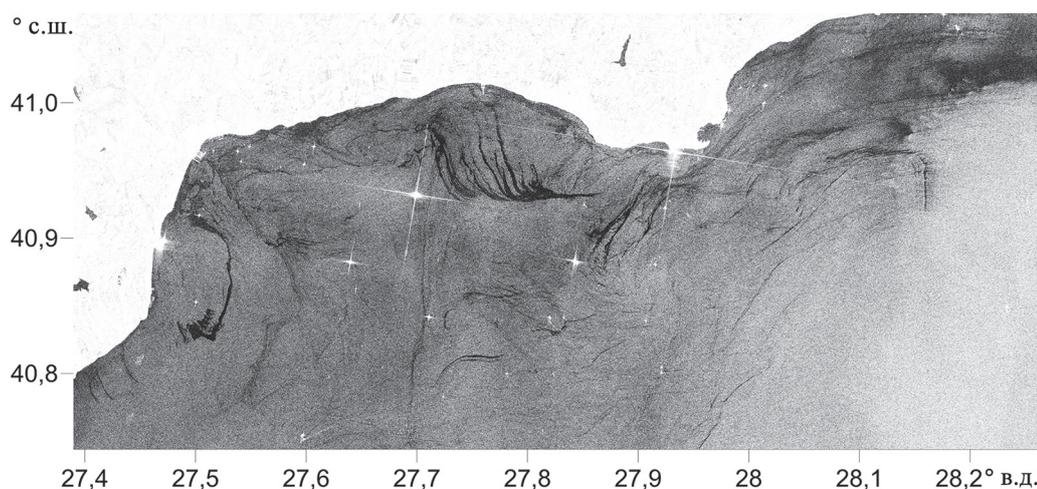


Рис. 3. Проявление ПАВ (тёмные структуры) на фрагменте радиолокационного изображения C-SAR Sentinel-1 от 05.04.2022

Районирование проявления источников

На рис. 4 (см. с. 306) приведена схема проявлений плёночных структур, созданная на основе объединённых за 2020 г. радарных изображений, на которой выделяется до 10 групп источников углеводородных образований.

Совмещение зон проявления плёнок с батиметрией (рис. 5, см. с. 306) показало, что источники залегают на глубинах от 70 до 1100 м и располагаются на шельфе, свале глубин, на плато между глубоководными котловинами и на краю глубоководной котловины Текирдаг (расположена западнее). Всего наблюдалось одновременно до 70 отдельных снимков. В целом эти источники сгруппированы на малых расстояниях от Северо-Анатолийского разлома (Palabiyik et al., 2020; Yürür, 2006).

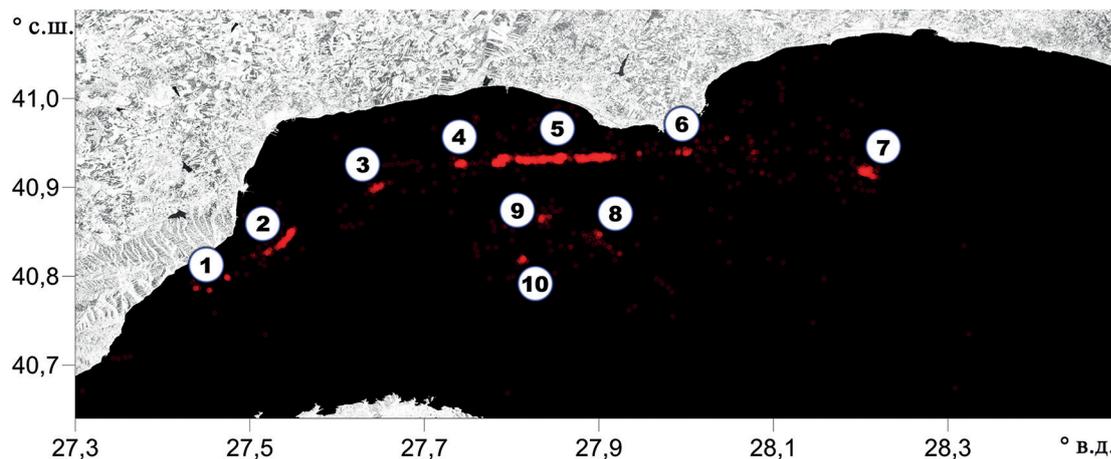


Рис. 4. Группы квазипостоянных источников плёночных структур в северо-западной части Мраморно-го моря, выявленные по радиолокационным данным C-SAR Sentinel-1 за 2019 г. Чем интенсивнее цвет, тем чаще обнаруживались плёночные структуры

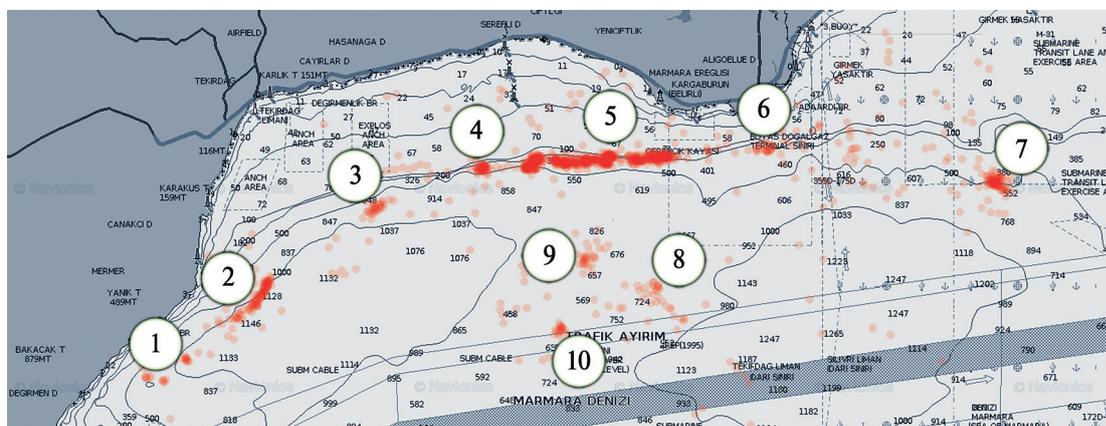


Рис. 5. Локализация квазипостоянных источников плёночных структур в северо-западной части Мраморного моря, выявленных по данным C-SAR Sentinel-1 за 2019 г. и нанесённых на батиметрическую карту от итальянской компании Navionics (navionics.com)

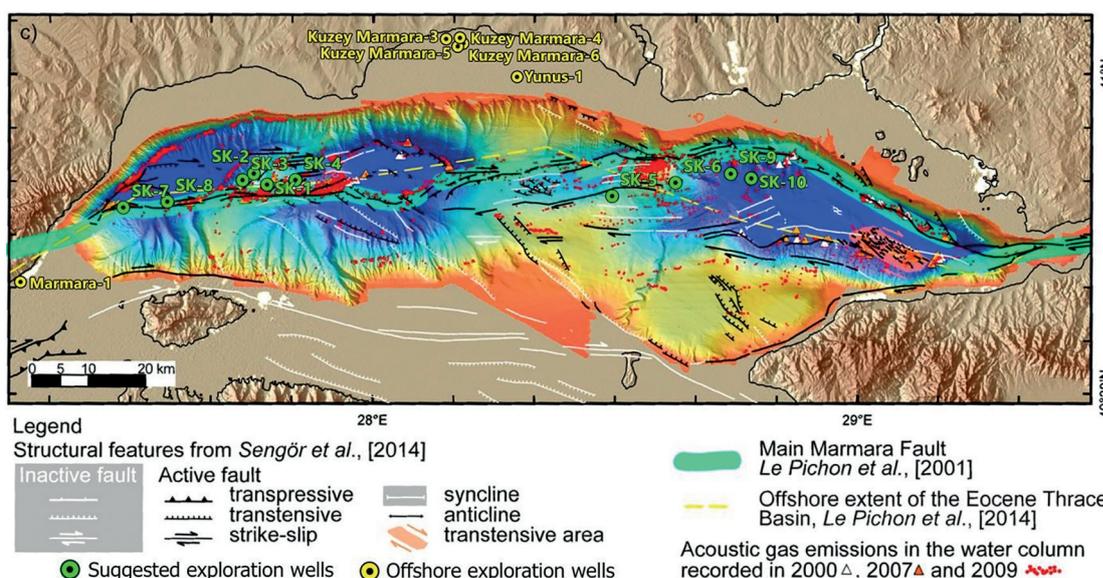


Рис. 6. Положение точек с зарегистрированной интрузией газа (отмечены красным) акустическими методами (Palabiyik et al., 2020)

В результате анализа данных не было выявлено какой-либо сезонной зависимости проявления, плёночные загрязнения фиксировались в течение всего года при благоприятных ветровых условиях. При этом по радиолокационным данным они выявляются на протяжении всего года, а по оптическим — примерно с апреля по август (оптически «толстые» плёнки эпизодически определяются и вне указанного периода) из-за геометрии взаимного расположения Солнца и спутника: в осенне-зимний период положение Солнца над горизонтом недостаточно высокое для возможности отражать сигнал плёнками под теми углами, что позволяют воспринимать его оптическими сенсорами в момент зондирования.

Отметим, что авторы работы (Palabiyik et al., 2020) на основе акустического зондирования приводят схожую карту проявления донных газовых выделений (рис. 6), на которой в исследуемом районе основные газовые интрузии привязаны к свалу глубин и плато. В восточной части моря зарегистрированные районы проявления газовых интрузий не вызывают появления регулярных плёночных структур на поверхности, по-видимому, из-за меньшего содержания жидких углеводородов.

Форма плёночных структур

Как правило, на поверхности плёнки выглядят в виде протяжённых ленточных структур со слабо изменяющейся шириной от источника проявления, что может говорить о незначительности механизма растекания в течение жизни слика.

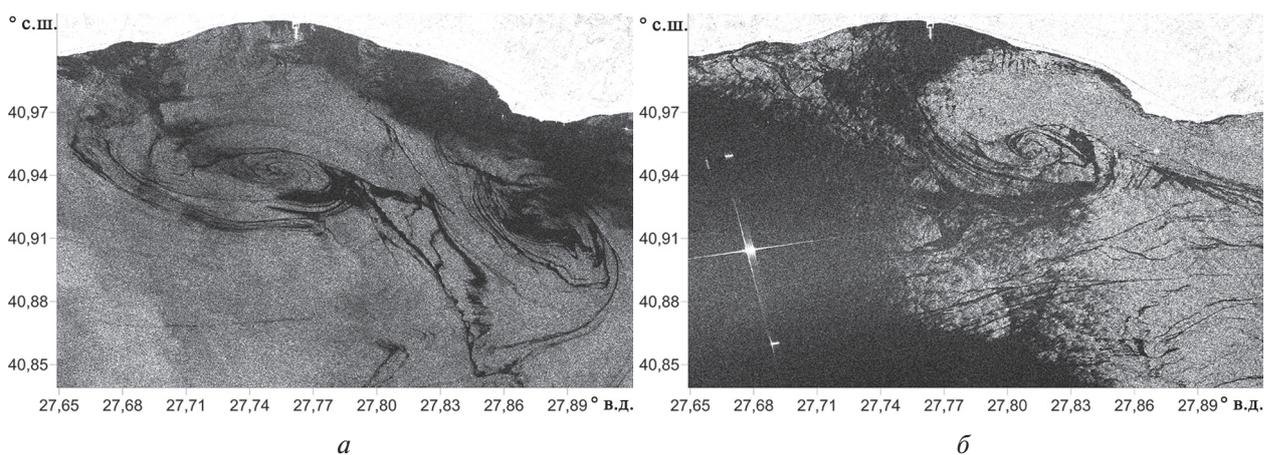


Рис. 7. Плёночные структуры от квазипостоянных источников, вовлечённые в орбитальное вращение вихрей, на фрагментах радиолокационных изображений C-SAR Sentinel-1 от 20.06.2021 (а) и 22.02.2021 (б)

Пространственные особенности распространения определяются полем поверхностных течений — дрейфовых и плотностных. Плёнки являются хорошими трассерами и достаточно часто вовлекаются в вихревые структуры. Примеры такого проявления показаны на рис. 7 (см. с. 307).

Длина регистрируемых полосовых структур не превышает 20 км. Отсюда может быть сделана оценка максимального времени жизни плёнки при типичной скорости распространения порядка 0,1–0,3 м/с — получаем ~18–55 ч. Оценка достаточно грубая, так как большие скорости течений наблюдаются при больших ветрах, при которых увеличивается и скорость диссипации плёнки. Как правило, на последовательных изображениях через сутки уже трудно идентифицировать «тот же самый» слик. Общие площади, занимаемые плёнками на одном снимке, могут достигать 40–50 км² при слабых ветрах, когда плёнки из различных источников могут сливаться в единое поле.

Оценка объёма плёночного загрязнения

Как уже отмечалось выше, в оптическом диапазоне в зависимости от толщины плёнки может изменяться коэффициент отражения системы «вода — плёнка» и наблюдаться интерференционная картина. Такого рода ситуации в основном обнаруживались в зонах 2 и 5. Учитывая разность диэлектрической проницаемости нефти и воды, первый максимум коэффициента отражения наблюдается при толщине плёнки, соответствующей приблизительно $1/6$ длины волны электромагнитного спектра (Лебедев, 2015). Таким образом, на разных длинах волн увеличение коэффициента отражения будет наблюдаться при различных значениях толщины плёнки. Этот эффект даёт возможность при многоспектральном подходе провести оценку объёма плёночного загрязнения. Рассмотрим пример проявления плёнки, изменяющей коэффициент отражения в данных MSI Sentinel-2 за 31.08.2018 (рис. 8).

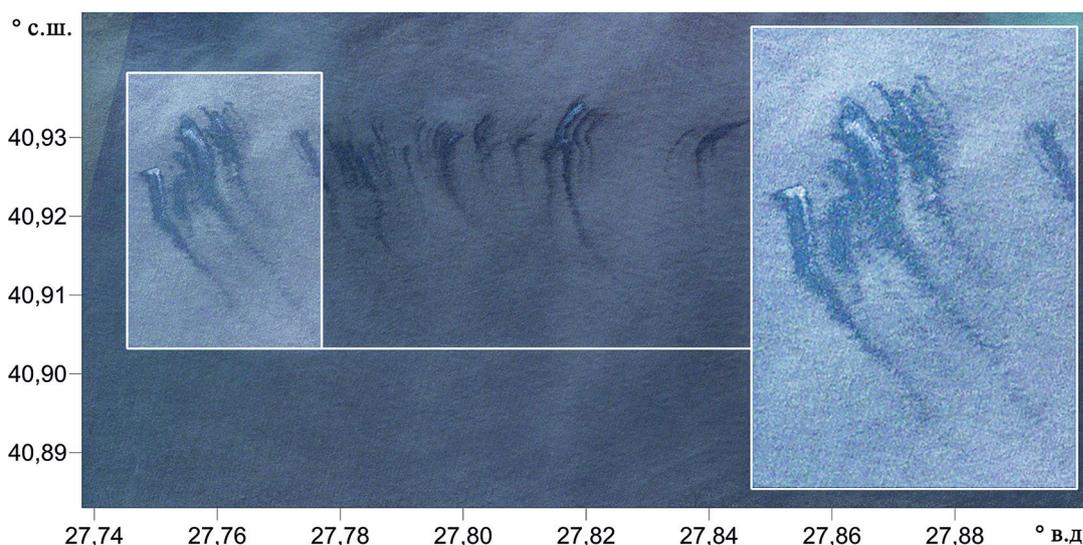


Рис. 8. Плёночные структуры в северо-западной части Мраморного моря на фрагменте спутникового изображения MSI Sentinel-2 от 31.08.2018; врезкой выделены плёнки, для которых проведено вычисление их толщины

Итак, общая площадь плёнки составляет $1\,890\,000\text{ м}^2$, при переборе каналов вычисляются значения: площадь плёнки с увеличенным коэффициентом отражения на длине волны 490 нм — $114\,000\text{ м}^2$, на длине волны 560 нм — $77\,000\text{ м}^2$, на длине волны 665 нм — $45\,000\text{ м}^2$, на длине волны 842 нм — $32\,500\text{ м}^2$. Предполагаем, что толщина плёнки в промежуточных зонах равна средней характерной для длины волны толщине:

$$V = S_{842} \frac{842}{6} + (S_{665} - S_{842}) \cdot \left(\frac{842 + 665}{6} 0,5 \right) + (S_{560} - S_{665}) \cdot \left(\frac{560 + 665}{6} 0,5 \right) + (S_{490} - S_{560}) \cdot \left(\frac{490 + 560}{6} 0,5 \right) + (S_t - S_{490}) \cdot \left(\frac{490}{6} 0,5 \right),$$

где S_{490} , S_{560} , S_{665} , S_{842} — соответственно площади зон повышенного коэффициента отражения на длинах волн 490 , 560 , 665 и 842 нм ; S_t — общая площадь слика. В итоге $V = 0,085\text{ м}^3$.

Представленные вычисления дают приблизительный результат и имеют значительные погрешности из-за малого размера «толстых» плёнок, которые связаны как с пространственным разрешением снимка (использованные каналы — 10 м), так и с процессом выделения площадей (десятки пикселей). Для более крупных пятен с плёнками различной оптической толщины — с площадью, превышающей десятки квадратных километров, — такой подход даёт более точные результаты (снижается процент погрешности).

Заключение

На основе анализа спутниковых данных оптических сканеров MSI, OLI и радара C-SAR показано существование проявления десятков квазипостоянных источников плёночных загрязнений, связанных с донными интрузиями углеводородов в северо-западной части Мраморного моря. Проведено картирование положения источников, выделены зоны с наиболее часто встречающимися плёнками на поверхности. Сопоставление с батиметрией моря показало, что выделенные источники плёночных структур охватывают разные составляющие морского дна — от шельфа до плато между глубоководными глубинами — и залегают на глубинах от 70 до 1100 м. Отдельные слики выглядят как ленточные структуры шириной 30–100 м и могут распространяться до 20 км от источника, направление распространения определяется в основном ветровыми течениями. В ряде случаев плёнки вовлекаются в вихревое движение, хорошо трассируя такие структуры. Для плёнок, изменяющих коэффициент отражения, показано применение многоканального метода оценки объёма загрязнения.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 23-27-00421 «Развитие методов спутникового мониторинга аномальных процессов в морских экосистемах на основе многоспектрального подхода».

Литература

1. *Ермаков С. А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
2. *Иванов А. Ю., Голубов Б. Н., Затягалова В. В.* О нефтегазоносности и разгрузке подземных флюидов в южной части Каспийского моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 62–81.
3. *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.
4. *Лебедев Н. Е.* Определение толщины нефтяной пленки на морской поверхности по контрасту яркости в ближнем ИК-диапазоне // Процессы в геосредах. 2015. № 1. С. 48–53.
5. *Fingas M., Brown C. E.* A review of oil spill remote sensing // Sensors. 2018. V. 18. No. 1. Article 91. DOI: 10.3390/s18010091.
6. *Mityagina M. I., Lavrova O. Y.* Multi-sensor satellite survey of natural oil slicks in the southeastern Black Sea // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2017: Proc. SPIE. 2017. V. 10422. pp. 108–123. DOI: 10.1117/12.2278025.
7. *Palabıyık Y., Özdemir A., Karataş A.* The seafloor indications for hydrocarbon potential of the Marmara Sea Basin (Northwestern Turkey) and proposed exploration zones along with some drilling locations // Intern. Black Sea Coastline Countries Symp. — IV. Giresun, Turkey, 2020. V. 1. pp. 122–136. https://www.researchgate.net/publication/341281113_The_Seafloor_Indications_for_Hydrocarbon_Potential_of_the_Marmara_Sea_Basin_Northwestern_Turkey_and_Proposed_Exploration_Zones_along_with_Some_Drilling_Locations.
8. *Yürür M. T.* The positive temperature anomaly as detected by Landsat TM data in the eastern Marmara Sea (Turkey): possible link with the 1999 Izmit earthquake // Intern. J. Remote Sensing. 2006. V. 27. No. 6. pp. 1205–1218.
9. *Zamshin V. V., Matrosova E. R., Khodaeva V. N., Chvertkova O. I.* Quantitative Approach to Studying Film Pollution of the Sea Surface Using Satellite Imagery // Physical Oceanography. 2021. V. 28. No. 5. pp. 567–578. DOI: 10.22449/1573-160X-2021-5-567-578.

Quasi-permanent sources of film pollution of the sea surface in the Sea of Marmara

S. V. Stanichny, A. V. Medvedeva

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia

E-mail: Suomi-npp@mail.ru

The work examines the manifestation of quasi-permanent sources of oil slick structures in the Sea of Marmara based on the analysis of Sentinel-1 C-SAR radar and Sentinel-2 MSI and Landsat-8, -9 OLI optical satellite data. An area of regular occurrence of these sources in the northwestern part of the water area was identified, and the slick structures associated with them were mapped using radar images. A comparison of the discovered slicks with the topography of the seabed of the study area was carried out and it was noted that their most frequent manifestation is observed in the zone of the depth slope and above the plateau between deep-sea basins, which corresponds to the data of acoustic sounding of gas intrusions. Typical forms of manifestation are considered, and estimates of spatial characteristics of slick structures and their maximum life-time are made. Based on the results of the analysis of optical satellite images, examples are given with changes in the reflectance of the water-film system. For a case with optically “thick” film, a method for estimating the volume of contamination is proposed.

Keywords: Sea of Marmara, oil slicks, film structures, natural sources, remote sensing, C-SAR, OLI, MSI

Accepted: 04.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-303-310

References

1. Ermakov S. A., *Vliyaniye plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln* (The influence of films on the dynamics of gravity-capillary waves), Nizhny Novgorod: IAP RAS, 2010, 164 p. (in Russian).
2. Ivanov A. Yu., Golubov B. N., Zatyagalova V. V., On Oil-Gas-Bearing and Unloading of Underground Fluids in the Southern Part of the Caspian Sea Using Synthetic Aperture Radar Images, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 2, pp. 62–81 (in Russian).
3. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Sputnikovye metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk), Moscow: IKI RAN, 2016, 334 p. (in Russian).
4. Lebedev N. E., Determining the thickness of oil film on sea surface through contrast of brightness in the near-IR range, *Protsessy v geosredakh*, 2015, No. 1, pp. 48–53 (in Russian).
5. Fingas M., Brown C. E., A review of oil spill remote sensing, *Sensors*, 2018, Vol. 18, No. 1, Article 91, DOI: 10.3390/s18010091.
6. Mityagina M. I., Lavrova O. Y., Multi-sensor satellite survey of natural oil slicks in the southeastern Black Sea, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2017: Proc. SPIE*, 2017, Vol. 10422, pp. 108–123, DOI: 10.1117/12.2278025.
7. Palabıyık Y., Ozdemir A., Karataş A., The seafloor indications for hydrocarbon potential of the Marmara Sea Basin (Northwestern Turkey) and proposed exploration zones along with some drilling locations, *Intern. Black Sea Coastline Countries Symp. — IV*, Giresun, Turkey, 2020, Vol. 1, pp. 122–136, https://www.researchgate.net/publication/341281113_The_Seafloor_Indications_for_Hydrocarbon_Potential_of_the_Marmara_Sea_Basin_Northwestern_Turkey_and_Proposed_Exploration_Zones_along_with_Some_Drilling_Locations.
8. Yürür M. T., The positive temperature anomaly as detected by Landsat TM data in the eastern Marmara Sea (Turkey): possible link with the 1999 Izmit earthquake, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, No. 6, pp. 1205–1218.
9. Zamshin V. V., Matrosova E. R., Khodaeva V. N., Chvertkova O. I., Quantitative Approach to Studying Film Pollution of the Sea Surface Using Satellite Imagery, *Physical Oceanography*, 2021, Vol. 28, No. 5, pp. 567–578, DOI: 10.22449/1573-160X-2021-5-567-578.