

## НЕФТЯНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОМАНСКОГО ЗАЛИВА ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИЗ КОСМОСА

С. К. Клименко<sup>1</sup>, А. Ю. Иванов<sup>1</sup>, Н. В. Евтушенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,  
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,  
e-mail: [klimenko.sk@ocean.ru](mailto:klimenko.sk@ocean.ru);

<sup>2</sup>ГК «СКАНЭКС»,  
Россия, 142784, Московская обл., пос. Румянцево,  
Бизнес-парк «Румянцево», стр. 1

В статье анализируются результаты спутникового радиолокационного мониторинга нефтяных загрязнений Оманского залива, который проводился в период с января 2017 г. по апрель 2020 г. Для этого использовались радиолокационные данные европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B и геоинформационный подход, позволяющий достаточно однозначно определить источники загрязнений. В ходе мониторинга на 730 радиолокационных изображениях было обнаружено 2584 загрязнения, общая площадь которых составила почти 4972 км<sup>2</sup>. Показано, что основной источник нефтяных загрязнений залива – интенсивное судоходство, в том числе танкерный флот, причем наиболее загрязненными водами оказались воды Объединенных Арабских Эмиратов и подходы к Ормузскому проливу.

**Ключевые слова:** Оманский залив, космическая радиолокация, спутниковый мониторинг, нефтяное загрязнение, источники загрязнений

### Введение

Оманский залив – северо-западная часть Аравийского моря – расположен у берегов Омана, Объединенных Арабских Эмиратов (ОАЭ), Ирана и Пакистана; он соединяется с Персидским заливом через Ормузский пролив (Егорин, 2015). В последнее время акватория Оманского залива все чаще привлекает к себе внимание, когда речь идет о нефти. Во-первых, через воды данного пролива проходит один из основных торговых маршрутов в мире – из Персидского залива, в частности, для транспортировки основных добываемых здесь ресурсов – нефти и газа, а также продуктов нефтепереработки, сжиженного природного газа и т. п. Во-вторых, из-за большого потенциала природных ресурсов в этом районе (нефтегазоносности) проводятся геологоразведочные работы с целью обнаружения новых месторождений. Оба эти фактора, а также развитие нефтегазового комплекса (НГК) в регионе с высокой антропогенной нагрузкой промышленности, не способствуют улучшению экологической обстановки (Hooglund, Toth, 1994; Егорин, 2015).

Проблема загрязнения океана нефтью и нефтепродуктами привлекает внимание научной общественности с середины XX в. (Нельсон-Смит, 1977). Океанологи активно занимаются исследованиями как самих загрязнений, так и их влияния на окружающую среду. Вопрос не теряет актуальности и в настоящее время из-за продолжающегося развития нефтяной промышленности: увеличивается количество разрабатываемых месторождений, наращивается добыча сырья, грузооборот и интенсивность судоходства и танкерного флота возрастают. Все это приводит к неизбежному побочному эффекту – загрязнению морей нефтью и нефтепродуктами. Например, основными причинами поступления нефти из нефтеналивных судов в морскую среду являются сбросы промывочных (при мойке танков в открытом море) или балластных вод, разливы в портах при перегрузке и различных мелких авариях. Кроме того, крупные катастрофы, происходящие в морях и океанах, часто приводят к нефтяным разливам (Нельсон-Смит, 1977; Патин, 2017).

Также к нефтяным загрязнениям можно отнести, например, выносы со стоками рек, выбросы сточных, канализационных систем, а также ряд других источников, в том числе природные (т. н. естественное загрязнение). Данные факторы также влияют на состояние морских экосистем, приуроченных к районам НГК, вызывая в них различные изменения, часто необратимые (Нельсон-Смит, 1977).

Последствия нефтяного загрязнения океана, а также его влияние на природные и социально-экономические процессы, достаточно хорошо известны (Нельсон-Смит, 1977; Патин, 2017). В связи с этим, крайне важно оперативно находить места загрязнений, определять их источники и оценивать масштаб загрязнения. Одним из современных методов дистанционного зондирования является наблюдение морской поверхности с помощью космической съемки с радиолокаторов с синтезированной апертурой – РСА, которые позволяют, в отличие от оптических спутников, всепогодно, независимо от солнечного света, и в режиме реального времени проводить мониторинг акваторий (см., например, Иванов, 2007; Иванов, Затыгалова, 2007).

Благодаря космической радиолокации исследователи получают радиолокационное изображение (РЛИ) морской поверхности. После стандартной обработки они выкладываются на специализированный портал, где проводится их интерактивный анализ с использованием геоинформационного подхода и различной дополняющей информации (контекстное окружение, ГМУ и другие доступные данные). Такие изображения оказывают неоценимую помощь в обнаружении нефтяных загрязнений моря и являются основным материалом, использованным в данной работе. С помощью спутникового радиолокационного зондирования можно установить наличие нефтяных загрязнений, их источники и даже определить его тип (антропогенное или естественное). Анализ данных, собранных в течение нескольких лет, позволяет получить пространственно-временное распределение пятен на акватории за некоторый период времени и выделить наиболее загрязненные районы.

Данные космической радиолокации использовались в исследовании, посвященном нефтяным загрязнениям прибрежной зоны ОАЭ (Issa, 2010), где приведены единичные примеры разливов на акватории портов Фуджейра, Дибба и Хор-Факкан в 2002 г. Но работ, посвященных нефтяному загрязнению всей акватории Оманского залива, на настоящий момент нет – данный район помимо нефтегазоносности интересует ученых в первую очередь из-за сейсмической активности и увеличения зоны распространения вод, обедненных кислородом. В связи с этим основной целью этой работы является оценка современного нефтяного загрязнения акватории Оманского залива.

Основные задачи работы – обнаружение пятен антропогенного происхождения и выделение основных районов их распространения, а также идентификация естественных нефтепроявлений на шельфе Оманского залива.

### Материалы и методы

Основным источником данных для работы стали РЛИ европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B, чьи изображения на район интереса были получены в период с января 2017 по апрель 2020 гг. и размещены на портале ГК «СКАНЭКС» «Космоснимки». В качестве дополнительных примеров верификации ряда источников загрязнения привлекались оптические снимки спутников Sentinel-2A и Sentinel-2B.

Из более чем 700 проанализированных РЛИ на акваторию Оманского залива пятна загрязнений были обнаружены на 304 РЛИ, главным образом нефти и нефтепродуктов – другие источники загрязнения (аквакультура, канализационные выпуски и т.д.) не являлись задачей мониторинга. Наблюдаемость и возможность различения снимков (областей выглаживания морской поверхности пленками нефти) того или иного происхождения во многом зависит от условий окружающей среды, в частности от гидрометеорологических условий (ГМУ) – в общем случае ветра, волнения и течений, которые влияют на отображение морской поверхности в данных космической радиолокации. Одним из важнейших факторов ГМУ является скорость ветра – нефтяные пленки различимы на РЛИ в довольно узком диапазоне скоростей ветра от 2–3 до 8–10 м/с (Ivanov et al., 1998).

Помимо очевидного загрязнения вод, пленки нефти и нефтепродуктов влияют на количество поступающей солнечной радиации, на волнообразование, перенос веществ в системе «океан–атмосфера» и т. п. процессы. Распространение нефти и нефтепродуктов на поверхности моря происходит под влиянием гравитации, ветра и течений за счет растекания, адвекции и дрейфа. Так, сырая нефть дрейфует со скоростью течений, но на ее распространение также оказывает влияние ветер (см., например, Герлах (1985)).

Нефтяные загрязнения выглаживают мелкомасштабное ветровое волнение, благодаря чему становятся видимыми на РЛИ – выглаженная поверхность воды

рассеивает электромагнитные волны, падающие на нее, в сторону от источника излучения (антенны РСА). Отразившись от выглаженной нефтью или нефтепродуктами морской поверхности, радиоволны не возвращаются к антенне радиолокатора, в связи с чем область выглаживания пленкой мелкомасштабного волнения (или слик) отображается на РЛИ темным тоном (см., например, Иванов, 2007).

Анализ РЛИ после их стандартной обработки проводился путем визуальной интерпретации темных пятен (сликов) с учетом окружающей судовой обстановки на момент съемки и присутствия областей выглаживания иной природы (ветровой или биогенной) (Иванов, 2007). Процедура идентификации обнаруженных пятен состоит из последовательных этапов, в ходе которых делается акцент на визуальных/расчетных особенностях слика, отображенного на РЛИ, в частности на форме, размерах, контрасте, типе края и контекстном окружении (см. Иванов, 2007 и цитированную в ней литературу).

Для выявления источников загрязнения применялся геоинформационный подход, основанный на использовании географических информационных систем (ГИС), или ГИС-подход, предложенный и поэтапно описанный Ивановым и Затягаловой (2007). Данный метод хорошо зарекомендовал себя для решения подобных задач в российских морях, в частности, Баренцевом (Ivanov et al., 2018, 2022), Черном и Каспийском морях (Иванов и др., 2017; Клименко и др., 2022) и Персидском заливе (Иванов и др., 2018). Его суть заключается в том, что для полноценного анализа РЛИ в специализированной ГИС, помимо данных об обнаруженных нефтяных пятнах необходимо собрать абсолютно всю доступную и необходимую информацию о водном бассейне, включая данные о морском НГК, судоходстве и нефтегазоносности. В итоге, источники нефтяных загрязнений в такой ГИС выявляются практически автоматически, благодаря пространственно-временной группировке пятен загрязнений вблизи того или иного источника.

На заключительном этапе обнаруженные слики в виде векторных слоев с необходимой атрибутивной информацией собирались и объединялись на специально созданном портале под управлением веб-ГИС приложения «Геомиксер» (<http://geomixer.ru>), разработанного ГК «СКАНЭКС» для анализа геопространственных данных. С помощью этого приложения, его инструментов и интегрированных ресурсов (в том числе цифровых навигационных карт и данных реанализа GFS NOAA) были получены все основные результаты данного исследования.

## Результаты

В период с января 2017 г. по апрель 2020 г. на акваторию Оманского залива (см. рисунок 1) было получено 730 РЛИ, на 304 из которых было выявлено 2584 пятна общей площадью около 4971.7 км<sup>2</sup> (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики обнаруженных в Оманском заливе нефтяных загрязнений за исследуемый период (01.01.2017–30.04.2020), обобщенные по месяцам

Месяц	2017				2018			
	Кол-во дней съемки	Кол-во РЛИ со сликками	Кол-во сликков	Площадь сликков, км <sup>2</sup>	Кол-во дней съемки	Кол-во РЛИ со сликками	Кол-во сликков	Площадь сликков, км <sup>2</sup>
январь	9	3	36	24.7	16	6	15	24.6
февраль	12	6	69	71.4	13	8	21	29.7
март	17	10	93	105.9	16	8	28	58.7
апрель	17	6	46	64.6	21	15	93	82.6
май	16	10	136	112.7	20	8	60	70.6
июнь	16	9	124	173	19	12	77	91.9
июль	16	9	116	231.3	19	11	71	132.9
август	15	12	128	118.4	20	9	84	212.7
сентябрь	14	11	110	315	21	13	114	220.9
октябрь	15	8	108	81	19	9	66	94.8
ноябрь	14	8	98	102.5	18	2	10	3.9
декабрь	15	8	66	83.8	20	6	31	22.4
<b>Итого</b>	<b>176</b>	<b>100</b>	<b>1130</b>	<b>1484.3</b>	<b>222</b>	<b>107</b>	<b>670</b>	<b>1045.7</b>
Месяц	2019				2020			
	Кол-во дней съемки	Кол-во РЛИ со сликками	Кол-во сликков	Площадь сликков, км <sup>2</sup>	Кол-во дней съемки	Кол-во РЛИ со сликками	Кол-во сликков	Площадь сликков, км <sup>2</sup>
январь	20	5	51	185.8	20	4	15	14.9
февраль	15	3	39	55.4	19	4	37	31
март	22	6	27	113.6	21	5	25	10.6
апрель	20	6	26	55.6	19	3	22	38
май	26	10	86	435				
июнь	22	8	35	89.3				
июль	21	6	52	174.8				
август	21	9	89	212.6				
сентябрь	22	8	129	400				
октябрь	22	9	57	177				
ноябрь	22	6	50	258.6				
декабрь	20	5	44	189.5				
<b>Итого:</b>	<b>253</b>	<b>81</b>	<b>685</b>	<b>2347.2</b>	<b>79</b>	<b>16</b>	<b>99</b>	<b>94.5</b>
<b>Всего:</b>						<b>304</b>	<b>2584</b>	<b>4971.7</b>

Из таблицы 1 видно, что количество пятен и их общая площадь варьируют от года к году, причинами чего являются ГМУ окружающей среды во время получения изображений и частота фактической спутниковой съемки основной части акватории – в среднем временной интервал между съемками Оманского залива составлял 2–4 дня.

Одна из тенденций состоит в том, что большее количество slicks наблюдается в летне-осенний период, когда преобладает летний муссон, нет сложных ГМУ (сочетания ветра и волнения), а скорость ветра в среднем не превышает 8–10 м/с (что подтвердилось метеоданными GFS NOAA за исследуемый период (Global Forecast System, 2022)). В позднее осеннее и зимнее время ветровые условия часто неблагоприятны для наблюдения пятен на РЛИ (Егорин, 2015).

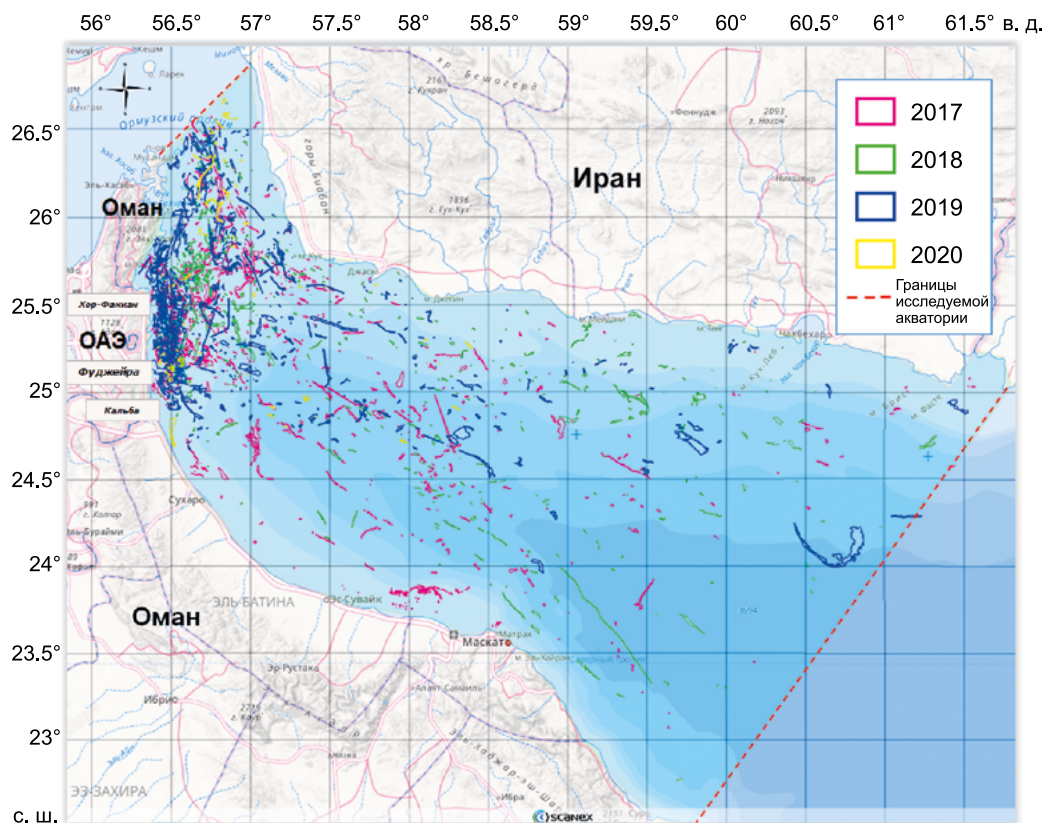


Рис. 1 – Карта-схема Оманского залива с обнаруженными нефтяными загрязнениями по данным радиолокационного мониторинга в период с 01.01.2017 по 30.04.2020 гг.

### *Разливы антропогенного происхождения*

Анализ полученного материала показал, что судовые разливы, имеющие линейную форму, ожидаемо преобладали среди общего количества обнаруженных пятен (рисунок 1). Они были приурочены к основным (международным) и второстепенным (каботажным) судоходным трассам, проходящим через залив, особенно в Ормузском проливе, а также к расположенным на западном побережье залива рейдам крупных портов ОАЭ, а именно: Фуджейра, Кальба, Хор-Факкан и др. На рисунке 2 показана карта интенсивности судоходства в Оманском заливе в 2018 и 2019 гг. по данным веб-сервиса [Marinetraffic.com](http://Marinetraffic.com), из которой видно, что интенсивность судоходства максимальна в водах ОАЭ, на подходах к портам ОАЭ, а также в Ормузском проливе.

Значительно меньшее количество нефтяных загрязнений обнаружено у берегов Омана, что, очевидно, объясняется тем, что в его морских портах, кроме столицы

Маската, отсутствуют крупные нефтяные терминалы, в отличие от портов эмиратов Фуджейра и Шарджа, входящих в ОАЭ.

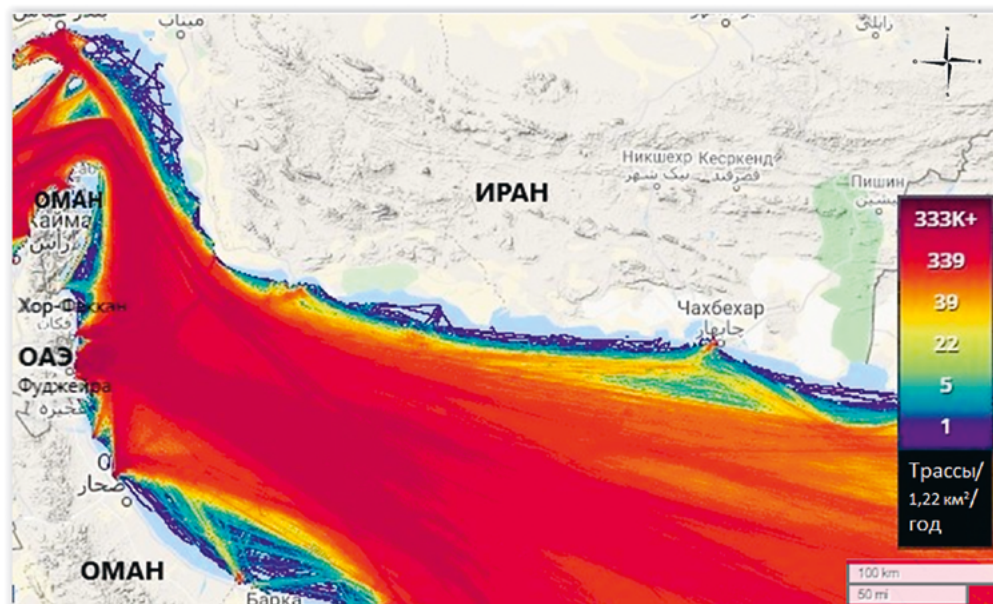


Рис. 2 – Интенсивность судоходства (показана цветами от синего – менее интенсивного, до темно-красного – более интенсивного) в Оманском заливе и прилегающих акваториях в 2018 и 2019 гг. (по данным интернет-сервиса Marinetraffic, 2022)

На антропогенное, а точнее судовое, происхождение данных разливов указывают геометрические характеристики этих пятен и непосредственная близость судов или судоходных трасс. Судовые разливы обычно характеризуются вытянутой (линейной) формой, которая объясняется тем, что во время движения с судов часто сбрасываются нефтесодержащие воды, из-за чего за судном на РЛИ появляется темная полоса (рисунок 3а).

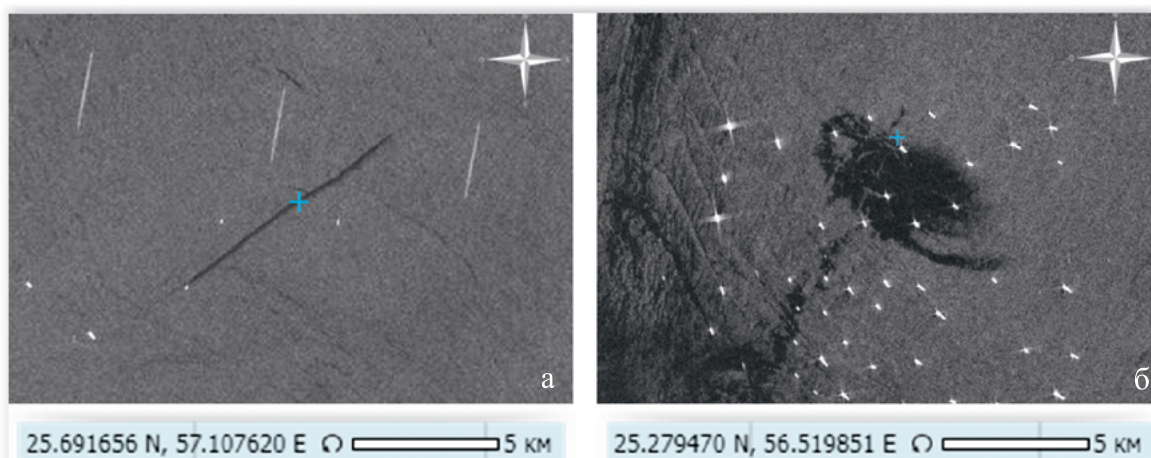


Рис. 3 – Примеры судовых разливов с координатами их центров в Оманском заливе: **а** – за движущимся судном на РЛИ Sentinel-1A от 11.08.2019, 02:07 UTC; **б** – среди судов на рейде порта Фуджейра на РЛИ Sentinel-1A от 20.07.2018, 14:16 UTC.

© Copernicus Sentinel data 2019

Нередко судовые разливы имеют другую форму, но их происхождение, тем не менее, обусловлено контекстным окружением (или наличием техногенных объектов поблизости). Во-первых, при идентификации следует учитывать время жизни разлива (при наличии повторных съемок или данных автоматических систем идентификации судов – АИС) – со временем пятно теряет линейную форму, целостность, четкость границ и контраст из-за влияния ветра, волнения и течений, на что также влияют и физико-химические свойства нефтепродукта. Во-вторых, даже если разлив привязан к рейдовой стоянке или судовой трассе, но не к конкретному судну, его также можно отнести к судовым (рисунок 3б).

Судовые сбросы и разливы – явление в общем случае эпизодическое, редко постоянно случающееся в одном и том же месте несколько раз подряд, в отличие от выбросов стационарных объектов на дне: затонувших судов, скважин, выпусков канализации, нефтепроводов, грифонов/сипов и т. п.

Анализируя данные таблицы 1, можно отметить максимальное количество и общую площадь загрязнений в 2019 г. – синий цвет на рисунке 1. Наибольшее скопление пятен загрязнений наблюдается на акватории рейдовых стоянок порта Фуджейра, который является крупнейшим в Оманском заливе (рисунок 4). Это подтверждает в том числе и статистка грузооборота порта: доля судов, перевозящих нефть и нефтепродукты, составляет более 70 % от общего числа заходящих в порт судов, а их количество превышает 150 судов в день (Marinetraffic, 2022). По данным официального сайта порта Фуджейра (Port of Fujairah, 2022), количество судов, пришедших на морскую якорную стоянку, составило 14 774 за последние 12 месяцев, а общий объем грузооборота достиг почти 124 млн. т.

В общем случае, основные причины появления судовых разливов известны – это сброс промысловых, балластных и льяльных вод, отработки остатков топлива и ГСМ вне территориальных вод, а также аварийные разливы в портах и нелегальные сбросы на удаленных рейдовых стоянках (Терлеева, Иванов, 2017). Причем наибольшее скопление пятен здесь неудивительно – чем больше потенциальных источников загрязнения, тем больше вероятность появления разливов. Следует заметить, что якорные стоянки находятся в территориальных водах ОАЭ, где, согласно конвенции МАРПОЛ (МАРПОЛ, 2008), сброс нефтесодержащих отходов с судов запрещен.

Нефтеразазоры, отобразившиеся на оптических снимках, примеры которых даны в работе в основном для верификации обнаруженных источников, выявления новых в узкой прибрежной полосе (например, обусловленных аквакультурой – рисунок 6б) или анализа отдельных разливов, не отобразившихся на РЛИ, наблюдались в виде темных, радужных или серебристо-серых пленок (в зависимости от геометрии съемки, освещения и толщины пленки) (рисунок 6). Их независимый анализ подтвердил, что источниками нефтяных загрязнений в прибрежной полосе являются: нефтяные терминалы в порту Фуджейра, якорные стоянки портов Хор-Факкан, Кальба и др. объекты, выходы канализационных систем. Нефтяных загрязнений в водах Ирана и Южного Омана оказалось мало – незначительная



интенсивность судоходства в водах Ирана и Омана (рисунок 2) коррелирует с небольшим количеством обнаруженных там пятен.

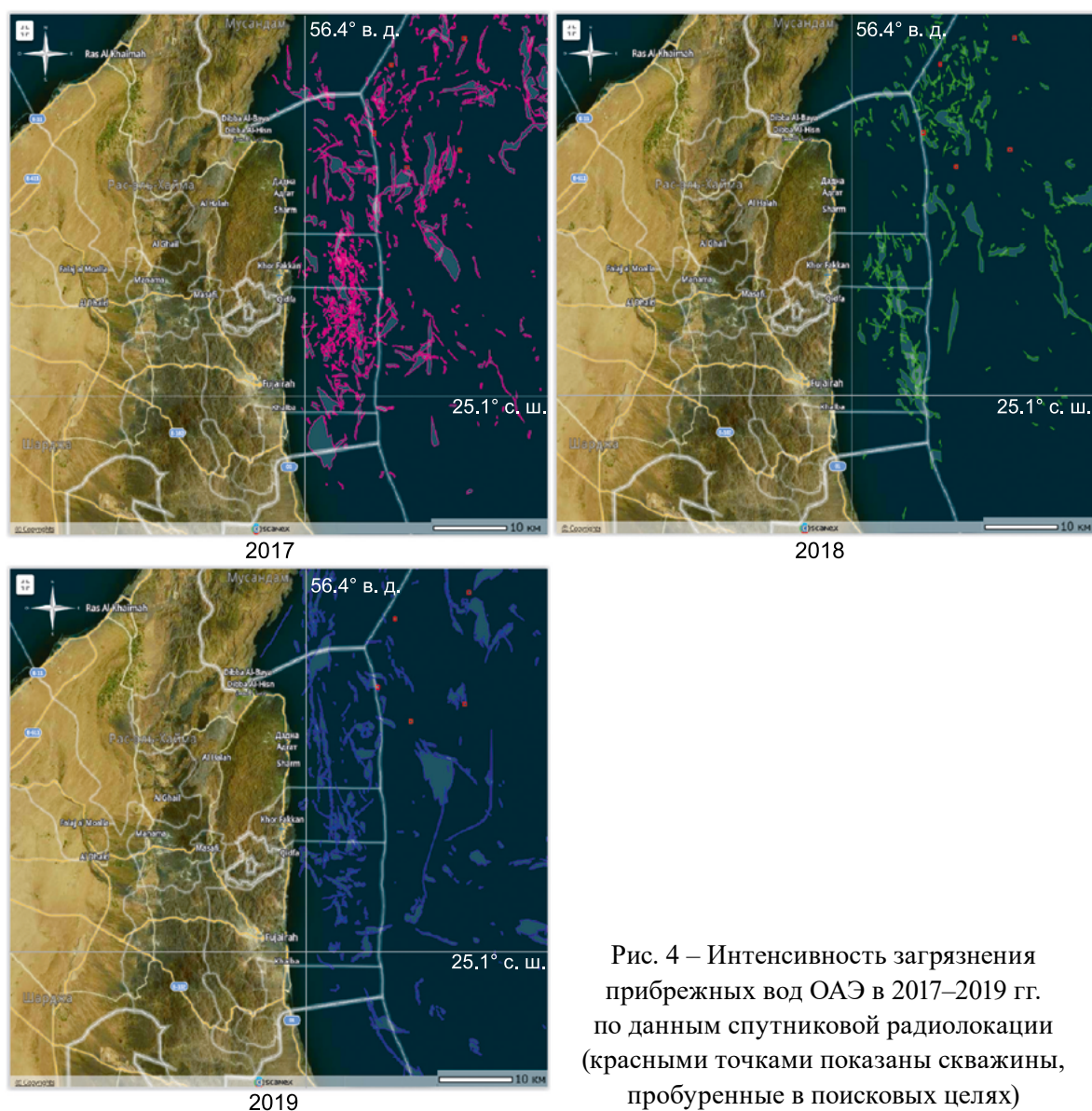


Рис. 4 – Интенсивность загрязнения прибрежных вод ОАЭ в 2017–2019 гг. по данным спутниковой радиолокации (красными точками показаны скважины, пробуренные в поисковых целях)

В итоге, основная концентрация пятен нефтяных загрязнений была сосредоточена в территориальных водах ОАЭ – на их долю приходится порядка 48 % от общего числа обнаруженных загрязнений (рисунок 5). Около 41 % загрязнений находятся вне территориальных вод залива, включая акваторию Ормузского пролива. В северном и южном секторах вод Омана сосредоточено 5 % и 3 % соответственно, тогда как на территориальные воды Ирана приходится не более 3 %.

В целом площадь обнаруженных за время мониторинга пятен варьировала от 0.5 до 140 км<sup>2</sup> (наибольшая в районе судоходных трасс), максимальная длина разливов – 29–30 км.



Рис. 5 – Загрязненность нефтью и нефтепродуктами ключевых акваторий Оманского залива, выявленная в результате мониторинга

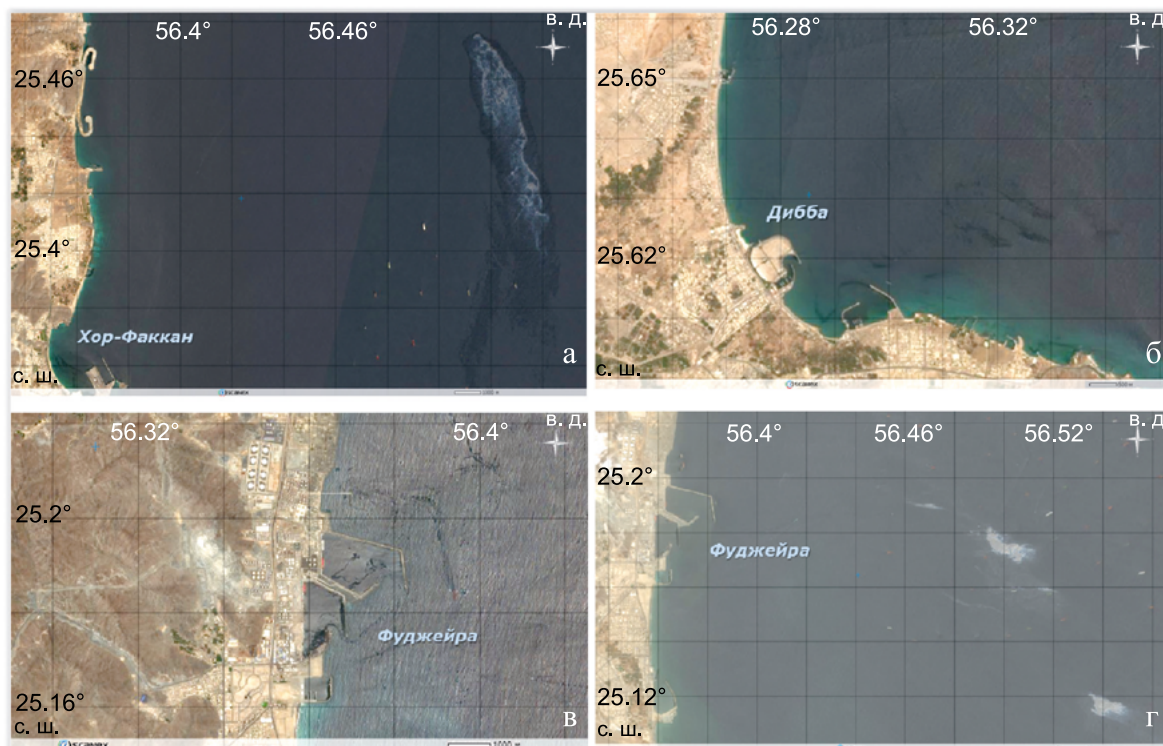


Рис. 6 – Пленочные и нефтяные загрязнения в прибрежной зоне залива, у побережья ОАЭ на оптических снимках Sentinel-2A/2B: **а** – нефтеразлив в районе якорной стоянки порта Хор-Факкан (27.08.2019 06:46 UTC); **б** – в месте разведения аквакультуры в территориальных водах ОАЭ к востоку от г. Дибба (17.08.2019 06:46 UTC); **в** – пленки нефти в гавани порта Фуджейра (18.06.2019 06:46 UTC); **г** – нефтеразливы в районе якорной стоянки порта Фуджейра (08.07.2018 06:46 UTC). © Copernicus Sentinel data 2018/2019

В одном случае разлив превысил верхнюю границу площадного интервала обнаруженных за время мониторинга пятен. Анализ таблицы 1 также позволяет отметить, что в мае 2019 г. был установлен максимум суммарной площади нефтяного загрязнения, который составил 435 км<sup>2</sup> – большая часть пятен была приурочена к району Ормузского пролива и к порту Фуджейра. Но 30.05.2019 в западной части залива, в 120 км от иранского порта Чахбехар, было обнаружено наибольшее за время мониторинга по площади пятно (рисунок 7). Его площадь составила 181.8 км<sup>2</sup>, а близость судов, характер растекания (изменение формы под влиянием ГМУ и фрагментирование), а также отсутствие источников возможных естественных нефтепроявлений, указывают на антропогенное происхождение пятна.

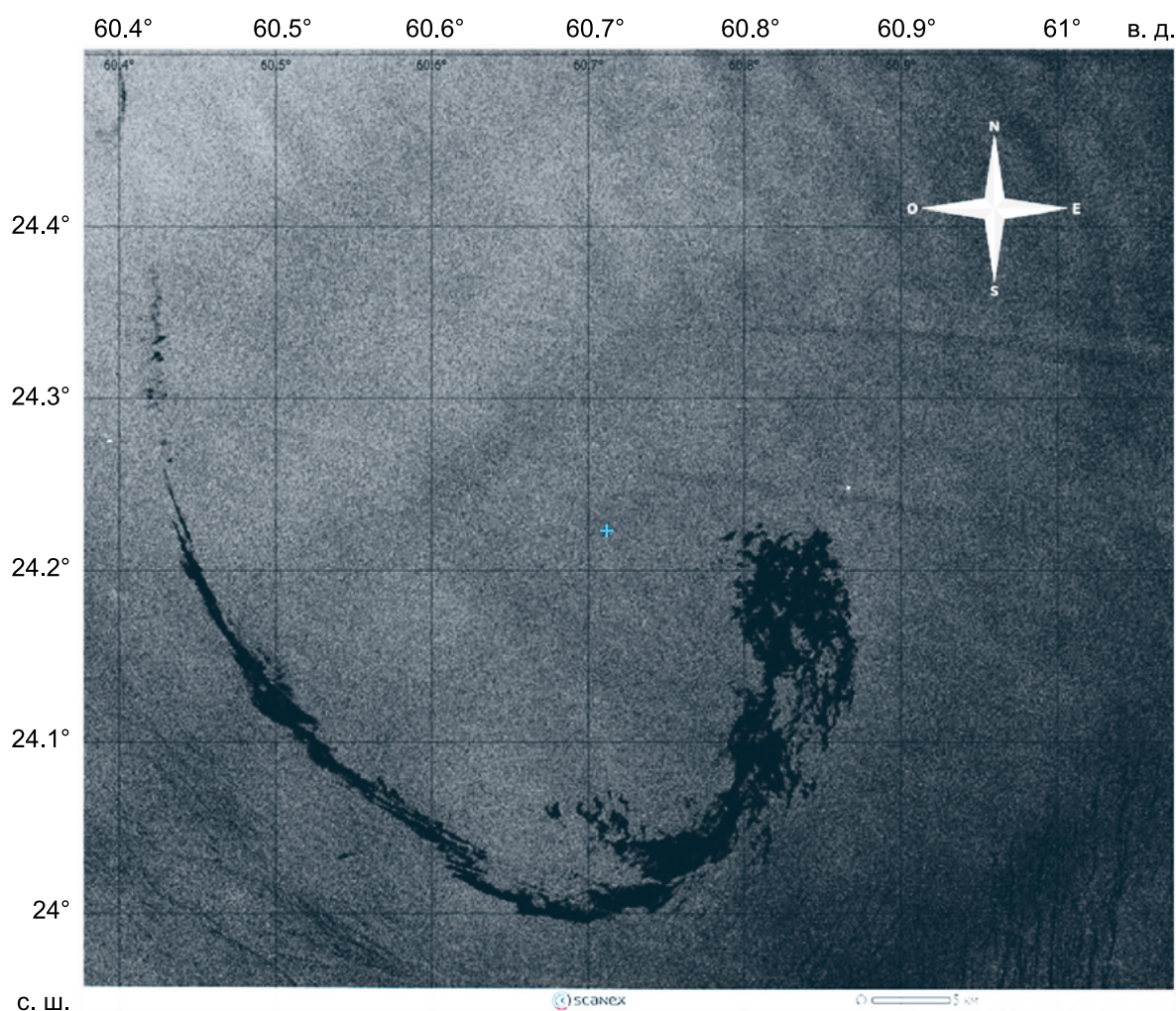


Рис. 7 – Судовой разлив в западной части Оманского залива на РЛИ Sentinel-1A от 30.05.2019, 13:59 UTC. © Copernicus Sentinel data 2019

### *Нефтепроявления естественного происхождения*

В рамках данного исследования решалась задача обнаружения естественных нефтепроявлений у берегов ОАЭ – в их территориальных водах и экономической зоне. Источники естественных нефтепроявлений (грифоны или сипы) являются геологическими объектами, чьи пятна нефти (легкие фракции) на поверхности моря при благоприятных для радиолокационной съемки ГМУ можно наблюдать из космоса. Хорошо известно, что пятна естественных нефтепроявлений на морской поверхности принимают различные формы, имеют разные размеры и направления дрейфа, зависящие от состояния верхнего слоя моря, ветра и течений (Иванов, 2020). Для того, чтобы выявить источник «природного загрязнения», необходимо провести анализ пространственно-временной группировки снимков, обнаруженных по данным космической радиолокации в течение некоторого периода времени (Иванов и др., 2020). Заметим, что подобная методика надежно отработана и показывает отличные результаты. К примеру, про обнаружение новых нефтепроявлений в прикерженской части Черного моря см. работу (Клименко и др., 2022).

Выявление естественных снимков в Оманском заливе осложнялось интенсивным судоходством, из-за которого в водах залива практически ежедневно находятся десятки или даже сотни судов с сопутствующим нефтяным загрязнением, а при различных ГМУ пятна на поверхности моря принимали разные формы, а некоторые из них были приурочены к различным локальным объектам в прибрежной зоне, например, к местам разведения аквакультуры и выбросов сточных вод (см. рисунок 6).

Тем не менее, путем анализа радиолокационных данных удалось наметить акваторию возможного распространения естественных нефтепроявлений. Анализ в ГИС показал, что они могут находиться в северной части Оманского залива, мористее п-ова Мусандам (северная часть Омана), где проходит разлом Дибба (глубины 50–70 м), отделяющий мезозойские карбонаты полуострова от офиолитов Оманских гор (Clift et al., 2002). Согласно (Terken et al., 2001), мезозойские карбонаты, в том числе на территории Омана, обладают нефтегазоносным потенциалом, как, например, карбонатная формация Натих в центральной части Омана, в связи с чем предполагается, что карбонаты Мусандама могут являться природными ловушками нефтеуглеводородов.

В прибрежной зоне Мусандама, в районе разлома, периодически (1–3 раза в месяц), преимущественно в летнее и раннее осеннее время, при скорости ветра не более 6–7 м/с, на РЛИ наблюдались контрастные снимки обычно не характерной для судовых разливов формы и большой площади, как, например, группа пятен на РЛИ от 13.09.2019 на рисунке 8, общей площадью более 100 км<sup>2</sup>; в среднем площадь подобных пятен не превышала 50 км<sup>2</sup>.

Таких снимков за весь период исследования было обнаружено около 100, но все они располагались вдоль разлома Дибба и чуть южнее его, на границе территориальных вод Омана и ОАЭ, вне областей значительной антропогенной нагрузки.

Радужные слики наблюдались в данных районах и на оптических снимках, где отсутствие антропогенной инфраструктуры или проходящих судов указывает на природное происхождение сликов (рисунок 9).

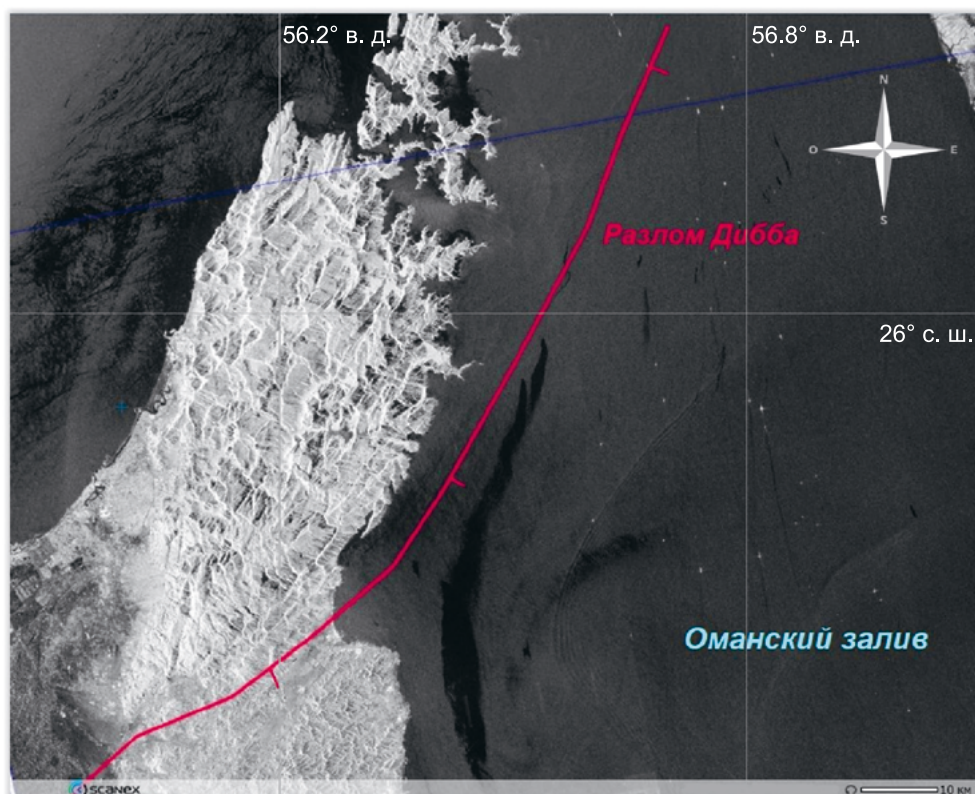


Рис. 8 – Разлом у берегов ОАЭ и Омана (Мусандама) и вероятные нефтепроявления, приуроченные к нему, на РЛИ Sentinel-1A от 13.09.2019, 14:16 UTC.  
© Copernicus Sentinel data 2019

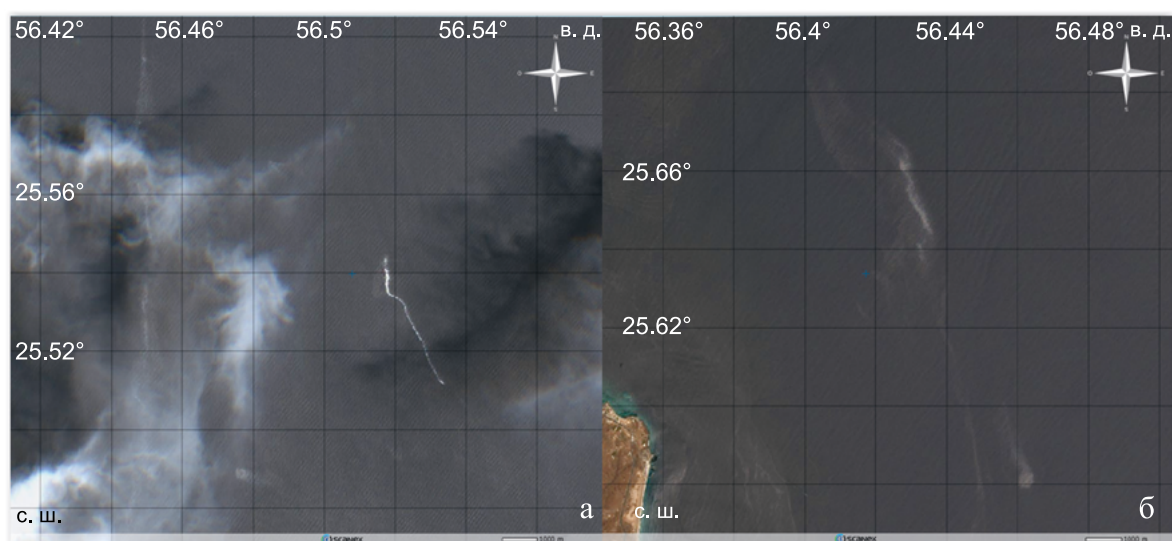


Рис. 9 – Вероятные естественные нефтепроявления на оптических снимках спутника Sentinel-2A/2B: **а** – 19.05.2019, 07:02 UTC; **б** – 08.06.2019, 07:02 UTC.  
© Copernicus Sentinel data 2019

По нашему мнению, они могут образоваться в местах возможных источников естественных нефтепроявлений, что позволяет предположить группу подводных источников на дне и эпизодичность их работы. На основе вышеизложенных соображений, эти пятна предварительно можно отнести к естественным нефтепроявлениям. Но для точного определения необходим дальнейший мониторинг акватории, так как подобные пятна стали появляться относительно недавно – в 2019 г.

В районе Макранского желоба (зоны субдукции), расположенного у северо-восточной окраины Оманского залива (Ninkabou et al., 2021), где в результате осадконакопления могут генерироваться углеводороды (Сорохтин, Ушаков, 2002), нефтепроявления обнаружены не были.

### Выводы и заключение

На основе анализа радиолокационных изображений Оманского залива, полученных в рамках мониторинга, проведенного с января 2017 по апрель 2020 гг., выявлены основные источники нефтяных загрязнений этой акватории. На основе обработки и анализа данных радиолокации были созданы и проанализированы карты пространственно-временного распределения загрязнений, которые позволили сделать выводы об общем текущем уровне загрязнения залива.

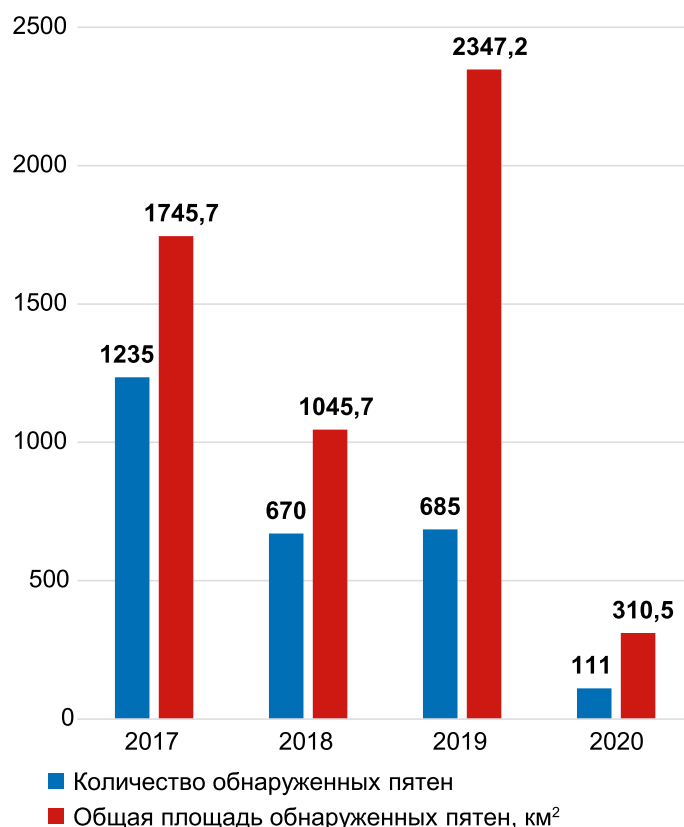


Рис. 10 – Обобщенные результаты радиолокационного мониторинга нефтяных загрязнений Оманского залива в период с января 2017 г. по апрель 2020 г.

На рисунке 10 показано распределение количества обнаруженных пятен и их общей площади. Из рисунка хорошо виден нестационарный характер распределения, что говорит о случайном появлении загрязнений в заливе (в результате нелегальных сбросов или аварий) и их объемов, т. е. происходящих время от времени, однако не исключено влияние факторов среды/ГМУ на обнаруживаемость пятен.

Наиболее благоприятные ГМУ приходятся на летне-осенний период, что подтверждается общей тенденцией площадных максимумов нефтепроявлений на морской поверхности Оманского залива в сентябре. Межгодовую изменчивость можно объяснить как случайным характером разливов, так и частотой съемки и изменчивостью гидрометеорологических условий от года к году. Так, в 2019 г. наблюдался максимум загрязнений, обусловленный разливами большой площади (например, пятном от 30.05.19, чья площадь составила более 180 км<sup>2</sup>).

Доминирующий вид загрязнений Оманского залива – антропогенный, что вызвано интенсивностью судоходства на трассах, следующих в Персидский залив, а также крупнейшим региональным портом с нефтяными терминалами в эмирате Фуджейра, в акватории которого обнаружена наибольшая концентрация пятен. Порт и приуроченные к нему якорные стоянки следует считать одним из основных источников загрязнения Оманского залива.

Показано также, что загрязнение нефтепродуктами северо-западной части Оманского пролива, особенно у побережья ОАЭ, – максимально, основной их источник – интенсивное судоходство, в том числе танкерный флот. Наиболее вероятный тип пленочных судовых загрязнений в открытом море – нелегальные сбросы балластных, промывочных и льяльных вод, отработки и прочих судовых отходов. В итоге, северную часть залива следует считать одной из наиболее загрязненных нефтью и нефтепродуктами акваторий мира.

Естественные нефтепроявления и их источники в рамках данного мониторинга однозначно обнаружены не были, однако специфика геологического строения региона и пятна, обнаруженные вне районов антропогенной нагрузки, могут указывать на нефтегазоносность залива. Так, в северной части залива у побережья Омана (п-ова Мусандам) могут находиться источники естественных нефтепроявлений, но для более однозначных выводов требуются дополнительные исследования, в том числе детальный и продолжительный мониторинг с помощью космической радиолокационной съемки.

Наконец, еще раз показано, что космическая радиолокационная съемка – один из наиболее эффективных методов мониторинга для оценки экологического состояния акваторий с высокой техногенной нагрузкой, какой является Оманский залив. С его помощью можно не только оперативно наблюдать за появившимися загрязнениями и определять источники их возникновения, но и получать информацию об общем текущем состоянии загрязнения залива, в том числе используя архивные радиолокационные данные.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования России (тема № FMWE-2021-0001). Права копирайта на оригинальные данные спутников Sentinel-1 и Sentinel-2 принадлежат Европейскому космическому агентству (ESA). Авторы благодарят руководство ГК «СКАНЭКС» ([www.scanex.ru](http://www.scanex.ru)) за возможность использования ресурсов геопорталов, созданных на базе веб-ГИС приложения «Геомиксер».

### Список литературы

1. Герлах С. А. Загрязнение морей. Диагноз и терапия. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 263 с.
2. Егорин А. З. Объединенные Арабские Эмираты: география, история, население. Учебное пособие. Казань, 2015. 108 с.
3. Иванов А. Ю. Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
4. Иванов А. Ю., Затягалова В. В. Картографирование пленочных загрязнений моря с использованием космической радиолокации и географических информационных систем // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 46–63.
5. Иванов А. Ю., Кучейко А. А., Филимонова Н. А., Кучейко А. Ю., Евтушенко Н. В., Ускова А. А., Терлеева Н. В. Пространственно-временное распределение пленочных загрязнений в Черном и Каспийском морях по данным космической радиолокации: сравнительный анализ // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 2. С. 13–25.
6. Иванов А. Ю., Терлеева Н. В., Евтушенко Н. В., Евтушенко В. М. Спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений Персидского залива // Земля из космоса. 2018. № 10 (26). С. 48–53.
7. Иванов А. Ю., Матросова Е. Р., Кучейко А. Ю., Филимонова Н. А., Евтушенко Н. В., Терлеева Н. В., Либина Н. В. Поиск и обнаружение естественных нефтепроявлений в морях России по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5. С. 43–62.
8. Клименко С. К., Иванов А. Ю., Терлеева Н. В. Пленочные загрязнения Керченского пролива по данным пятилетнего радиолокационного мониторинга: современное состояние и основные источники // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 3. С. 37–54.
9. МАРПОЛ, 2008. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ-73/78). Кн. I и II. СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2008.
10. Нельсон-Смит А. Нефть и экология моря. М.: Прогресс, 1977. 302 с.
11. Патин С. А. Нефть и экология континентального шельфа: В 2-х т. 2-е изд. М.: ВНИРО, 2017.
12. Сорохтин О. Г., Ушаков С. А. Развитие Земли. М.: Изд-во МГУ, 2002. 506 с.
13. Терлеева Н. В., Иванов А. Ю. Жидкие судовые грузы и отходы, причины появления судовых разливов в море и проблемы их дистанционного зондирования // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 8. С. 13–19.
14. Clift P. D., Kroon D., Craig J., Gaedicke C. The tectonic and climatic evolution of the Arabian Sea Region. The Geological Society. London, 2002. 534 p.
15. Fujairah, Marinetraffic, 2022: Интернет-ресурс: <https://www.marinetraffic.com/ru/ais/details/ports/790?name=FUJAIRAH&country=United-Arab-Emirates>.
16. Global Forecast System (GFS) NOAA. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>.



17. Hooglund E., Toth A. United Arab Emirates: Geography. In: Persian Gulf States: Country Studies. Washington DC, 1994. P. 204–208.
18. Ivanov A. Yu., Litovchenko K. Ts., Ermakov S. A. Oil spill detection in the sea using Almaz-1 SAR // J. Advanced Marine Sci. & Technol. Soc. 1998. Vol. 4. No. 2. P. 281–288.
19. Ivanov A. Yu., Filimonova N. A., Kucheiko A. Yu., Evtushenko N. V., Terleeva N. V. Oil spills in the Barents Sea based on satellite monitoring using SAR: spatial distribution and main sources // Int. J. Remote Sens. 2018. Vol. 39. No. 13. P. 4484–4498 (<https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1371869>).
20. Ivanov A. Yu., Kucheiko A. Yu., Ivonin D. V., Filimonova N. A., Terleeva N. V., Evtushenko N. V. Oil spills in the Barents Sea: Results from multiyear monitoring with SAR // Marine Pollution Bulletin. 2022. Vol. 179. Pub. 113677.
21. Issa S. Monitoring oil spills offshore the United Arab Emirates using multi satellite data // International Journal of Geographical Information System Applications and Remote Sensing. 2010. Vol. 1. No. 1. P. 1–20.
22. Ninkabou D., Agard P., Nielsen C., Smit J., Gorini C., Rodriguez M., Haq B., Chamot-Rooke N., Weidle C., Ducassou C. Structure of the offshore obducted Oman margin: Emplacement of Semail ophiolite and role of tectonic inheritance // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2021. Vol. 126. Iss. 2. Article id. e0187.
23. Port of Fujairah. 2022. Интернет-ресурс: <https://fujairahport.ae/port-overview/facts-figures/>.
24. Terken J. M. J., Frewin N. L., Indrelin S. L. Petroleum systems of Oman: Charge timing and risks // Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 2001. 85 (10). P. 1817–1845.

Статья поступила в редакцию 10.11.2022, одобрена к печати 12.03.2023.

**Для цитирования:** Клименко С. К., Иванов А. Ю., Евтушенко Н. В. Нефтяное загрязнение Оманского залива по данным радиолокационного мониторинга из космоса // Океанологические исследования. 2023. № 51 (1). С. 114–132. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(1\).6](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).6).

## OIL POLLUTION OF THE GULF OF OMAN BASED ON MONITORING WITH SYNTHETIC APERTURE RADAR

S. K. Klimenko<sup>1</sup>, A. Yu. Ivanov<sup>1</sup>, N. V. Evtushenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,  
e-mail: [klimenko.sk@ocean.ru](mailto:klimenko.sk@ocean.ru)

<sup>2</sup> SCANEX Group,  
bld. 1, Business Park «Rumyantsevo», Rumyantsevo,  
Moscow Region, 142784, Russia

The results of satellite radar monitoring oil pollution in the Gulf of Oman carried out in the period from January 2017 to April 2020 are analyzed. Synthetic aperture radar (SAR) images from the European satellites Sentinel-1A and Sentinel-1B and a geoinformation approach were used for this that makes it possible to fairly unambiguously determine oil spill causes and their sources. During the monitoring 2584 oil spill patches was detected on 730 SAR images whose total area is about 4972 km<sup>2</sup>. It is shown that the main oil spill source in the Gulf of Oman is intensive shipping by sea, including the tanker fleet, and the United Arab Emirates waters and the approaches to the Strait of Hormuz turned out to be the most polluted waters of the gulf.

**Keywords:** Gulf of Oman, SAR images, satellite monitoring, oil spills, oil pollution sources

**Acknowledgement:** The study was carried out within the frameworks of the Ministry of Science and High Education of Russia theme No. FMWE-2021-0001. Data and images from the Sentinel-1 satellites are copyrighted by ESA. The authors thank the SCANEX Group ([www.scanex.ru](http://www.scanex.ru)) for the opportunity to use the geoportals based on the GeoMixer web-GIS application.

## References

1. Clift, P. D., D. Kroon, J. Craig, and C. Gaedicke, 2002: The tectonic and climatic evolution of the Arabian Sea Region. *The Geological Society*, London, 534 p.
2. Egorin, A. Z., 2015: *Ob'edinennye Arabskie Emiraty: geografiya, istoriya, naselenie (United Arab Emirates: geography, history, population)*. Uchebnoe posobie, Kazan, 108 p.
3. *Fujairah, Marinetraffic*, 2022. URL: <https://www.marinetraffic.com/ru/ais/details/ports/790?name=FUJAIRAH&country=United-Arab-Emirates>.
4. Gerlach, S. A., 1981: *Marine Pollution: Diagnosis and Therapy*. Springer Berlin, Berlin, 220 p.
5. *Global Forecast System (GFS) NOAA*. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>.
6. Hooglund, E. and A. Toth, 1994: United Arab Emirates: Geography. *Persian Gulf States: Country Studies*, Washington DC, 204–208.
7. Ivanov, A. Yu., K. Ts. Litovchenko, and S. A. Ermakov, 1998: Oil spill detection in the sea using Almaz-1 SAR. *J. Advanced Marine Sci. & Technol.*, **4** (2), 281–288.
8. Ivanov, A. Yu., 2007: Sliki i plnochnie obrazovaniya na kosmicheskikh radiolokacionnih izobrazeniyah (Slicks and film formations in space radar images). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, **3**, 73–96.
9. Ivanov, A. Yu. and V. V. Zatyagalova, 2007: Kartografirovaniye plnochnykh zagryazneniy morya s ispol'zovaniyem kosmicheskoy radiolokatsii i geograficheskikh informatsionnykh sistem (Mapping oil spills in the marine environment using satellite radar imagery and geographic information system). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, **6**, 46–63.
10. Ivanov, A. Yu., A. A. Kuchejko, N. A. Filimonova, A. Yu. Kuchejko, N. V. Evtushenko, N. V. Terleeva, and A. A. Uskova, 2017: Prostranstvenno-vremennoe raspredelenie plnochnykh zagryaznenij v Chernom i Kaspiskom moryah po dannym kosmicheskoy radiolokacii: sravnitel'nyj analiz (Spatiotemporal distribution of oil pollution in the Black and Caspian Seas according by SAR data: a comparative analysis). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, **2**, 13–25, <https://doi.org/10.7868/S0205961417020038>.
11. Ivanov, A. Yu., N. V. Terleeva, N. V. Evtushenko, and V. M. Evtushenko, 2018: Sputnikovyy monitoring neftyanykh zagryaznenij Persidskogo zaliva (Satellite monitoring of oil pollution in the Persian Gulf). *Zemlya iz kosmosa*, **10** (26), 48–53.
12. Ivanov, A. Yu., N. A. Filimonova, A. Yu. Kucheiko, N. V. Evtushenko, and N. V. Terleeva, 2018: Oil spills in the Barents Sea based on satellite monitoring using SAR: spatial distribution and main sources. *International Journal of Remote Sensing*, **39** (13), 4484–4498, <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1371869>.
13. Ivanov, A. Yu., E. R. Matrosova, A. Yu. Kucheiko, N. A. Filimonova, N. V. Evtushenko, N. V. Terleeva, and N. V. Libina, 2020: Poisk i obnaruzhenie estestvennykh nefteproyavlenij v

- moryah Rossii po dannym kosmicheskoy radiolokacii (Search and detection of natural oil seeps in the Russian seas using spaceborne SAR imagery). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, **5**, 43–62, <https://doi.org/10.31857/S0205961420050061>.
14. Ivanov, A. Yu., A. Yu. Kucheiko, D. V. Ivonin, N. A. Filimonova, N. V. Terleeva, and N. V. Evtushenko, 2022: Oil spills in the Barents Sea: Results from multiyear monitoring with SAR. *Marine Pollution Bulletin*, **179**, 113677.
  15. Issa, S., 201: Monitoring oil spills offshore the United Arab Emirates using multi satellite data. *International Journal of Geographical Information System Applications and Remote Sensing*, **1** (1), 1–20.
  16. Klimenko, S. K., A. Yu. Ivanov, and N. V. Terleeva, 2022: Plenochnye zagryazneniya Kerchenskogo proliva po dannym pyatiletnego radiolokacionnogo monitoringa: sovremennoe sostoyanie i osnovnye istochniki (Oil Pollution of the Kerch Strait Based on Five-Year Monitoring with SAR: Current Status and Main Sources). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, **3**, 37–54, <https://doi.org/10.31857/S0205961422030071>.
  17. MARPOL, 2008: *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78*. Kn. I i II. SPb, ZAO “CNIIMF” (In Russian).
  18. Nelson-Smith, A., 1977: *Oil pollution and marine ecology*. Moscow, Progress, 302 p.
  19. Ninkabou, D., P. Agard., C. Nielsen, J. Smit, C. Gorini, M. Rodriguez, B. Haq, N. Chamot-Rooke, C. Weidle, and C. Ducassou, 2021: Structure of the offshore obducted Oman margin: Emplacement of Semail ophiolite and role of tectonic inheritance. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **126** (2), e0187. <https://doi.org/10.1029/2020JB020187>.
  20. Patin, S. A., 2017: *Neft' i ekologiya kontinental'nogo shel'fa (Oil and ecology of the continental offshore)*. 2<sup>nd</sup> edition, Moscow, VNIRO.
  21. *Port of Fujairah*, 2022. URL: <https://fujairahport.ae/port-overview/facts-figures/>.
  22. Sorohtin, O. G. and S. A. Ushakov, 2002: *Razvitie Zemli*. Moscow, Izd-vo MGU, 506 p.
  23. Terken, J. M. J., N. L. Frewin, and S. L. Indrelid, 2001: Petroleum systems of Oman: Charge timing and risks. *The AAPG Bulletin*, **85** (10), 1817–1845.
  24. Terleeva, N. V. and A. Yu. Ivanov, 2017: Zhidkie sudovye gruzy i othody, prichiny poyavleniya sudovyh razlivov v more i problemy ih distancionnogo zondirovaniya (Liquid cargo and waste, reasons of ship-made oil spills in the sea and problems of their remote sensing). *Ecology and Industry of Russia*, **21** (8), 13–19.

Submitted 10.11.2022, accepted 12.03.2023.

**For citation:** Klimenko, S. K., A. Yu. Ivanov, and N. V. Evtushenko, 2023: Oil pollution of the Gulf of Oman based on monitoring with synthetic aperture radar. *Journal of Oceanological Research*, **51** (1), 114–132, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(1\).6](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).6).