

СПУТНИКОВЫЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В АКВАТОРИИ АНАПА – ГЕЛЕНДЖИК ЗА ПЕРИОД 2018–2020 гг.

Князев Н.А.¹, Лаврова О.Ю.¹, Костяной А.Г.^{2,3}

¹Институт космических исследований РАН,
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32,

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,

³Московский университет им. С.Ю. Витте,
Россия, 115432, Москва, 2-й Кожуховский проезд, 12с1,
e-mail: nkkniazev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 23.03.2021, одобрена к печати 08.04.2021.

В работе представлены результаты спутникового мониторинга нефтяных загрязнений акватории северо-восточной части Черного моря в районе Анапа–Геленджик за 2018–2020 гг. Мониторинг проводился с использованием архивов радиолокационных данных, полученных радиолокаторами SAR-C, установленными на спутниках Sentinel-1A, -1B. Работа с архивами спутниковых данных осуществлялась с помощью инструментов информационной системы спутникового мониторинга «See the Sea» (STS), разработанной в ИКИ РАН. Проведенный спутниковый мониторинг выявил основные источники загрязнений морской поверхности нефтепродуктами в исследуемом районе. Подавляющая часть загрязнений (85%) связана со сбросами с движущихся судов вод, содержащих нефтепродукты. С помощью встроенного в систему STS инструментария была составлена карта нефтяных загрязнений, выявленных на радиолокационных изображениях, на основе которой были определены основные районы нефтяных загрязнений. К ним относятся: главные судоходные трассы, ведущие к порту Новороссийск, якорные стоянки судов и акватории Цемесской (Новороссийской) и Геленджикской бухт. На основе спутниковой информации была определена сезонная и межгодовая изменчивость нефтяных загрязнений в районе Анапа–Геленджик. Проведено сравнение результатов мониторинга за 2018–2020 гг. с результатами подобного мониторинга, проведенного в 2006–2010 гг. Был сделан вывод, что количество выявленных загрязнений не идет на спад, что, конечно, негативно сказывается на экологическом состоянии северо-восточной части Черного моря.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, радиолокационное изображение, нефтяные загрязнения, информационная система «See the Sea», северо-восточная часть Черного моря, Цемесская бухта, Геленджикская бухта

Введение

Многочисленные спутниковые и in-situ наблюдения нефтяного загрязнения Черного моря показывают, что северо-восточная часть Черного моря и, в частности, прибрежная акватория между Анапой и Геленджиком является зо-

ной экологического риска, вследствие большого количества нефтяных пятен, наблюдаемых в этом районе (рис. 1) (Лаврова и др., 2016; Кузнецов, Федоров, 2018; Немировская и др., 2018; Kuznetsov, Fedorov, 2020). Это объясняется несколькими факторами, связанными с интенсивным судоходством. Во-первых, Новороссийский морской торговый порт (НМТП) является самым крупным российским портом на Черном море, который включает «Новороссийский зерновой терминал», зерновой терминал «КСК», контейнерный терминал «НУТЭП», лесной порт «Новорослесэкспорт», нефтегавань «Шесхарис», Новороссийский нефтеперевалочный комплекс, комплекс по перегрузке нефтепродуктов, мазутный терминал, судоремонтный завод, а также нефтяной терминал «Каспийского трубопроводного консорциума» (КТК), являющийся конечной точкой нефтепровода «Тенгиз–Новороссийск». На 2012 г. через терминал «Шесхарис» проходило более 30% всего российского экспорта нефти и нефтепродуктов. В настоящее время большой объем перевалки грузов в Новороссийском морском порту приходится на Каспийский трубопроводный консорциум, управляющий терминалом «КТК-Р» в Южной Озереевке, который оснащен тремя выносными причальными устройствами (ВПУ), позволяющими загружать танкеры на большом удалении от берега. В 2018 г. через терминал было отгружено 61.1 млн тонн нефти.

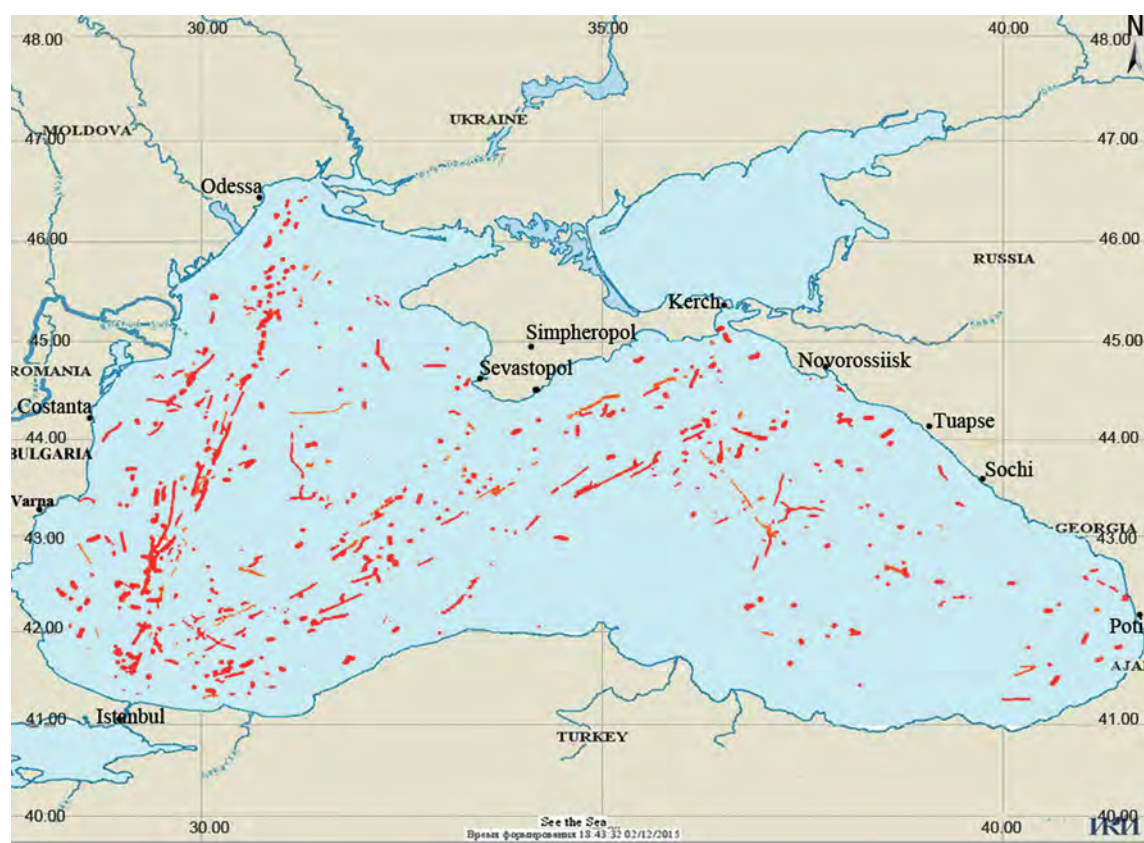


Рис. 1. Сводная карта всех нефтяных пятен, обнаруженных в результате спутникового мониторинга Черного моря за 2009–2012 гг. (Лаврова и др., 2016)

В 2018 г. суммарный грузооборот порта Новороссийск составил 154.9 млн тонн, в 2019 г. – 156.8 млн т., в 2020 г. – 141.8 млн т. Основные грузы, которые проходят через порт, – нефть и нефтепродукты, контейнеры, зерно, уголь, минеральные удобрения, лесоматериалы, пищевые и химические грузы. По итогам грузооборота российских компаний в 2020 г. терминал «КТК-Р» занял первое место в России с 59.03 млн т., а порт Новороссийска – второе место с оборотом 54 млн т.

Кроме того, в Цемесской (Новороссийской) бухте находится Новороссийская военно-морская база, которая развивается в соответствии с федеральной целевой программой «Создание системы базирования Черноморского флота на территории Российской Федерации в период 2005–2020 гг.».

Во-вторых, к Новороссийску подходит одна из основных судоходных трасс от Стамбула (пролива Босфор) (рис. 2), вдоль которых концентрируются многочисленные нефтяные пятна, обнаруженные спутниковыми методами (см. рис. 1 для сравнения). Порт Новороссийска ежегодно принимает около 4–5 тыс. судов. В непосредственной близости от него располагаются еще 2 трассы с интенсивным судоходством, ведущие к порту Туапсе и к Керченскому проливу (рис. 2). Обе эти трассы также просматриваются и в соответствующих концентрациях нефтяных пятен (см. рис. 1). Нефтяное загрязнение, вызванное судоходством вдоль этих трасс, также может вносить свой вклад в загрязнение акватории между Анапой и Геленджиком.

В-третьих, Основное черноморское течение (ОЧТ) осуществляет трансграничный перенос нефтяного загрязнения из акватории Грузии и Абхазии и далее вдоль всего российского побережья вплоть до Керченского пролива, а далее вдоль

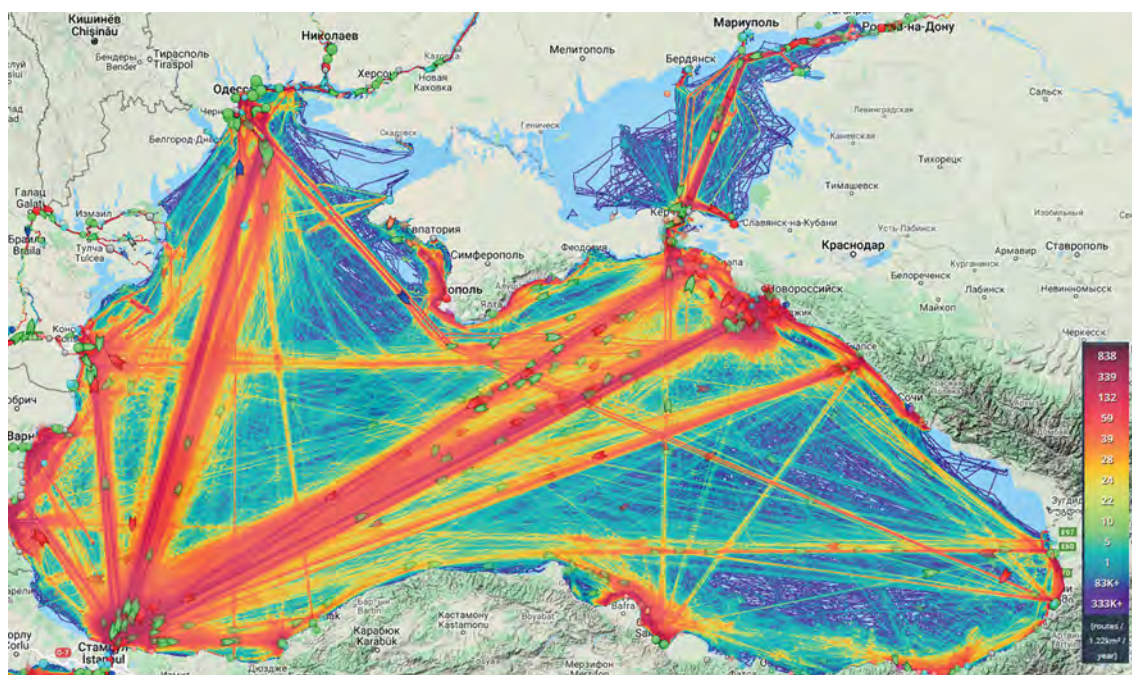


Рис. 2. Интенсивность судоходства в Черном море по данным Marinetransport (https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:32.6/centery:44.3/zoom:6)

берега Крыма. ОЧТ переносит и нефтяное загрязнение, вызванное многочисленными маломерными судами в курортный сезон, а также малыми реками Кавказа и ливневыми стоками.

В результате, акватория и побережье крупнейшего туристического кластера, расположенного между Анапой и Геленджиком, оказывается под постоянной угрозой нефтяного загрязнения, что периодически фиксируется на пляжах Витязево, Анапы, Дюрсо, Южной Озереевки, Широкой Балки, Мысхако, Новороссийска, Кабардинки, Голубой бухты, Геленджика и Дивноморского. Ежегодно эти курорты посещают более 10 млн человек.

Вследствие изложенных выше причин, данный район характеризуется повышенной экологической опасностью и заслуживает особого внимания, в частности, постоянного спутникового мониторинга (Лаврова и др., 2016). Спутниковый мониторинг северо-восточной части Черного моря проводится на регулярной основе двумя организациями: ФГБУ «НИЦ "Планета"» и Институтом космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). В соответствии с поручением Правительства Российской Федерации от 10.02.2003 г. № МК-П9-01617 ФГБУ, начиная с 2003 г., «НИЦ "Планета"» при участии специалистов Гидрометцентра РФ, Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) и Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) проводит работы по спутниковому мониторингу загрязнений (береговых, судовых и биогенных) водной среды российского сектора Азово-Черноморского бассейна. Ими ежегодно в рамках мониторинга принимается и обрабатывается более 1100 спутниковых изображений видимого, инфракрасного и микроволнового диапазонов с ИСЗ Метеор-М №1, Метеор-М №2, Канопус-В №1, TERRA, AQUA, NOAA, Jason, Landsat-8, MetOp-A и Meteosat-10. В ходе выполнения данного проекта была создана технология космического мониторинга акватории российского сектора Азово-Черноморского бассейна (Кровотынцев и др., 2007; Бедрицкий и др., 2007, 2009). С использованием разработанной технологии регулярно выпускается 12–14 видов спутниковой информационной продукции, включая карты загрязнения моря нефтепродуктами, карты циркуляции вод, распределения фитопланктона и водорослей, концентрации хлорофилла «а», распределения коэффициента диффузного ослабления, температуры морской поверхности, приводного ветра, изменений уровня моря, результатов автоматизированного распознавания водных объектов и др., а также обобщенные карты-схемы состояния морской среды.

Сотрудниками ИКИ РАН с 2003 г. проводится мониторинг всей акватории Черного моря на основе данных спутниковой радиолокации и оптических данных (Митягина, Лаврова, 2007; Shcherbak et al., 2008; Лаврова и др., 2010; 2011; 2016; Mityagina, Lavrova, 2016). Помимо выявления пленочных загрязнений, как антропогенного, так и естественного происхождения, большое внимание уделяется исследованию субмезомасштабных и мезомасштабных процессов в Черном море, поскольку они оказывают существенное влияние на распространение загрязнений (Костяной и др., 2010; Калашникова и др., 2013; Лаврова и др., 2015; Kostianoy

et al., 2018). В отдельные годы мониторинг в районе Новороссийска проводился также сотрудниками ИО РАН в рамках проектов коммерческой компании «Сканэкс» (Ivanov, Kucheiko, 2014, 2016; Иванов и др., 2017).

Данная работа посвящена результатам спутникового мониторинга акватории Черного моря от Анапы до Геленджика, который проводился с целью оценки нефтяного загрязнения в данном районе в 2018–2020 гг., и сравнению с результатами подобных мониторингов в предыдущие годы. Основными объектами исследования являются Цемесская (Новороссийская) и Геленджикская бухты, а также акватории прибрежных городов Анапы, Новороссийска и Геленджика. К этому району подходит судоходная трасса Стамбул–Новороссийск, которая относится к объектам с наиболее частыми сбросами нефтесодержащих вод (рис. 1, 2) (Лаврова и др., 2016).

Используемые данные и методы радиолокационного мониторинга

Спутниковая радиолокация является эффективным методом мониторинга нефтяного загрязнения морской поверхности (Kostianou, Lavrova, 2022). Для проведения мониторинга, результаты которого рассматриваются в данной статье, использовались архивы данных, полученных со спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B Европейского космического агентства (ESA). Данные спутники представляют собой часть космической системы Sentinel, разработанной Европейским космическим агентством и поддерживаемой космической программой Copernicus <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>. Первая серия спутников является объединением систем Sentinel-1A и Sentinel-1B, запущенных 3 апреля 2014 г. и 26 апреля 2016 г. соответственно. В состав съемочной аппаратуры входит радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), выполняющий съемку в С-диапазоне (5,405 ГГц), обеспечивая всепогодную и независимую от освещенности (день/ночь) съемку. Благодаря повторяющейся траектории движения, комбинация двух спутников ДЗЗ позволяет снимать интересующие области на планете с периодичностью в 1–3 дня, в отдельные дни – 2 раза в сутки. Такая периодичность положительно сказывается на качестве мониторинга нефтяных пленок, проявление которых на морской поверхности с момента попадания в воду сохраняется максимум в течение 1 суток (если это не катастрофические разливы больших масштабов). Еще одно преимущество данных радиолокаторов Sentinel-1 – это высокое пространственное разрешение. Для решения поставленной задачи использовались данные с пространственным разрешением 10 м. Это позволяло выявлять даже незначительные по площади загрязнения.

Для работы со спутниковыми данными использовалась информационная система «See the Sea» (STS), разработанная в ИКИ РАН (Лупян и др., 2012; Лаврова и др., 2019). Система STS обеспечивает возможность работы с архивами спутниковых данных разнородных оптических и радиолокационных сенсоров.

Архив содержит данные с 1999 г. и пополняется ежедневно. В частности, в системе STS налажено в автоматическом режиме получение данных спутников серии Sentinel, которые распространяются Европейским космическим агентством <https://scihub.copernicus.eu/>. Информационная система STS разработана специально для обработки и анализа данных, получаемых над акваториями всех морей, омывающих территорию Российской Федерации, в частности, над Черным морем.

В системе STS на этапе импорта спутниковые данные подвергаются автоматической обработке и геопривязке. Они помещаются в специальные архивы, из которых возможен их быстрый выбор для проведения онлайн-обработки и предоставления пользователям через картографические интерфейсы STS. Для работы с нефтяными разливами в системе STS предусмотрен такой инструментарий, как «Работа с полигонами», где каждый детектируемый случай загрязнения обводится полигоном и добавляется в базу данных системы. Каждый добавленный случай помечается в системе под типом «Нефтяное пятно». Таким образом, для создания карты нефтяных загрязнений в STS проводилась классификация исследуемых объектов с последующим выводом интересующего класса на картографическом интерфейсе.

Для выявления нефтяных загрязнений на морской поверхности, в первую очередь, используются спутниковые радиолокационные данные. Наличие на морской поверхности нефтяной пленки определяется затуханием резонансной гравитационно-капиллярной составляющей морских волн. В этом случае на поверхности моря проявляются выглаженные участки – слики, которые соответствуют наблюдаемым темным областям пониженного обратно-рассеянного сигнала (Булатов и др., 2003).

Радиолокационные образы пленочных загрязнений существенно зависят от внешних факторов, в первую очередь – от приповерхностного ветра (Gade, Alpers, 1999). Пленки, независимо от их происхождения, разрушаются, если скорость ветра превышает 8–10 м/с (Espedal, Johannessen, 2000). Штилевым условиям или областям ослабления приповерхностного ветра, скорость которого меньше 1–2 м/с, на радиолокационных изображениях (РЛИ) соответствуют темные пятна пониженного рассеяния радиолокационного сигнала, на фоне которых невозможно идентифицировать нефтяные пленочные загрязнения. Но штилевые области не единственные проявления, которые принято называть «подобиями нефтяных пятен» (Лаврова и др., 2011). Для района мониторинга характерны следующие типы «подобий» нефтяных загрязнений, которые затрудняют корректную идентификацию нефтяных пятен:

1. **Биогенные пленки.** Во время активного цветения фитопланктона в исследуемом районе наблюдается два его цикла: весной, в апреле–мае; и в конце лета – начале осени, в конце августа – сентябре. В период активного цветения практически вся прибрежная зона заполнена естественными биогенными пленками, которые проявляются на РЛИ в виде тонких вытянутых линий. Биогенные пленки, в отличие от нефтяных, очень чувствительны к прибрежным течениям. За счет этих пленок

визуализируются, например, субмезомасштабные вихревые структуры (Лаврова, 2005; Костяной и др., 2010; Лаврова и др., 2011; Gade et al., 2013). Пример поверхностных проявлений биогенных пленок представлен на рис. 3. На укрупненном фрагменте выделен биогенный слик, который ошибочно мог бы быть идентифицирован как сброс с судна вод, содержащих нефтепродукты. Расположение биогенных пленок вдоль течений позволяет в некоторых случаях отличить их от проявления на РЛИ нефтяного сброса с движущегося судна, особенно, если сброс осуществлялся с судна, следующего поперек вдольберегового течения. Гораздо сложнее различить на РЛИ небольшую темную область, соответствующую скоплению водорослей, от темной области, соответствующей сбросу с неподвижного судна.

2. Граница гидрологического фронта. Вдоль границы гидрологического фронта, в конвергентных зонах, происходит аккумуляция поверхностно-активных веществ различного происхождения. На РЛИ такая граница проявляется в виде достаточно широкой темной полосы с неровными краями, которые обуславливаются нестационарностью фронтальной зоны, турбулентными процессами на ее границах (на рис. 4 граница фронта отмечена стрелками). Такие проявления могут иметь радиолокационное подобие с разливом большого количества нефтепродуктов с движущегося судна. Подобная темная полоса может наблюдаться и на границе поверхностного проявления атмосферного фронта. Обычно, протяженность подобной границы может составлять несколько десятков – сотню километров. Подобная протяженность нефтяного сброса могла бы быть вызвана только катастрофическим разливом, такие случаи, как правило, имеют широкий резонанс в прессе.



Рис. 3. Визуализация субмезомасштабных вихревых структур за счет биогенных пленок. На врезке пример слика, который имеет радиолокационный образ, подобный нефтяному сбросу. Фрагмент РЛИ SAR-C Sentinel-1A от 08 марта 2019 г.

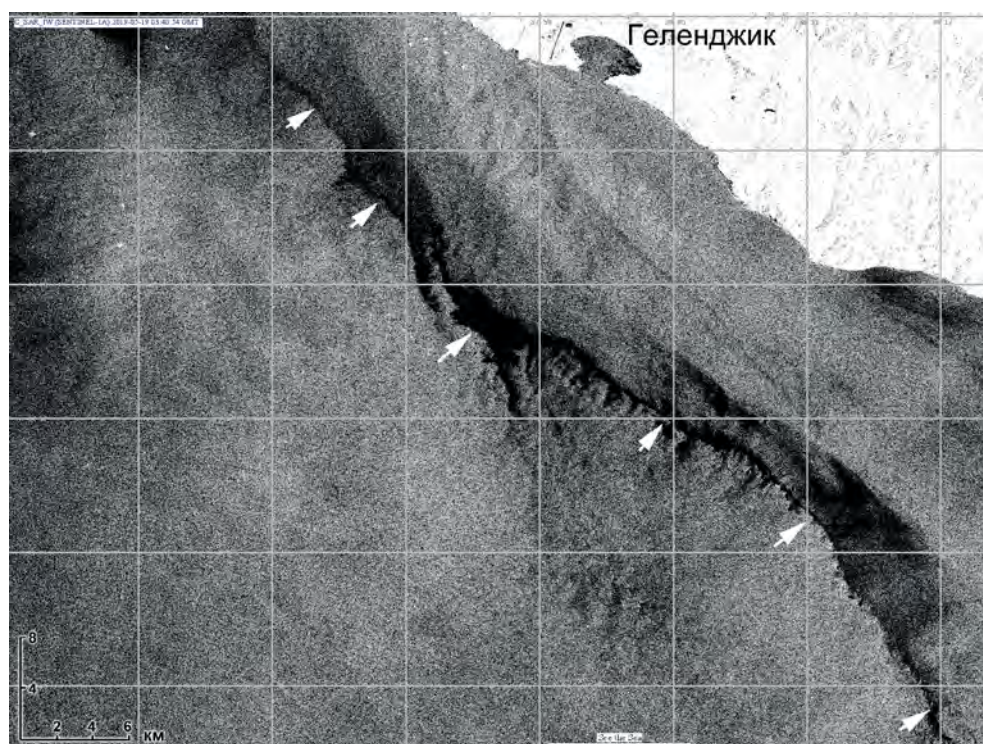


Рис. 4. Проявление границы гидрологического фронта на РЛИ SAR-C Sentinel-1A от 19 мая 2019 г.

3. **Штилевые области.** Штилевым областям соответствуют обширные зоны пониженного рассеяния радиолокационного сигнала. Их трудно спутать с нефтяным разливом, если только он не катастрофический. Но наличие на РЛИ таких областей препятствует проведению мониторинга нефтяных загрязнений, поскольку на их фоне невозможно выделить никакие пленочные загрязнения.

4. **Области ветровой тени.** Им также соответствуют темные области пониженного рассеяния радиолокационного сигнала, они наблюдаются вблизи береговой черты. Маркотхский горный хребет, который располагается в исследуемом районе в непосредственной близости от берега, способствует образованию ветровой тени при северных и северо-восточных ветрах. Этот процесс серьезно осложняет выявление пленочных загрязнений в Цемесской и Геленджикской бухтах при ветрах соответствующих румбов.

5. **Кильватерные следы.** В отдельных случаях кильватерные следы проявляются не в виде характерных «усов» (Hennings et al., 1999; Лаврова, Митягина, 2016), а в виде длинной узкой полосы, длина которой может составлять до 15 км (рис. 5). Отличить такой след от сброса с судна вод, содержащих нефтепродукты, помогает яркая белая полоса вдоль следа (усиление ряби), расположенная вблизи судна.

Для 2018–2020 гг. с помощью возможностей информационной системы STS было проанализировано 1069 РЛИ, полученных с помощью радиолокаторов SAR-C спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B. Район мониторинга был ограничен координатами, представленными рамкой на рис. 11а. В таблице 1 дано распределение сцен

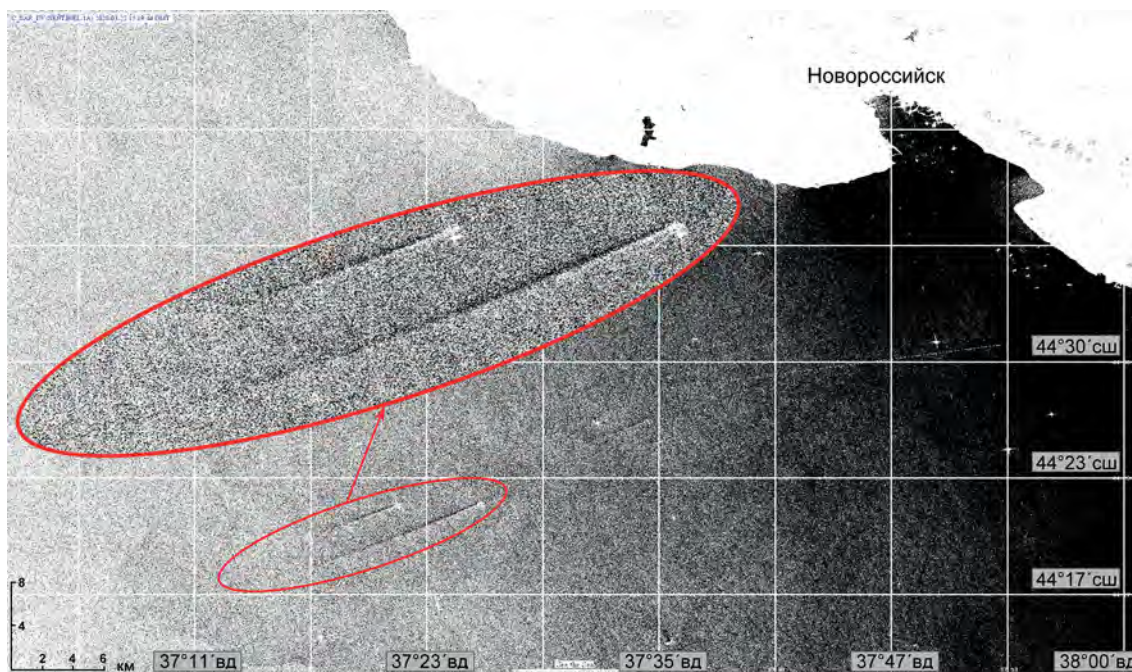


Рис. 5. Поверхностные проявления корабельных следов.
Фрагмент РЛИ SAR Sentinel-1A от 22 марта 2020 г.

по сезонам года. Здесь и далее в статье под сезонами подразумеваются календарные времена года: «зима» – с декабря по февраль, «весна» – с марта по май, «лето» – с июня по август, «осень» – с сентября по ноябрь.

Таблица 1. Количество радиолокационных изображений спутников Sentinel-1A, Sentinel-1B, проанализированных в системе STS за 2018–2020 гг.

Сезон	2018 г.		2019 г.		2020 г.	
	Sentinel-1A	Sentinel-1B	Sentinel-1A	Sentinel-1B	Sentinel-1A	Sentinel-1B
Зима	43	49	42	47	44	40
Весна	44	54	43	50	42	44
Лето	42	49	43	47	46	46
Осень	39	48	42	41	43	41
Всего	168	200	170	185	175	171

Как видно из таблицы, имелась хорошая обеспеченность радиолокационными данными для проведения спутникового мониторинга. В среднем, в месяц съемка проводилась 30 раз. Причем в эти годы общее количество РЛИ данного района было примерно одинаковым.

Все РЛИ были проанализированы, с помощью внедренных в систему STS инструментов были выявлены, описаны и сохранены в специальную базу данных все случаи проявлений нефтяных загрязнений на радиолокационных изображениях. Были оценены площади нефтяных пятен и протяженность судовых сбросов.

Результаты мониторинга

В результате тематического анализа 1069 РЛИ было выявлено 106 антропогенных загрязнений морской поверхности, причем на одном РЛИ могло быть несколько нефтяных пятен. Следует отметить, что отобранные случаи с большой вероятностью являлись именно антропогенными загрязнениями, а не их РЛ-подобиями. Результаты проведенного спутникового мониторинга показали, что, как и в предыдущие годы, можно разделить все выявленные случаи антропогенных загрязнений на три группы: сбросы с движущихся судов вод, содержащих нефтепродукты; загрязнения с судов на якорных стоянках и загрязнения в бухтах. В основном наблюдались сбросы с судов, направляющихся в Новороссийский порт. Таких случаев было идентифицировано 90; на якорных стоянках внешнего рейда Новороссийского порта было выявлено 10 случаев загрязнений морской поверхности; обширных загрязнений в Цемесской и Геленджикской бухтах – 6 (рис. 6). Причем в бухтах загрязнений могло быть значительно больше, но, учитывая утреннее время пролета спутника (06:20-06:40 местного времени), когда ветер дует с берега, трудно отличить загрязнение в бухте от ветровой тени.

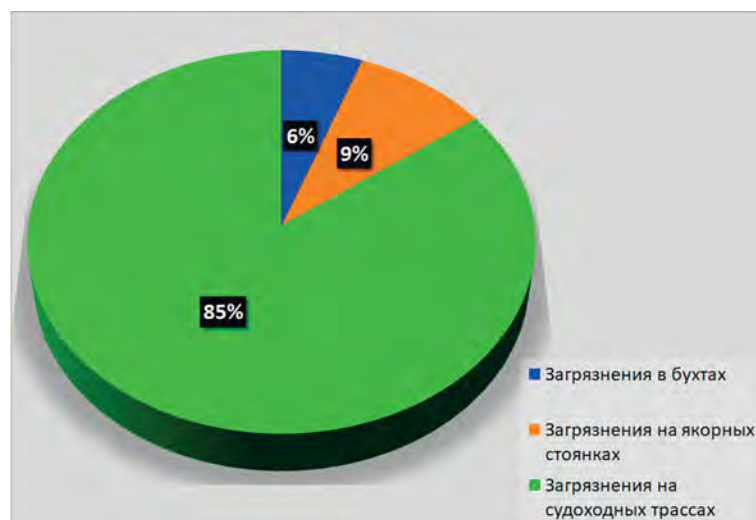


Рис. 6. Диаграмма основных классов нефтяных загрязнений за 2018–2020 гг.

Пример «свежего» сброса, который был произведен непосредственно перед радиолокационной съемкой, представлен на рис. 7а. Его протяженность составляет более 13 км. Белая точка в юго-восточной части сброса соответствует судну, ответственному за сброс. Пример «старого» сброса, длина которого составляет более 8 км, представлен на (рис. 7б). В подобных случаях под непосредственным воздействием ветра пленка нефти перемещается, а нефть аккумулируется на подветренной стороне пятна. Кроме того, приповерхностный ветер возбуждает динамические процессы в верхнем слое воды. Наиболее распространенный из таких

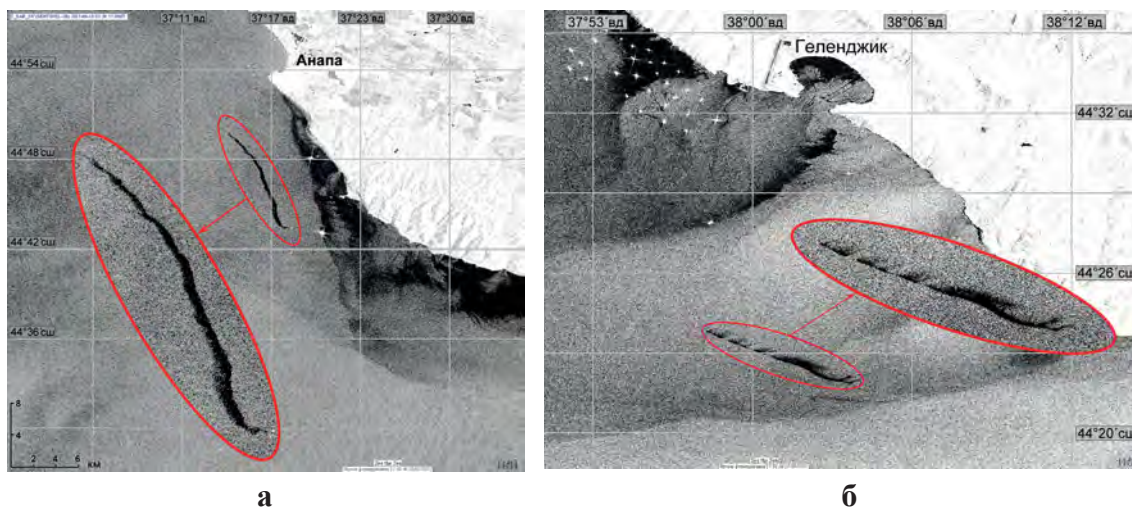


Рис. 7. Проявление на РЛИ пленочных загрязнений, связанных со сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты: **а** – «свежий» сброс, произведенный незадолго до радиолокационной съемки. Фрагмент РЛИ SAR-C Sentinel-1B от 16 июня 2017 г.; **б** – сброс с судна в виде гребенчатой структуры. Фрагмент РЛИ SAR-C Sentinel-1A от 13 марта 2018 г.

процессов – циркуляция Ленгмюра, представляющая собой вытянутые по ветру вихри перемежающихся направлений. Пятно приобретает характерный вид «гребенки» (Marmorino et al., 2008; Лаврова, Митягина, 2012; Ермаков и др., 2018). Многочисленные белые точки на акватории западнее Геленджика представляют собой суда на якорной стоянке, часть из которых находится в зоне ветровой тени (большое черное пятно у берега). В самой Геленджикской бухте, у северного берега также расположена зона ветровой тени.

На якорной стоянке у мыса Дооб по сравнению с предыдущими годами резко сократилось число загрязнений. За 2018–2020 гг. было выявлено только десять таких случаев. Один из них представлен на рис. 8. Суда, стоящие на внешнем рейде порта Новороссийск, располагаются в непосредственной близости от берега, минимальное расстояние составляет меньше километра. Раньше, в начале двухтысячных годов, нефтяные загрязнения в этом районе постоянно попадали на берег, загрязняя пляжи. По всей видимости, Администрация порта Новороссийск стала серьезнее относиться к этой проблеме.

Гораздо хуже с экологической точки зрения ситуация в районе якорной стоянки в черноморском предпроливье Керченского пролива. Нефтяные загрязнения на этой якорной стоянке наблюдаются регулярно. Практически на всех РЛИ этого района идентифицируются антропогенные загрязнения. На левой врезке рис. 9 представлен подобный пример сброса вод, содержащих нефтепродукты, с движущегося судна. Его протяженность более 10 км.

На правой врезке – сброс со стоящего судна. Площадь загрязнения составляет 0.4 км². В обоих случаях хорошо идентифицируются суда, ответственные за сброс. В случае необходимости с помощью системы АИС можно определить, что это за суда.

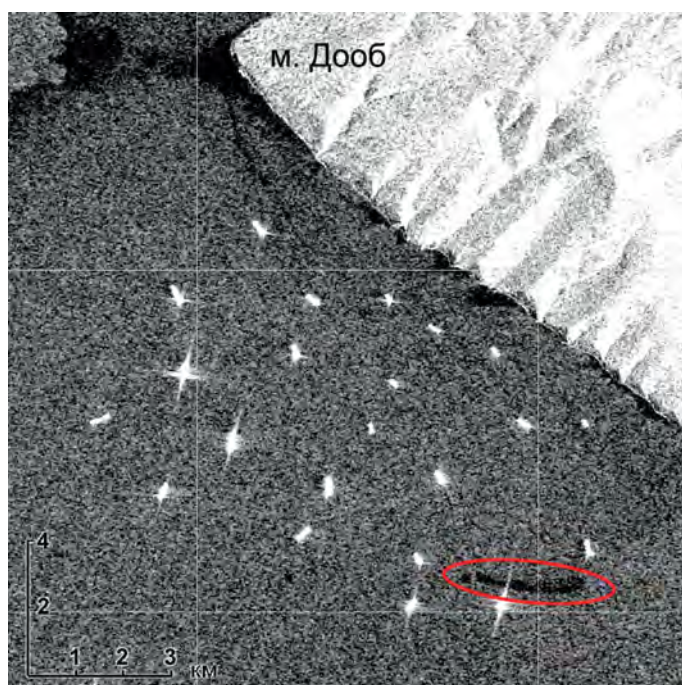


Рис. 8. Антропогенные загрязнения в районе якорной стоянки на внешнем рейде п. Новороссийск. Фрагмент РЛИ SAR Sentinel-1A от 23 июля 2018 г.

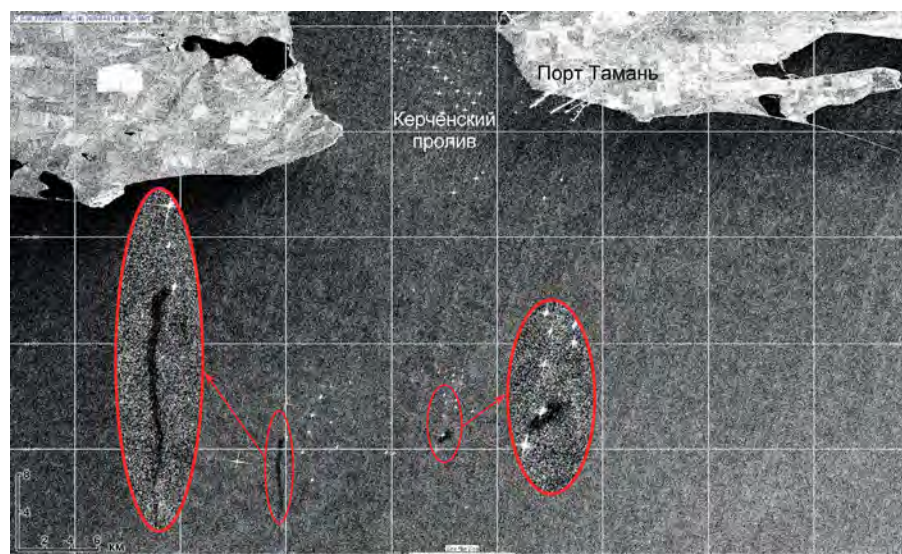


Рис. 9. Нефтяные загрязнения на якорной стоянке в черноморском предпроливье Керченского пролива. Фрагмент РЛИ SAR-C Sentinel-1B от 1 апреля 2020 г.

Труднее всего идентифицировать загрязнения в Цемесской и Геленджикской бухтах, поскольку темные области в них могли соответствовать ветровой тени. В данном исследовании были учтены только бесспорные случаи. Пример загрязнения в Цемесской бухте представлен на рис. 10, на котором нефтяное пятно отходит от одного из причалов нефтерайона «Шесхарис». Площадь загрязненных вод составила 0.3 км². Такие загрязнения вызываются, как правило, ошибками в технологических операциях, выполняемых в порту, или авариями.

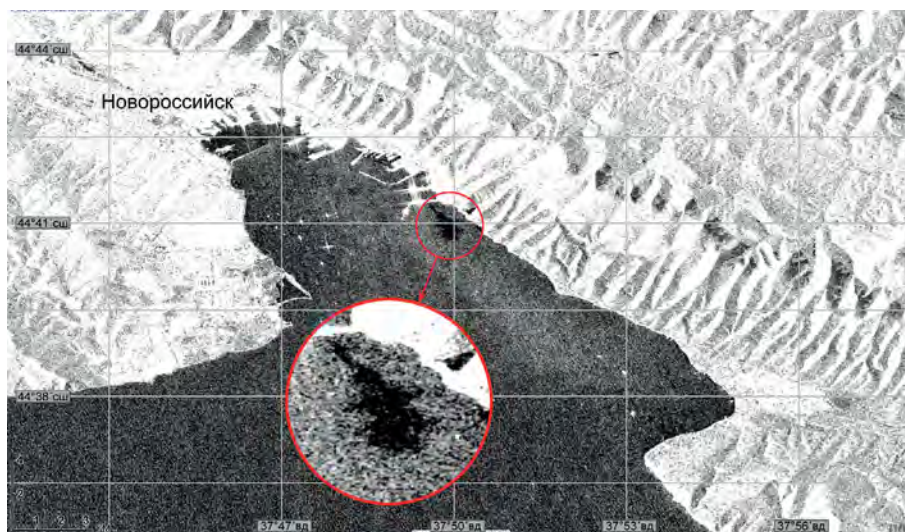


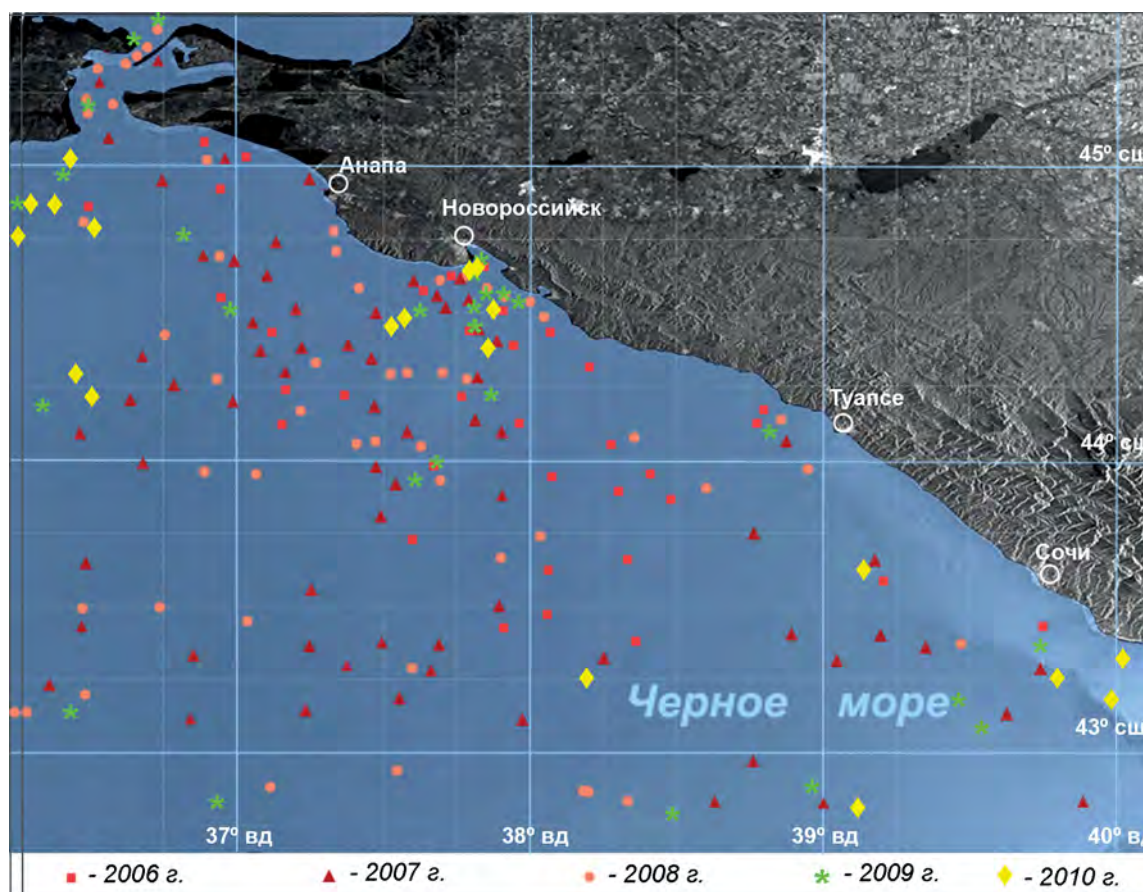
Рис. 10. Антропогенное загрязнение в Цемесской бухте.
Фрагмент РЛИ SAR-C Sentinel-1B от 9 января 2019 г.

По результатам проведенного спутникового радиолокационного мониторинга с помощью инструментария системы STS была построена карта распределения нефтяных загрязнений в акватории Анапа – Геленджик (рис. 11а). Хорошо видно, что подавляющее большинство выявленных загрязнений находилось на траверзе порта Новороссийск. Подобная ситуация отмечалась и при проведении спутникового радиолокационного мониторинга в 2006–2010 гг. (рис. 11б).

Поскольку в 2006–2010 гг. мониторинг проводился на основе данных ASAR Envisat, имевших пространственное разрешение 75 м в точке, то выявлены были только относительно большие сбросы загрязненных нефтепродуктами вод с судов, количество которых на всей акватории от Керченского пролива до г. Сочи составило около 300 за 5 лет (Лаврова и др., 2011). За 2018–2020 гг., т.е. за три года, на существенно меньшей акватории (Анапа – Геленджик) было выявлено 106 случаев нефтяных загрязнений. Спутниковый мониторинг показал, что количество загрязнений, связанных с судовыми сбросами, в последнее время не уменьшилось, а даже возросло. Так в 2018 г. было выявлено 27 случаев загрязнений морской поверхности (не только связанных с судовыми сбросами), в 2019 г. – 39, в 2020 г. – 40 (рис. 12). На рис. 13 представлены гистограммы распределения нефтяных сбросов по площади загрязнения отдельно для 2018, 2019 и 2020 гг. Среднее значение одного загрязненного участка (нефтяного пятна) составляет 0.67 км^2 . Особенностью полученных распределений является тот факт, что в 2018 и 2019 гг. по 10 нефтяных пятен имели размер более 2 км^2 , в то время как менее 0.1 км^2 – ни одного, а в 2020 г. количество относительно больших пятен сократилось до 3, при этом появилось 5 пятен самого малого масштаба ($<0.1 \text{ км}^2$). Общая площадь нефтяного загрязнения составила 69.82 км^2 в 2018 г., 71.62 км^2 – в 2019 г. и 28.89 км^2 – в 2020 г. Таким образом, суммарная площадь нефтяного загрязнения в 2020 г. сократилась в 2.5 раза по сравнению с 2019 г., при том же количестве обнаруженных нефтяных пятен. Это может быть связано с уменьшением интенсивности судоходства в 2020 г. в связи с пандемией Covid-19.



а



б

Рис. 11. Карта нефтяных загрязнений, составленная на основе анализа радиолокационных данных: **а** – акватория Анапа-Геленджик по данным SAR-C Sentinel-1A/-1B за 2018–2020 гг.; **б** – акватория Керченский пролив–Сочи по данным ASAR Envisat за 2006–2010 гг. (Лаврова и др., 2011)

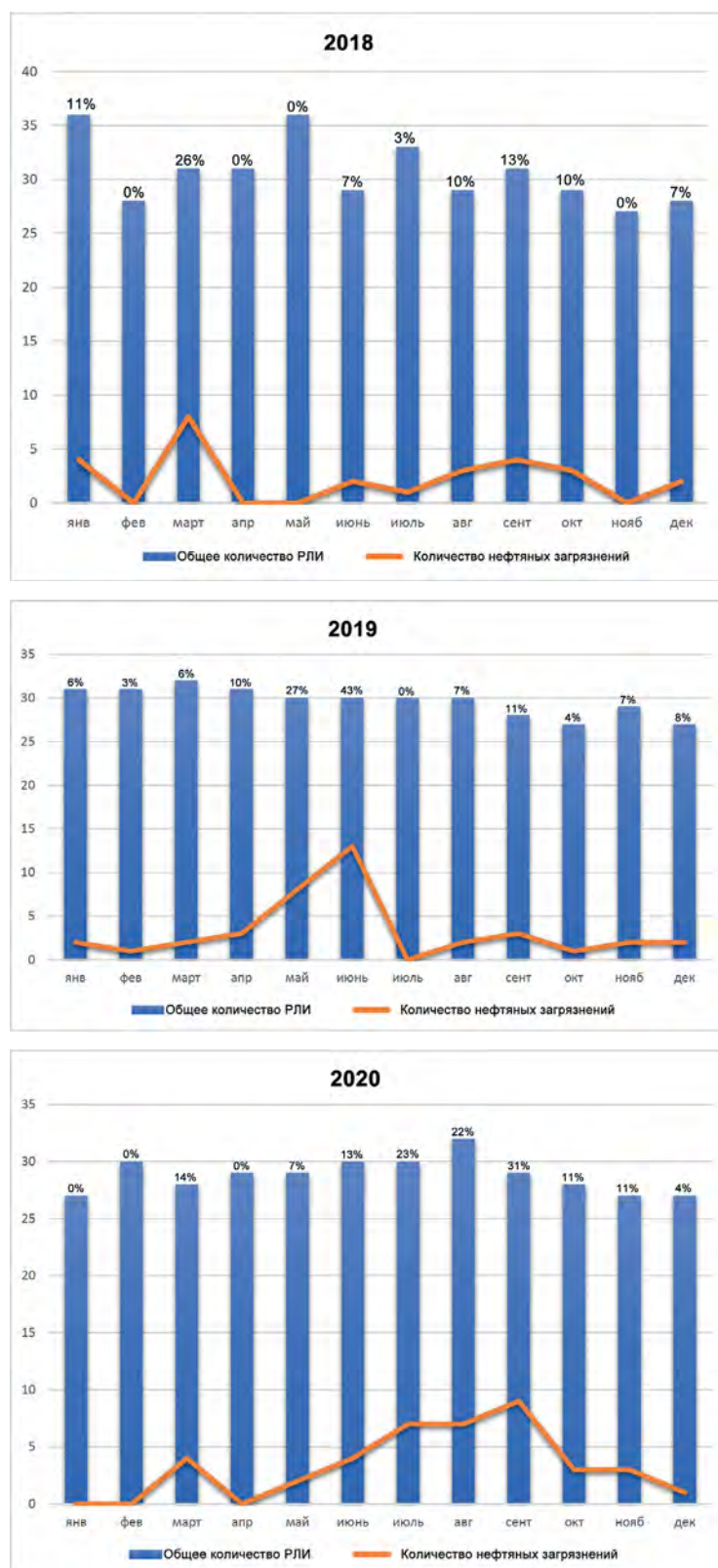


Рис. 12. Общее количество проанализированных радиолокационных данных SAR-C Sentinel-A/-1B и количество выявленных нефтяных загрязнений морской поверхности на акватории Анапа – Геленджик в 2018–2020 гг. Процент случаев нефтяных загрязнений от общего количества РЛИ в каждом месяце указан над соответствующим столбиком

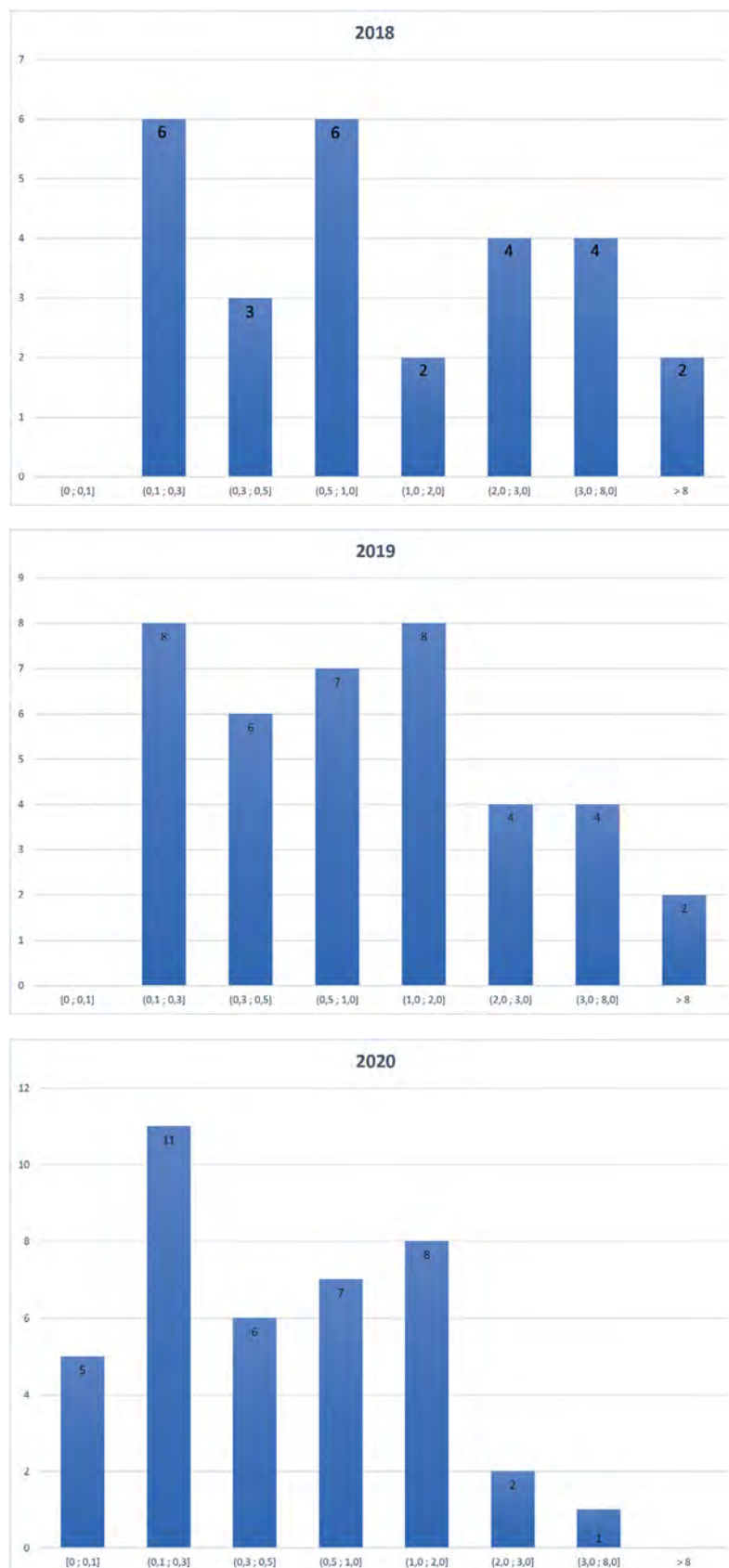


Рис. 13. Гистограмма распределения нефтяных сбросов по площади загрязнения. Представленные интервалы площадей отсчитываются в кв. км.

Следует еще раз отметить, что все добавленные в тематическую базу данных STS случаи нефтяных загрязнений являлись именно пленочными загрязнениями антропогенного происхождения, подтвержденные экспертами. Это говорит о том, что количество фактических антропогенных пленочных загрязнений могло быть больше представленных результатов. Из выше представленных диаграмм видно, что большая часть нефтяных загрязнений, главным образом связанных со сбросами с судов загрязненных вод, наблюдается в летний и осенний периоды. Такое сезонное распределение может быть связано как с интенсификацией судоходства в этот период, так и с более благоприятными гидрометеорологическими условиями для радиолокационных наблюдений (Лаврова и др., 2011).

Заключение

В работе представлены результаты спутникового мониторинга северо-восточной части Черного моря (акватория между Анапой и Геленджиком) за период 2018–2020 гг. С использованием информационной системы «See the Sea» было проанализировано более 1000 радиолокационных изображений, полученных радиолокаторами спутников Sentinel-1A, -1B. За 3 года исследования обнаружено 106 случаев нефтяных загрязнений, пополнивших базу данных в информационной системе STS. С использованием инструментов STS была построена карта-схема распределения загрязнений, обнаруженных на акватории Анапа – Геленджик в 2018–2020 гг. Было проведено сравнение полученных результатов с результатами предыдущего спутникового мониторинга, проведенного в 2006–2012 гг. Как и в предыдущие годы, основными участками загрязнений являются судоходные трассы, ведущие в порт Новороссийск. На них приходится около 85% всех выявленных загрязнений. Протяженность сбросов может достигать 15 км. Другими районами постоянных загрязнений являются акватории Цемесской и Геленджикской бухт, а также внешних рейдов порта Новороссийск. Учитывая, что в расчет принимались только бесспорные случаи нефтяного загрязнения, заведомо не являющиеся описанными в статье «подобиями нефтяных пятен», загрязнений могло быть значительно больше. Сравнение полученных результатов с предыдущими исследованиями показало, что негативная экологическая ситуация сохраняется в Новороссийском регионе, особенно в летний и осенний периоды, т.е. в разгар курортного сезона. Исключением является 2020 г., когда площадь суммарного загрязнения уменьшилась в 2.5 раза, что может быть обусловлено уменьшением интенсивности судоходства в 2020 г. в связи с пандемией Covid-19.

Благодарности. Работа Князева Н.А. и Лавровой О.Ю. выполнена в рамках госзадания по теме «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164). Обработка и анализ спутниковых данных проводились с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» с помощью инструментария информационной системы «See the Sea», развитие которой осуществляется в

рамках темы «Мониторинг». Костяной А.Г. выполнял работу в рамках Госзадания № 0128-2021-0002 «Механизмы формирования циркуляционных структур Мирового океана: ключевые процессы в пограничных слоях и их роль в динамике океана на основе экспедиционных исследований, дистанционного зондирования, численного и лабораторного моделирования».

Литература

- Бедрицкий А.И., Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Лаврова О.Ю., Островский А.Г.* Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей в 2003–2007 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. № 11. С. 5–13.
- Бедрицкий А.И., Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Лаврова О.Ю., Островский А.Г.* Космический мониторинг загрязнения российского сектора Азово-Черноморского бассейна в 2008 г. // Метеорология и гидрология. 2009. № 3. С. 5–19.
- Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Раев М.Д., Сабинин К.Д., Трохимовский Ю.Г., Чурюмов А.Н., Шуган И.В.* Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи физических наук. 2003. 173(1). С. 69–87.
- 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.
- Иванов А.Ю., Кучейко А.А., Филимонова Н.А., Кучейко А.Ю., Евтушенко Н.В., Терлеева Н.В., Ускова А.А.* Пространственно-временное распределение пленочных загрязнений в Черном и Каспийском морях по данным космической радиолокации: сравнительный анализ // Исследование Земли из космоса. 2017. № 2. С. 13–25.
- Калашишникова Н.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Серебряный А.Н.* Влияние вихревых структур на распространение загрязнений в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 228–240.
- Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И.* Мелкомасштабные вихри Черного моря. // Труды VII Всероссийской конференции “Дистанционное зондирование Земли из космоса” (Москва, 16–20 ноября 2009 г.), ДоМира. Москва, 2010. Т. 7. N1. С. 248–259.
- Кровотынцев В.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Островский А.Г.* Космический мониторинг состояния природной среды Азово-Черноморского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2007. Т. 1. № 4. С. 295–303.
- Кузнецов А.Н., Федоров Ю.А.* Нефтяное загрязнение береговой зоны Черного моря в районе г. Новороссийска и динамика его естественной трансформации // В кн.: Система Черного моря / Под ред. А.П. Лисицына. М.: Научный мир, 2018. С. 705–716. DOI: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.705.
- Лаврова О.Ю.* Стики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2005. Т. 2. С. 118–123.
- Лаврова О.Ю., Каримова С.С., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю.* Оперативный спутниковый мониторинг акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей в 2009–2010 гг. //

- Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 168–185.
- 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.
- Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Особенности проявления на спутниковых изображениях гидродинамических процессов в областях интенсивного цветения фитопланктона // Исследования Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 145–160.
- Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Исследование влияния динамических и циркуляционных процессов на распространение антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности на основе комплексного использования спутниковой информации // Проблемы постсоветского пространства. 2015. № 4. С. 29–52.
- 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.
- Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Уваров И.А., Луян 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.
- Луян Е.А., Матвеев А.А., Уваров И.А., Бочарова Т.Ю., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Спутниковый сервис See the Sea – инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–261.
- Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Радиолокационные наблюдения поверхностных пленочных загрязнений в прибрежной зоне Черного и Азовского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2007. Т. 1. № 4. С. 317–324.
- Немировская И.А., Онегина В.Д., Коновалов Б.В., Трубкин И.П. Углеводороды в водах и донных осадках Черного моря // В кн.: Система Черного моря / Под ред. А.П. Лисицына. М.: Научный мир, 2018. С. 677–705. DOI: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.677.
- Espedal H.A., Johannessen O.M. Detection of oil spills near offshore installations using synthetic aperture radar (SAR) // Int. J. Remote Sensing. 2000. Vol. 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 237/238. 1999. P. 441–448. DOI: 10.1016/S0048-9697(99)00156-4.
- Gade M., Byfield V., Ermakov S., Lavrova O., and Mitnik L. Slicks as Indicators for Marine Processes // Oceanography. 2013. 26(2). 138–149.
- Hennings R., Romeiser R., Alpers W., Viola A. Radar imaging of Kelvin arms of ships wakes // Int. J. Remote sensing. 1999. Vol. 20. No. 13. P. 2519–2543.
- Ivanov A.Yu., Kucheiko A.A. Large discharges from ships in the Black Sea studied by synthetic aperture radar with the support of automated identification systems // International Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 35. No. 14. P. 5513–5526.
- Ivanov A.Yu., Kucheiko A.A. Distribution of oil spills in inland seas based on SAR image analysis: a comparison between the Black Sea and the Caspian Sea // International Journal of Remote Sensing, 2016. 37. No. 9. P. 2101–2114. DOI: 10.1080/01431161.2015.1088677.
- Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Lavrova O.Yu. & Mityagina M.I. Satellite remote sensing of submesoscale eddies in the Russian Seas. In: *Velarde M.G, Tarakanov R., Marchenko A.* (Eds.) *The Ocean in Motion* // Springer Oceanography. 2018. P. 397–413. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_24.
- 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. *Anna Di Mauro, Andrea Scozzari, Francesco Soldovieri* (Eds.). Springer Nature. 2022. (In press).
- Kuznetsov A., Fedorov Y.* Oil pollution of the coastal zone of the Black Sea in an area of intensive navigation (Novorossiysk Bay, Kerch Strait) and the dynamics of natural attenuation process. In: *Oil Pollution in the Black Sea: Part II – Regional Case Studies on Remediation and Prevention.* (Eds.) *Angela Carpenter and Andrey G. Kostianoy* The Handbook of Environmental Chemistry. Springer, Berlin, Heidelberg. 2020. https://doi.org/10.1007/698_2020_503.
- 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. Geophys. Res.* 2008. Vol. 115. C04030.
- Mityagina M., Lavrova O.* Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution in the Black and Caspian Seas // *Remote Sensing.* 2016. 8(10). 875. DOI: 10.3390/rs8100875.
- Shcherbak S.S., Lavrova O.Y., Mityagina M.I., Bocharova T.Y., Krovotyntsev V.A., Ostrovskii A.G.* Multisensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the northeastern coastal zone of the Black Sea // *International Journal of Remote Sensing.* Vol. 29. Iss. 21. November 2008. P. 6331–6345. DOI: 10.1080/01431160802175470.

SATELLITE RADAR MONITORING OF OIL POLLUTION IN THE WATER AREAS BETWEEN ANAPA AND GELENDZHİK IN 2018–2020

Knyazev N.A.¹, Lavrova O.Yu.¹, Kostianoy A.G.^{2,3}

¹*Space Research Institute RAS,
84/32, st. Profsoyuznaya, Moscow, 117997, Russia,*

²*Shirshov Institute of Oceanology, RAS,
36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia,*

³*S.Yu. Witte Moscow University
12/1, 2nd Kozhukhovskiy proezd, Moscow, 115432, Russia,
e-mail: nkkniazev@gmail.com*

Submitted 23.03.2021, accepted 08.04.2021.

The paper presents the results of satellite monitoring of oil pollution in the northeastern part of the Black Sea in the area between Anapa and Gelendzhik in 2018–2020. The monitoring was carried out using the archives of radar data obtained by SAR-C radars installed on the Sentinel-1A and -1B satellites. The work with the data archives was carried out using the tools of the “See the Sea” (STS) information system developed at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences. The conducted satellite monitoring revealed the main sources of sea surface pollution with oil products in the study area. The overwhelming pollution (85%) is associated with discharges of water containing oil products from moving vessels. With the help of STS tools, a map of oil pollution detected on radar images was compiled, on the basis of which the main areas of oil pollution were identified. These include the main shipping routes to the Novorossiysk Sea Port, the anchorage of ships and the water areas of the Tsemes (Novorossiysk) Bay and Gelendzhik Bay. Seasonal and interannual variability of oil pollution was determined on the basis of satellite information for the area between Anapa and Gelendzhik. The results of the 2018–2020 monitoring were compared with those obtained during similar monitoring carried out in 2006–2010. It was concluded that there has been no reduction in the amount of detected pollution, which negatively affects the ecological state of the northeastern part of the Black Sea.

Keywords: satellite monitoring, radar image, oil pollution, “See the Sea” information system, northeastern part of the Black Sea, Tsemes Bay, Gelendzhik Bay

Acknowledgments: The work of N.A. Knyazev and O.Yu. Lavrova was done in the framework of the State Assignment on the Programme "Monitoring" (State registration No. 01.20.0.2.00164). The processing and analysis of satellite data was carried out using the capabilities of the Shared Use Center "IKI-Monitoring" using the “See the Sea” information system toolkit, which is being developed in the framework of the "Monitoring" Programme. A.G. Kostianoy carried out his part of work in the framework of State Assignment No. 0128-2021-0002 "Mechanisms of the formation of circulation structures of the World Ocean: key processes in the boundary layers and their role in ocean dynamics based on expeditionary research, remote sensing, numerical and laboratory modeling."

References

- Bedrickii, A.I., V.V. Asmus, V.A. Krovotyntsev, O.Yu. Lavrova, and A.G. Ostrovskii, 2007: Sputnikovyi monitoring zagryazneniya rossiiskogo sektora Chernogo i Azovskogo morei v 2003–2007 gg. (Satellite monitoring of pollution of Russian sectors of the Black and Azov Seas in 2003–2007). *Meteorologiya i gidrologiya*, **11**, 5–13.
- Bedrickii, A.I., V.V. Asmus, V.A. Krovotyntsev, O.Yu. Lavrova, and A.G. Ostrovskii, 2009: Kosmicheskii monitoring zagryazneniya rossiiskogo sektora Azovo-Chernomorskogo basseina v 2008 g. (Space monitoring of pollution of Russian sectors of the Black and Azov Seas in 2008). *Meteorologiya i gidrologiya*, **3**, 5–19.
- Bulatov, M.G., Yu.A. Kravtsov, O.Yu. Lavrova, K.T. Litovchenko, M.I. Mityagina, M.D. Raev, K.D. Sabinin, Yu.G. Trokhimovskii, A.N. Churyumov, and I.V. Shugan, 2003: Physical mechanisms of aerospace radar imaging of the ocean. *Phys. Usp.*, **46**, 63–79, doi: 10.1070/PU2003v046n01ABEH001114.
- Ermakov, S.A., O.Yu. Lavrova, I.A. Kapustin, A.V. Ermoshkin, A.A. Molkov, and O.A. Danilicheva, 2018: O grebenchatoi strukture granits slikov na morskoi poverhnosti (On the “comb” structure of the edges of slicks on the sea surface). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **15**(7), 208–217, doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-208-217.
- Espedal, H.A. and O.M. Johannessen, 2000: Detection of oil spills near offshore installations using synthetic aperture radar (SAR). *Int. J. Remote Sensing*, **21**(11), 2141–2144.
- Gade, M. and W. Alpers, 1999: Using ERS-2 SAR images for routine observation of marine pollution in European coastal waters. *Science of the Total Environment* **237/238**, 441–448, doi: 10.1016/S0048-9697(99)00156-4.
- Gade, M., V. Byfield, S. Ermakov, O. Lavrova, and L. Mitnik, 2013: Slicks as Indicators for Marine Processes. *Oceanography*, **26**(2), 138–149.
- Hennings, R., R. Romeiser, W. Alpers, and A. Viola, 1999: Radar imaging of Kelvin arms of ships wakes. *Int. J. Remote sensing.*, **20**(13), 2519–2543.
- Ivanov A.Yu. and A.A. Kucheiko, 2014: Large discharges from ships in the Black Sea studied by synthetic aperture radar with the support of automated identification systems. *International Journal of Remote Sensing*, **35**(14), 5513–5526.

- Ivanov, A.Yu. and A.A. Kucheiko, 2014: Large discharges from ships in the Black Sea studied by synthetic aperture radar with the support of automated identification systems. *International Journal of Remote Sensing*, **35**(14), 5513–5526.
- Ivanov, A.Yu. and A.A. Kucheiko, 2016: Distribution of oil spills in inland seas based on SAR image analysis: a comparison between the Black Sea and the Caspian Sea. *International Journal of Remote Sensing*, **37**(9), 2101–2114, doi: 10.1080/01431161.2015.1088677.
- Ivanov, A.Yu., A.A. Kucheiko, N.A. Filimonova, A.Yu. Kuchejko, N.V. Evtushenko, N.V. Terleeva, and A.A. Uskova, 2017: Prostranstvenno-vremennoe raspredelenie plenochnyh zagryaznenii v Chernom i Kaspiiskom moriah po dannym kosmicheskoi radiolokacii: sravnitelnyi analiz (Spatial and Temporal Distribution of Oil Spills in the Black Sea and the Caspian Sea Based on SAR Images: Comparative Analysis). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, **2**, 13–25.
- Kalashnikova, N.A., O.Yu. Lavrova, M.I. Mityagina, and A.N. Serebryany, 2013: Vliyanie vihrevykh struktur na rasprostranenie zagryaznenii v pribrezhnoi zone (Influence of vortex structures on the spread of pollution in the coastal zone). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **10**(3), 228–240.
- Kostianoy, A.G., A.I. Ginzburg, O.Yu. Lavrova, and M.I. Mityagina, 2018: Satellite remote sensing of submesoscale eddies in the Russian Seas. In: M.G. Velarde, R. Tarakanov, A. Marchenko (Eds.) *The Ocean in Motion. Springer Oceanography*, 397–413. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_24.
- Kostianoy, A.G., A.I. Ginzburg, N.A. Sheremet, O.Yu. Lavrova, and M.I. Mityagina, 2010: Melkomasshtabnyye vikhri Chernogo morya. (Small-scale eddies in the Black Sea). *Trudy VII Vserossiyskoy konferentsii «Distantsionnoye zondirovaniye Zemli iz kosmosa»*, **7**(N1), 248–259.
- Kostianoy, A.G. and O.Yu. Lavrova, 2022: Satellite instrumentation and technique for oil pollution monitoring of the seas. In: *Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management*. (Eds.) Anna Di Mauro, Andrea Scozzari, Francesco Soldovieri. *Springer Nature*. (In press).
- Krovotyntsev, V.A., O.Yu. Lavrova, M.I. Mityagina, and A.G. Ostrovskii, 2007: Kosmicheskii monitoring sostoyaniya prirodnoi sredy Azovo-Chernomorskogo bassejna (Space monitoring of the state of the natural environment of the Azov Sea and Black Sea). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, **1**(4), 295–303.
- Kuznetsov, A.N. and Yu.A. Fedorov, 2018: Neftyanoye zagryazneniye beregovoy zony Chernogo morya v rayone g. Novorossiyska i dinamika yego yestestvennoy transformatsii (Oil pollution of the Black Sea coastal zone in the area of Novorossiysk and the dynamics of its natural transformation). V kn.: *Sistema Chernogo morya*, (in the book *The Black Sea System*) pod red. A.P. Lisitsyna, Moscow, Nauchnyy mir, 705–716, doi: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.705.
- Kuznetsov, A. and Y. Fedorov, 2020: Oil pollution of the coastal zone of the Black Sea in an area of intensive navigation (Novorossiysk Bay, Kerch Strait) and the dynamics of natural attenuation process. In: *Oil Pollution in the Black Sea: Part II – Regional Case Studies on Remediation and Prevention*. (Eds.) Angela Carpenter and Andrey G. Kostianoy. *The Handbook of Environmental Chemistry*, Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/698_2020_503.
- Lavrova, O.Yu., 2005: Sliki kak indikatory vihrevoi aktivnosti v pribrezhnoi zone (Slicks as indicators of eddy activity in the coastal zone). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, **2**, 118–123.
- Lavrova, O.Yu., S.S. Karimova, M.I. Mityagina, and T.Yu. Bocharova, 2010: Operativnyi sputnikovyi monitoring akvatorii Chernogo, Baltiiskogo i Kaspiiskogo morei v 2009–

- 2010 gg. (Operational satellite monitoring of the Black, Baltic and Caspian seas in 2009–2010). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, **7**(3), 168–185.
- Lavrova, O.Yu., A.G. Kostianoy, S.A. Lebedev, M.I. Mityagina, A.I. Ginzburg, and N.A. Sheremet, 2011: *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas), Moscow, IKI RAN, 470 p.
- Lavrova, O.Yu. and M.I. Mityagina, 2016: Osobennosti proyavleniya na sputnikovyh izobrazheniyah gidrodinamicheskikh processov v oblastiakh intensivnogo cveteniya fitoplanktona (Manifestation Specifics of Hydrodynamic Processes in Satellite Images of Intense Phytoplankton Bloom Areas). *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, **1**(2), 145–160.
- Lavrova, O.Yu., M.I. Mityagina, and A.G. Kostianoy, 2015: Issledovanie vliyaniya dinamicheskikh i tsirkulyatsionnykh processov na rasprostranenie antropogennykh i biogennykh zagryaznenii morskoi poverhnosti na osnove kompleksnogo ispolzovaniya sputnikovoi informatsii (Study of the impact of dynamic and circulation processes on the distribution of anthropogenic and biogenic sea surface pollution based of integrated use of satellite information). *Problemy postsovetского prostranstva*, **4**, 29–52.
- Lavrova, O.Yu., M.I. Mityagina, and A.G. Kostianoy, 2016: *Sputnikovye metody vyjavleniya i monitoringa zon jekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite Methods for Detecting and Monitoring Marine Zones of Ecological Risk). Moscow, IKI RAN, 334 p.
- Lavrova, O.Yu., M.I. Mityagina, I.A. Uvarov, and E.A. Loupian, 2019: Tekushhie vozmozhnosti i opyt ispolzovaniya informatsionnoi sistemy See the Sea dlya izucheniya i monitoringa yavlenii i processov na morskoi poverhnosti (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*, **16**(3), 266–287, doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
- Loupian, E.A., A.A. Matveev, I.A. Uvarov, T.Ju. Bocharova, O.Yu. Lavrova, and M.I. Mityagina, 2012: Sputnikovyi servis See the Sea – instrument dlya izucheniya processov i yavlenii na poverhnosti okeana (The Satellite Service See the Sea – a tool for study of oceanic phenomena and processes). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **9**(2), 251–261.
- Marmorino, G., G.B. Smith, J.V. Toporkov, M.A. Sletten., D. Perkovich, and S.J. Frasier, 2008: Evolution of ocean slicks under a rising wind. *J. Geophys. Res.*, **115**, C04030.
- Mityagina, M.I. and O.Yu. Lavrova, 2007: Radiolokatsionnye nabljudeniya poverhnostnykh plenochnykh zagryaznenii v pribrezhnoi zone Chernogo i Azovskogo morei (Radar observations of surface film pollution in the coastal zone of the Black Sea and Azov Sea). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, **1**(4), 317–324.
- Mityagina, M. and O. Lavrova, 2016: Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution in the Black and Caspian Seas. *Remote Sensing*, **8**(10), 875, doi: 10.3390/rs8100875.
- Nemirovskaya, I.A., V.D. Onegina, B.V. Konovalov, and I.P. Trubkin, 2018: Uglevodorody v vodakh i donnykh osadkakh Chernogo morya (Hydrocarbons in the waters and bottom sediments of the Black Sea). V kn.: *Sistema Chernogo morya*, (in the book: The Black Sea System), pod red. A.P. Lisitsyna, Moscow, Nauchnyy mir, 677–705, doi: 10.29006 / 978-5-91522-473-4.2018.677.
- Shcherbak, S.S., O.Yu. Lavrova, M.I. Mityagina, T.Y. Bocharova, V.A. Krovotyntsev, and A.G. Ostrovskii, 2008: Multisensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the northeastern coastal zone of the Black Sea. *International Journal of Remote Sensing*, **29**(21), 6331 – 6345, doi: 10.1080/01431160802175470.