

УДК 551.465

СОВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ЕСТЕСТВЕННЫХ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА

© 2025 г. С. К. Клименко*, А. Ю. Иванов

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

**e-mail: klimenko.sk@ocean.ru*

Поступила в редакцию 16.09.2024 г.

После доработки 23.10.2024 г.

Принята к публикации 18.12.2024 г.

С использованием радиолокационных данных европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B проведен анализ результатов мониторинга естественных нефтепроявлений Азово-Черноморского бассейна в период с 2020 по 2022 г. С помощью геоинформационного метода были выявлены и подтверждены основные районы выходов нефтяных углеводородов, а также обнаружены новые источники нефтепроявлений. Их верификация проводилась путем анализа всей доступной информации о физико-геолого-географических особенностях акваторий, а также с помощью подспутниковых измерений и альтернативных дистанционных методов. Это позволило обнаружить и подтвердить 28 источников в Черном море и один в Азовском море.

Ключевые слова: Черное море, Азовское море, естественные нефтепроявления, нефтяные пленки, космическая радиолокация, геоинформационный подход

DOI: 10.31857/S0030157425030022, **EDN:** GVCSEX

ВВЕДЕНИЕ

Черное море обладает значительными запасами углеводородов (УВ), что подтверждается открытием множества газовых, газоконденсатных и нефтяных месторождений [4, 16, 25, 29, 30]. Выходы УВ встречаются как в шельфовой зоне, так и в глубоководной части моря. Однако в зависимости от геологического строения дна и влияния внешних факторов (например, сейсмичности региона [3]), включая антропогенные воздействия нефтегазового комплекса (НГК) [11], подводные источники могут иметь постоянный, периодический или эпизодический режим высачиваний. Поэтому их обнаружение, а также наблюдение за ними являются актуальными направлениями в геолого-геофизических и океанографических исследованиях.

Естественные нефтепроявления (ЕН) необходимо исследовать по нескольким причинам. Они могут являться: 1) одним из индикаторов нефтегазоносности акватории; 2) индикаторами геолого-геофизических процессов, локально происходящих в недрах морских регионов; 3) источниками не антропогенного, а естественного нефтяного

загрязнения, создающего свой углеводородный фон, который необходимо учитывать в общих оценках загрязнения морей наряду с остальными источниками. По этим причинам ЕН активно изучаются различными методами, в том числе дистанционными, радиолокационными [12, 33, 36, 38, 42]. Вклад ЕН в общее загрязнение Мирового океана оценивается почти в 50% [21, 36], что в настоящее время соизмеримо со вкладом судоходства, нефтедобычи и нефтеперевозок.

Благодаря ЕН был открыт ряд нефтегазовых месторождений, например, в Мексиканском заливе, в водах Азербайджана и в других районах Мирового океана [39, 40, 42]. Эти исследования также необходимы для оценки безопасности сооружений морского НГК [3].

Особенности геологического строения Азовского моря, как и Черного, обуславливают нефтегазоносность его акватории, где обнаружены грязевые вулканы и многочисленные газопроявления (газовые факелы) [24, 27]. Наиболее перспективными зонами для формирования залежей УВ в Черном море являются депрессионные участки из осадочного материала [2], а также

шельфовая зона и континентальный склон [1], в частности, мелководная часть Керченского пролива [4].

Образовавшиеся в продуктивных осадках нефть и газ высачиваются из осадочной толщи, устремляясь через водную толщу к поверхности моря [3]. В таких местах на дне часто имеются эруптивные структуры: грязевые вулканы, вторичные геологические образования — грифоны и сальзы, а также нефтегазовые сипы. Газ, достигнув морской поверхности, уходит в атмосферу, а нефть растекается на поверхности, формируя пленки, которые можно наблюдать в виде пятен и идентифицировать из космоса. Поэтому космические данные широко используются для изучения явлений на поверхности океана (см., например, [3, 5, 10, 15 и т. д.]). Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) крайне эффективны для оперативного наблюдения и мониторинга пленочных загрязнений различной природы, в частности, пятен нефти и естественных нефтепроявлений [3, 33]. Космическая радиолокационная (РЛ) съемка обеспечивает регулярность получения данных на обширных акваториях независимо от условий освещения и облачности, а в рамках мониторинга дает возможность проведения ретроспективного анализа архивных радиолокационных изображений (РЛИ) [12]. Метод анализа и интерпретации РЛИ в комплексе с геоинформационным (ГИС) подходом [9] был успешно использован для исследования многих ЕН в различных частях Мирового океана, как за рубежом [33, 38, 44], так и в Российской Федерации [8–12], в том числе и в Черном море [5, 19, 20].

В 2020–2022 гг. был проведен анализ доступных РЛ-данных, покрывающих Черное и Азовское моря, для актуализации известных нефтепроявлений, а также обнаружения новых природных источников и их верификации с помощью спутниковых и подспутниковых наблюдений и измерений. Целью данной работы является описание современной географии распространения ЕН Черного моря и частично Азовского моря с выявлением новых источников по данным космической радиолокации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Нефтяная пленка выглаживает мелкоштатное ветровое волнение на морской поверхности, образуя область пониженного рассеяния и отображаясь на радиолокационных изобра-

жениях темным цветом [3, 31]. Благодаря такой особенности отображения, основным источником данных для обнаружения и идентификации естественных нефтепроявлений стали РЛИ европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B, полученные в режиме IW (Interferometric Wide) с вертикальной поляризацией радиолокационного сигнала, полосой обзора 250 м и стандартным разрешением 10 м. Для поиска пятен ЕН в рамках исследования использовались РЛИ, покрывающие Азово-Черноморский бассейн в период с января 2020 по декабрь 2022 г.

Анализ РЛИ осуществлялся с помощью визуального изучения снимков на морской поверхности и заключался в экспертном выделении областей РЛИ, соответствующих по совокупности признаков пятнам ЕН. Эти признаки обусловлены особенностями формирования и динамики пятен, главным образом легких фракций нефти, на морской поверхности и, соответственно, особенностями их отображения на РЛИ [8, 31, 32]. В случае исследуемых пятен основными признаками для визуального метода являются размеры, соотношение длины к ширине, тон (яркость), резкость края и контраст на фоне окружающей поверхности моря. При идентификации и анализе обнаруженных снимков обязательно учитывались гидрометеорологические условия (ГМУ) — ветер и волнение во время съемки, оперативные данные о которых были доступны на специально созданном геоинформационном портале.

Для дальнейшего анализа обнаруженных пятен использовался ГИС-подход [9]. Суть метода заключается в обнаружении (и накоплении в ГИС) как можно большего количества пятен для каждого источника. Кроме того, учитывались различные океанографические, гидрометеорологические, геофизические и другие факторы (в частности, батиметрия, скорость и направление ветра), необходимые для идентификации обнаруженных снимков.

В случае ЕН необходим не только продолжительный мониторинг для их обнаружения — дополнительный анализ архивных радиолокационных данных, но и базовые знания о геологическом строении исследуемой акватории: информация о нефтегазовых бассейнах, распространении грязевых вулканов или иных эруптивных донных структур на основе экспедиционных исследований и сейсморазведки (например, по данным [1, 2, 4]). Благодаря естественному высачиванию нефти на морской поверхности образуются группы пятен, тяготеющих к одному и тому же

подводному источнику (грифону, сипу и т.д.). Поэтому пространственно-временная группировка сликов, обнаруженная около одной точки на серии последовательно полученных РЛИ, при отсутствии стационарных антропогенных источников на дне (например, затонувших судов, заглушенных скважин, поврежденных трубопроводов, канализационных выпусков), указывает на природное происхождение данных пятен [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Керченское предпроливье. Во время РЛ-мониторинга нефтяных загрязнений Керченского предпроливья 2017–2021 гг. на шельфе Черного моря впервые были обнаружены три источника ЕН [15], чьи пятна образовывали на поверхности характерные веерные структуры, формируемые сликами, которые в зависимости от течений и ветра дрейфовали в разные стороны (рис. 1).

Слики расположены около точек с координатами $44^{\circ}56'19''$ с. ш. и $36^{\circ}46'03''$ в. д. (источник 1), $45^{\circ}02'08''$ с. ш. и $36^{\circ}57'28''$ в. д. (источник 2) и $45^{\circ}03'34''$ с. ш. и $36^{\circ}34'25''$ в. д. (источник 3) на

глубинах 32, 18 и 19 м соответственно. Обнаруженные группы пятен находятся в границах Керченско-Таманской грязевулканической области [25, 30] и Таманского нефтегазоносного района, имеющего нефтегазоносный потенциал [2, 4], что указывает на природное происхождение обнаруженных пятен.

Их вклад в общее загрязнение акватории, оценки которого были получены в ходе исследования пленочных загрязнений, составил 11.5%. В 2022 г. среди 105 пятен пленочных загрязнений, обнаруженных в Керченском предпроливье, 30 по их характерным признакам были отнесены к ЕН.

В зависимости от погодных условий во время съемки акватории наблюдаемые слики имели различную длину, площадь, форму и контраст. При благоприятных ГМУ – ветре 2–4 м/с, волнении высотой не более 1 м и отсутствии облачности – пятна нефтепроявлений регистрировались как на РЛИ, так и на оптических снимках (рис. 2); максимальная длина пятен нефтепроявлений в подобных условиях достигала 11–12 км, а площадь – порядка 1–2 км².

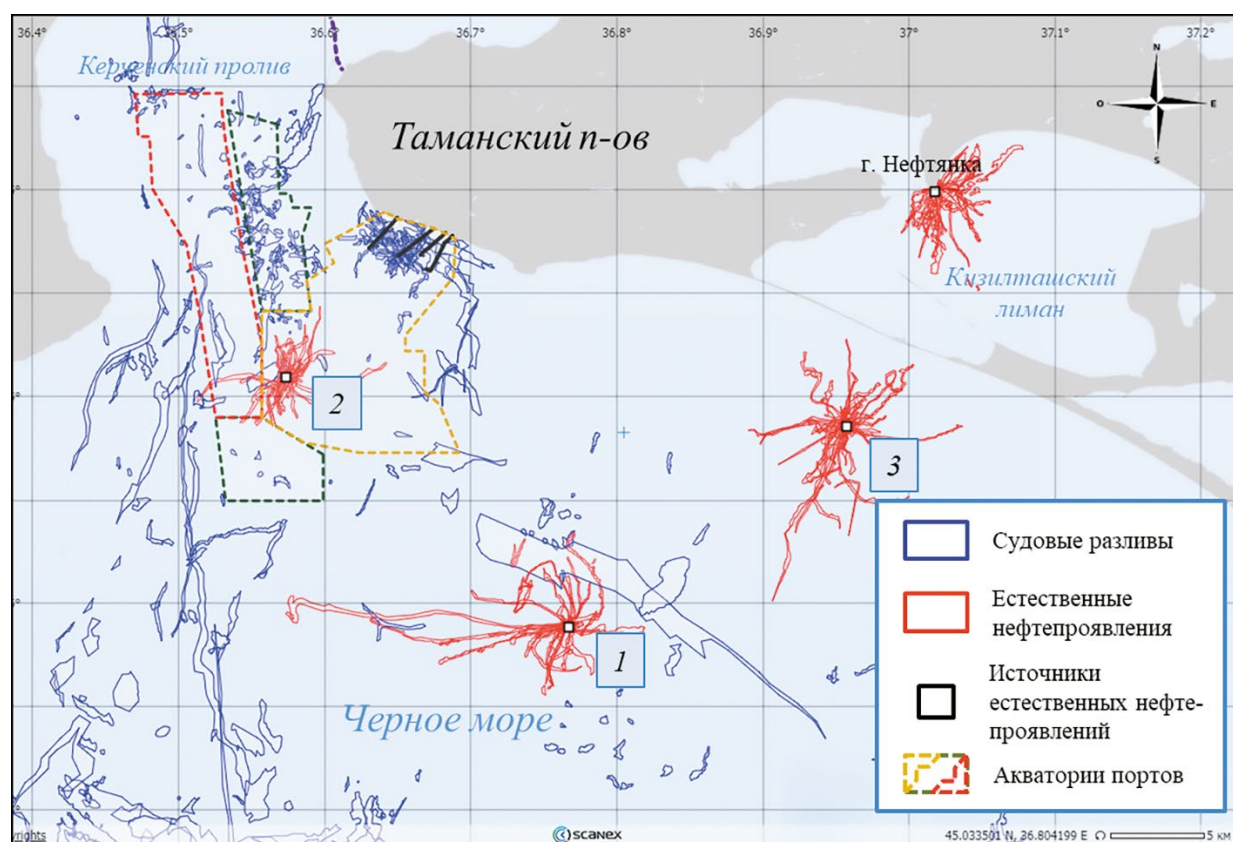


Рис. 1. Сводная карта-схема пятен пленочных загрязнений и нефтепроявлений в Керченском предпроливье и Кизилташском лимане Черного моря, обнаруженных по данным радиолокационного мониторинга 2020–2022 гг.

Установлено, что пятна источника, находящегося в 2.4 км к юго-западу от банки Мария Магдалина и в 5.2 км от Бугазской косы в этой части моря (см. рис. 1, 3), отображаются и на оптических снимках — благодаря дополнительному анализу архивных данных. Впервые нефтепроявление здесь было обнаружено на снимке спутника Landsat-8 от 06.08.2014. Для верификации 05.08.2022 специалистами из ВПК “ЭПРОН” (г. Тольятти, <https://eptron-pro.ru>) были проведены экспедиционные исследования, включающие надводные и подводные визуальные наблюдения, фото- и видеофиксацию, а также отбор проб донных осадков при обнаружении нефтегазопроявлений. В ходе проведения надводного обследования района было установлено наличие на морской поверхности пузырьков газа и маслянистых пятен размером не более 2–3 см², которые расплывались и образовывали тонкие нефтяные пленки на поверхности.

Максимальное газовыделение обнаружено на некотором удалении от дистанционно установленного ЕН. По данным подводных исследова-

ний дна, максимальные выходы газа были обнаружены к северо-востоку, в точке с координатами центра этой области 45°02'12" с.ш. и 36°57'34" в.д. На дне всей исследуемой акватории, чья общая площадь достигала сотен метров квадратных, были обнаружены многочисленные выходы газа разной интенсивности. Анализ проб донного осадка (осадок состоял из ракушечника с небольшой примесью песка) установил очень высокие концентрации углеводородов: 260 мкг/г для алифатических и 110 нг/г для полициклических ароматических углеводородов [14].

Четвертый источник, который можно отнести к ЕН, располагается вблизи Керченского пролива, на восточном крымском шельфе в 13 км от м. Карангат в точке с координатами 44°55'41.3" с.ш., 36°04'05" в.д. (рис. 3). Впервые он был обнаружен во время РЛ-мониторинга акватории Черного моря 2015–2017 гг. [10].

Для анализа периодичности работы данного источника были дополнительно проанализированы РЛИ с 2017 г. Они помогли установить, что его активность не имеет постоянного характера.

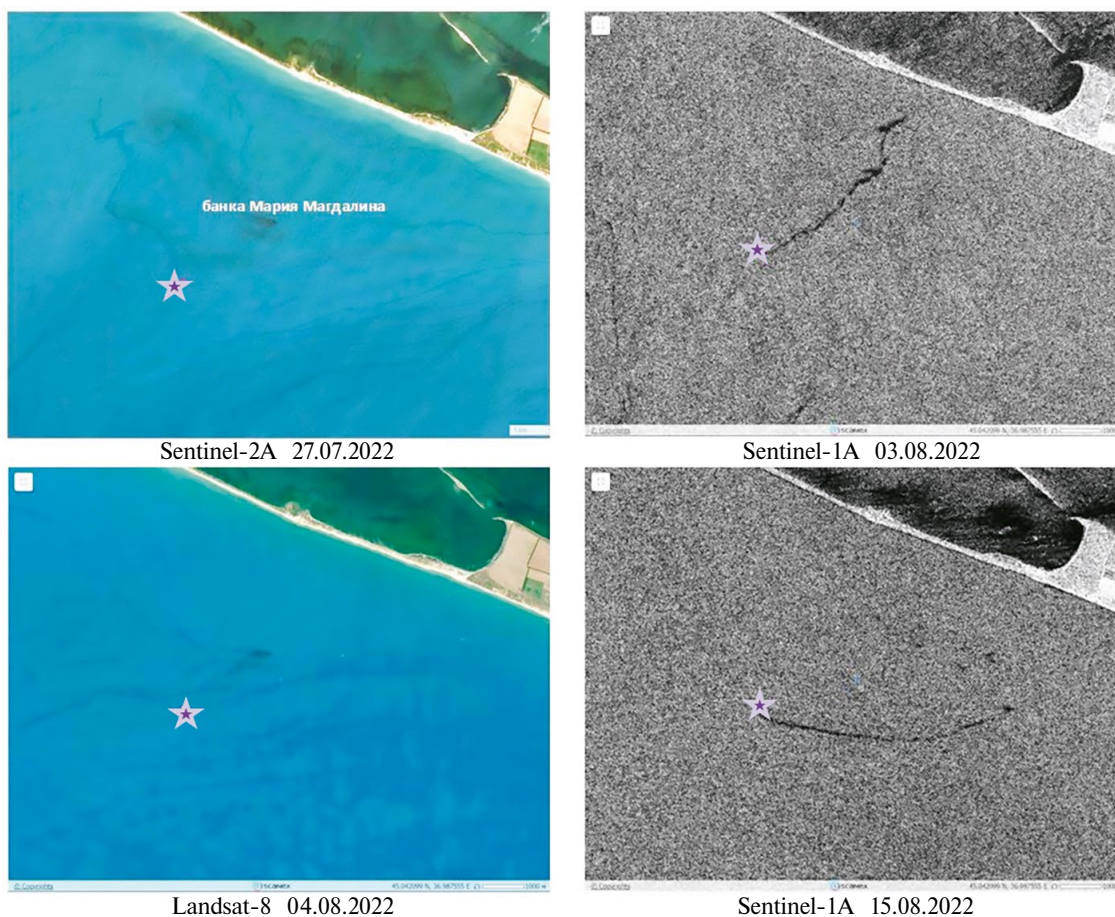


Рис. 2. Нефтепроявления у банки Мария Магдалина на фрагментах оптических снимков (слева) и радиолокационных изображений (справа), полученных в июле–августе 2022 г.; источник показан сиреневой звездочкой. © ESA

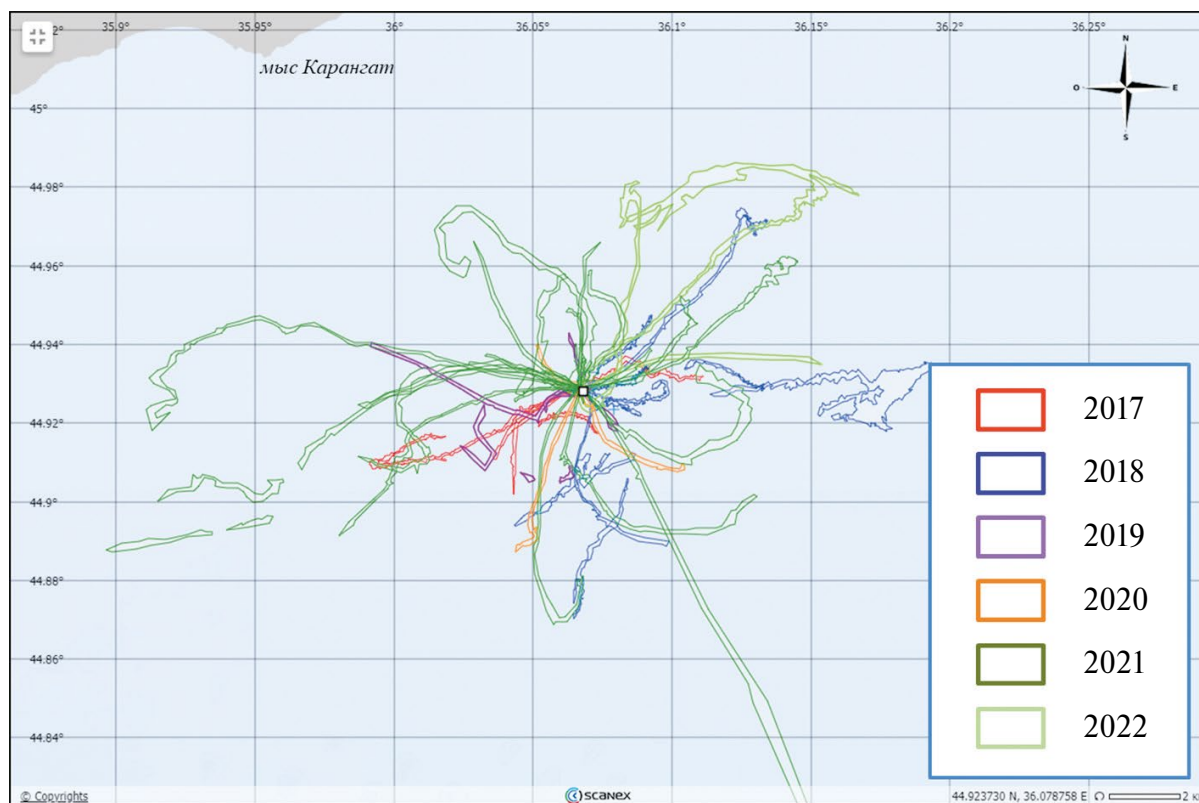


Рис. 3. Пространственно-временная группировка наиболее характерных пятен естественных нефтепроявлений на восточном крымском шельфе в 13 км от м. Карангат в период с 2017 по 2022 г.

Однако в период 2019–2020 гг. при неблагоприятных для съемки ГМУ на РЛИ пятна здесь наблюдались редко (в 2020 г. было обнаружено всего четыре слика: в апреле и ноябре). С 2021 г. наблюдается тенденция к увеличению количества обнаруженных пятен в данном районе. Площадь ЕН в среднем составляет 1–2 км², а длина — от 0.1 до 15 км, причем максимальная длина слика составила более 25 км (06.08.2021).

Кизилташский лиман. В северо-восточной части моря в акватории продолжения г. Нефтянка из космоса было обнаружено два источника ЕН, имеющих координаты: 45°09'03" с. ш. и 37°01'09" в. д. — у берега и 45°08'59" с. ш. и 37°01'57" в. д. (см. рис. 1), что совпадает с координатами периодически затопляемого о. Бульбек [22]. Впервые признаки нефтепроявлений в этом районе были отмечены на оптических снимках спутника Landsat-8 в 2016 г., а РЛ-наблюдения в рамках исследования позволили подтвердить наличие здесь группы прибрежных источников. Анализ РЛИ за 2020–2022 гг. показал, что линейные пятна ЕН стабильно появлялись в одних и тех же местах, в итоге группиру-

ясь и создавая веерные структуры. Большинство обнаруженных пятен имело вытянутую форму, чьи длина (от 0.9 до 4.7 км) и площадь (до 2 км²) зависели от ГМУ. Более того, съемки оптических камер высокого разрешения (WorldView, Spot и др.) и визуальные наблюдения с берега подтвердили наш вывод.

В литературе [24, 27] шельф г. Нефтянка и расположенный восточнее от нее о. Бульбек не рассматриваются как классические древние грязевые вулканы. Однако обнаруженные многочисленные нефтепроявления позволяют утверждать, что они могут быть связаны с грязевым вулканизмом Азово-Черноморского бассейна и выбросами нефтяных УВ из осадочного комплекса в Таманском регионе.

Грузинский сектор. Источники ЕН в юго-восточной части Черного моря (акватория г. Поти) активно изучаются с начала XXI в. [35, 37]. Благодаря выделенной на основе геолого-тектонических характеристик района нефтегазоносной области [23], здесь проводилось множество как экспедиционных [38, 43 и др.], так и дистанционных исследований, в том числе с помощью

РЛ-съемки [5, 7, 19]. Данные исследования показали, что пятна ЕН в рамках данного участка при скоростях ветра от 2 до 5–6 м/с на РЛИ обнаруживаются регулярно.

Детальные батиметрические и геофизические съемки в этом районе однозначно подтвердили наличие двух мощных подводных источников нефти на дне моря (подводная гора Печори и грифон Колхети), а также выявили ряд второстепенных ЕН (грифоны, сальзы), периодически активизирующихся и выбрасывающих на морскую поверхность значительно меньшие объемы нефти [38]. Однако в работах, анализирующих источники ЕН в данной акватории с помощью дистанционных методов, основное внимание уделялось наиболее крупным их проявлениям (с координатами 41°58'55" с. ш. и 41°07'33" в. д. — подводная гора Печори, 41°57'58" с. ш. и 41°06'17" в. д. — сип Колхети) [5, 7, 20]).

В ходе РЛ-мониторинга с дополнительным анализом данных с 2017 г. в грузинском секторе восточной части Черного моря в итоге было установлено 16 источников естественных нефтепроявлений (рис. 4). Большинство из них бы-

ло верифицировано ранее с помощью судовых геолого-геофизических измерений и подводной съемки (см., например, [37, 42]).

Выходы УВ происходят одновременно из нескольких расположенных рядом источников, из-за чего на морской поверхности они проявляются на РЛИ в виде повторяющихся сигнатур [7]. Их можно видеть как у крупных источников — над сипом Колхети [19], так и у более мелких (например, линейные пятна у грифонов под номерами 1, 6, 7, 10, 11 и 13 на рис. 5).

Как было отмечено в [5], пятна ЕН в рамках данного участка отображались регулярно на РЛИ не только при скоростях ветра от 2 до 5–6 м/с, но и при скоростях ветра 7–9 м/с (например, 04.04–05.04.2021) из-за мощного потока флюидов из сипа Колхети и г. Печори. Пятна более мелких источников наблюдались на РЛИ при благоприятных ГМУ не всегда — это хорошо видно на примере грифонов под номерами 5, 12, 13 и 15, чьи слики имели эпизодическую активность. Реже всего пятна этих источников появлялись в 2018 и 2022 гг., тогда как максимальное их количество наблюдалось в 2020 и 2021 гг.

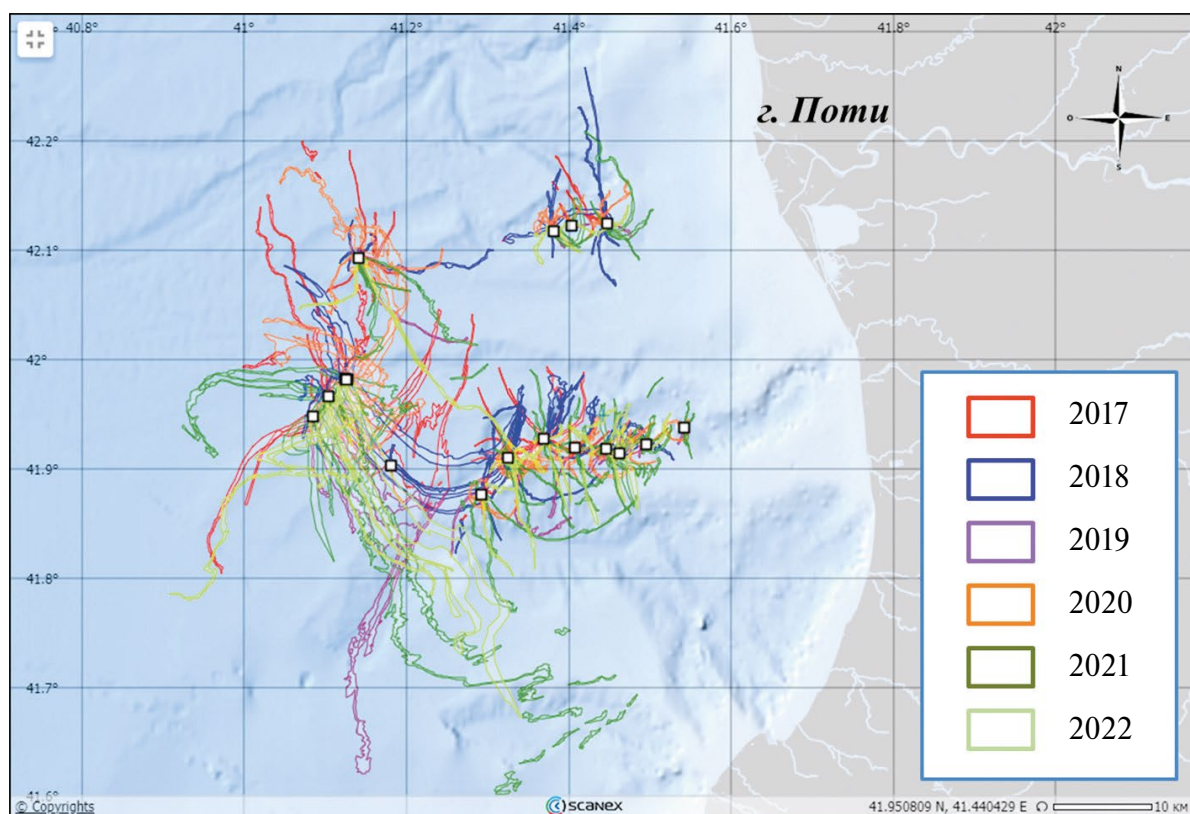


Рис. 4. Пространственно-временная группировка наиболее характерных пятен естественных нефтепроявлений в юго-восточной части Черного моря (акватория к юго-западу от г. Поти) в период с 2017 по 2022 г.

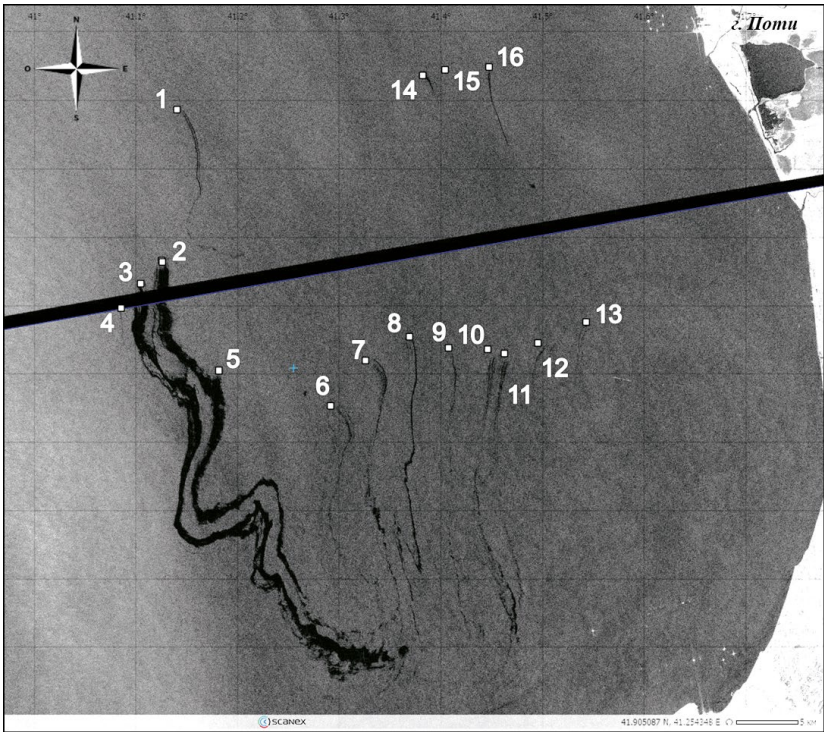


Рис. 5. Отображение всех нефтепроявлений в грузинском секторе Черного моря напротив г. Поты на фрагменте радиолокационного изображения спутника Sentinel-1A от 03.09.2022 (15:11 UTC). © ESA

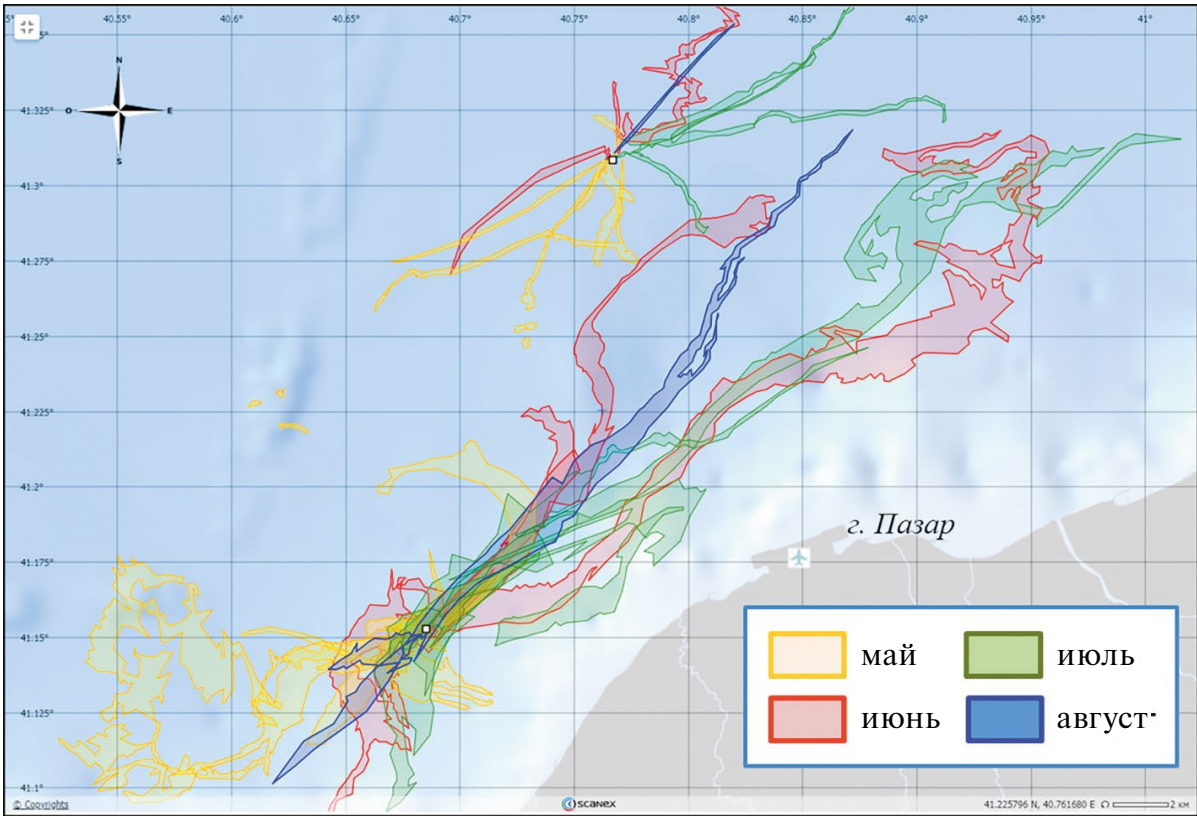


Рис. 6. Пространственно-временная группировка наиболее характерных пятен естественных нефтепроявлений в территориальных водах турецкой провинции Ризе в мае–августе 2021 г.

Благодаря своим особенностям, площадь естественных пленок в данном районе при благоприятных ГМУ нередко достигает, а порой и превышает 100 км^2 (например, 16.06 и 22.06.2021; 03.09.2022 – рис. 5). Длина slickов за время исследования варьировала от сотни метров до десятка километров, а формы были крайне различны в зависимости от направления поверхностных течений и ветра.

Нефтепроявления напротив г. Ризе и Пазар.

В восточной части турецкого сектора моря естественные нефтепроявления отмечались у трех источников, два из которых расположены в территориальных водах провинции Ризе (рис. 6). Выходы нефти на поверхность здесь могут быть обусловлены накоплением и миграцией УВ в осадках материкового склона [16, 17, 34].

Первый, расположенный в 19.6 км к северо-востоку от г. Ризе и на глубине около 1050 м у основания материкового склона ($41^{\circ}09'10''$ с. ш., $40^{\circ}41'06''$ в. д.), обнаружен давно [25]. Несмотря на то что исследования проводились различными методами, наиболее полная информация об этом источнике была получена только с помощью космической радиолокации [12], а также в рамках данной работы.

По данным последних наблюдений, нефтяные слики наблюдались практически на каждом РЛИ, покрывающем акваторию источника, при скоростях ветра до 7–9 м/с. Это указывает

не только на постоянную активность, но и на большую мощность потока выбросов УВ в толщу моря. По оценкам в работе [12], разгрузка пластовой нефти от этого источника с учетом постоянного истечения может обеспечить выход нефти в среднем от 0.3 до 2.5 т в день или от 140 до 1000 т в год.

В среднем слики ЕН имели большую площадь – от 0.5 до 15 км^2 , при малых скоростях ветра часто могли наблюдаться пятна размерами 20–30 км^2 , а максимальная площадь достигала 50 км^2 (29.11.2020).

Второй источник ранее не отмечался в наблюдениях данного района Черного моря. Он находится на расстоянии около 17 км от г. Пазар на глубине более 1500 м ($41^{\circ}18'30''$ с. ш., $40^{\circ}46'01''$ в. д.). Его пятна проявлялись реже, чем слики первого источника, не отображаясь иногда и при благоприятных ГМУ. Их площадь варьировалась в первых квадратных километрах, но длина пятен могла достигать более 30 км (рис. 7).

Нефтепроявления напротив г. Унье. Третий источник ЕН турецкого сектора Черного моря, впервые обнаруженный в рамках РЛ-мониторинга за 2016 г., находится в 43 км от берега мористее г. Унье [12] в глубоководной части моря на глубине около 1020 м в средней части материкового склона (рис. 8) – $41^{\circ}30'37''$ с. ш. и $37^{\circ}20'12''$ в. д.

Здесь в 2005 г. по программе METRO были проведены исследования на полигоне “Самсун”,



Рис. 7. Естественные нефтепроявления в турецких водах Черного моря напротив провинции Ризе на фрагменте радио-локационного изображения Sentinel-1A от 11.06.2022 (15:10 UTC). © ESA

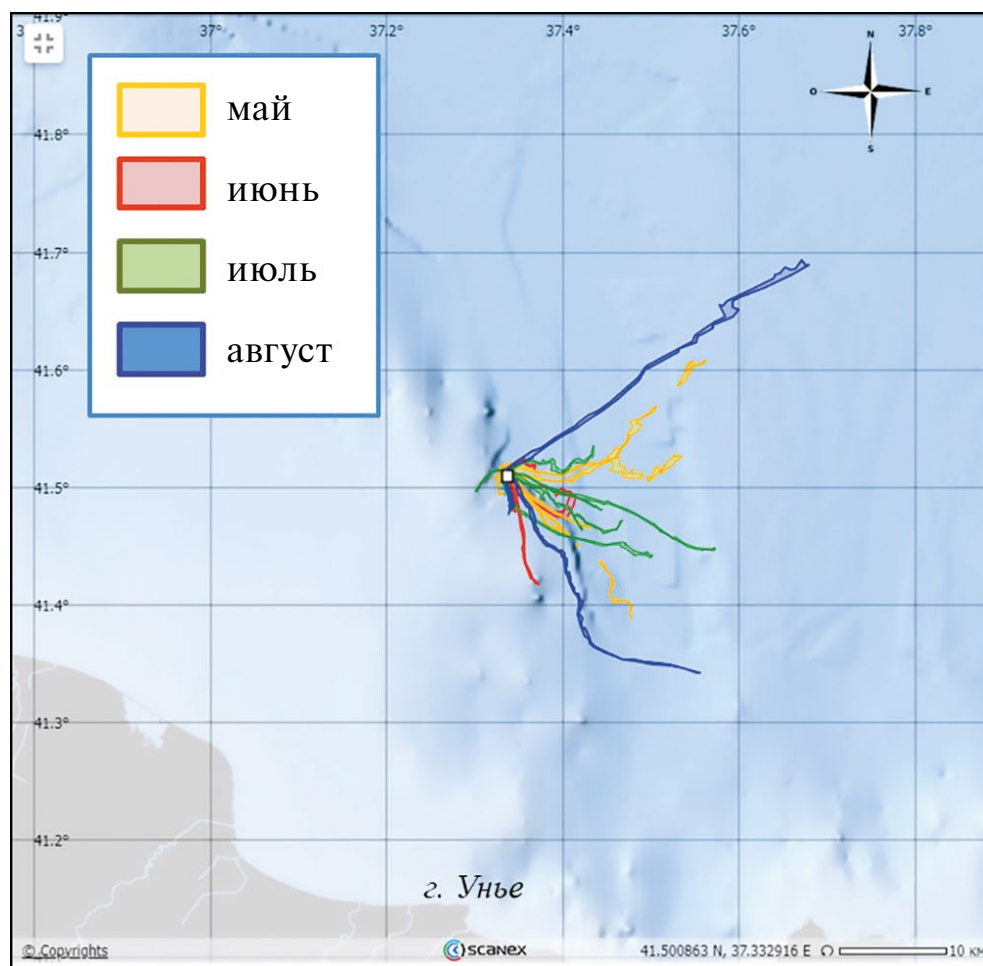


Рис. 8. Пространственно-временная группировка наиболее характерных пятен естественных нефтепроявлений в турецком секторе Черного моря напротив г. Унье с мая по август 2021 г.

расположенном на шельфе и континентальном склоне у берегов Турции, в процессе которых обнаружены многочисленные газовые выходы в южной части Восточно-черноморской впадины и в Синопском прогибе, а также найдены газогидраты и подводные вулканы [25]. Это позволяет с высокой долей вероятности верифицировать источник нефтепроявления напротив г. Унье как грязевой вулкан юго-восточной части Черного моря.

Согласно РЛ-мониторингу проявления этого источника на поверхности были видны на каждом РЛИ при благоприятных для наблюдений скоростях ветра 2–8 м/с, что указывает на его постоянную активность. Преимущественно слики принимали вытянутую форму вдоль направления Основного черноморского течения. Длина пятен нередко превышала 20 км, а площадь составляла от 0.2 до 12 км².

Отдельные пятна проявлялись в виде повторяющихся сигнатур (рис. 9), что указывает на выход УВ из нескольких источников, расположенных рядом.

Западный крымский шельф. Данная акватория в первую очередь известна большим количеством выходов газа (газовых факелов), приуроченных к зонам крупных разломов [16, 18] и районам, где велась добыча газоконденсата [11]. Струйные газовыделения обнаруживались с помощью гидроакустических наблюдений как в глубоководных частях северо-западной части Черного моря, так и, например, в мелководной акватории Севастопольской бухты [6].

Район обнаруженных во время мониторинга ЕН на крымском шельфе (рис. 10) частично пересекается с ранее установленными полями метановых сипов [6] и газоконденсатных месторождений [12].

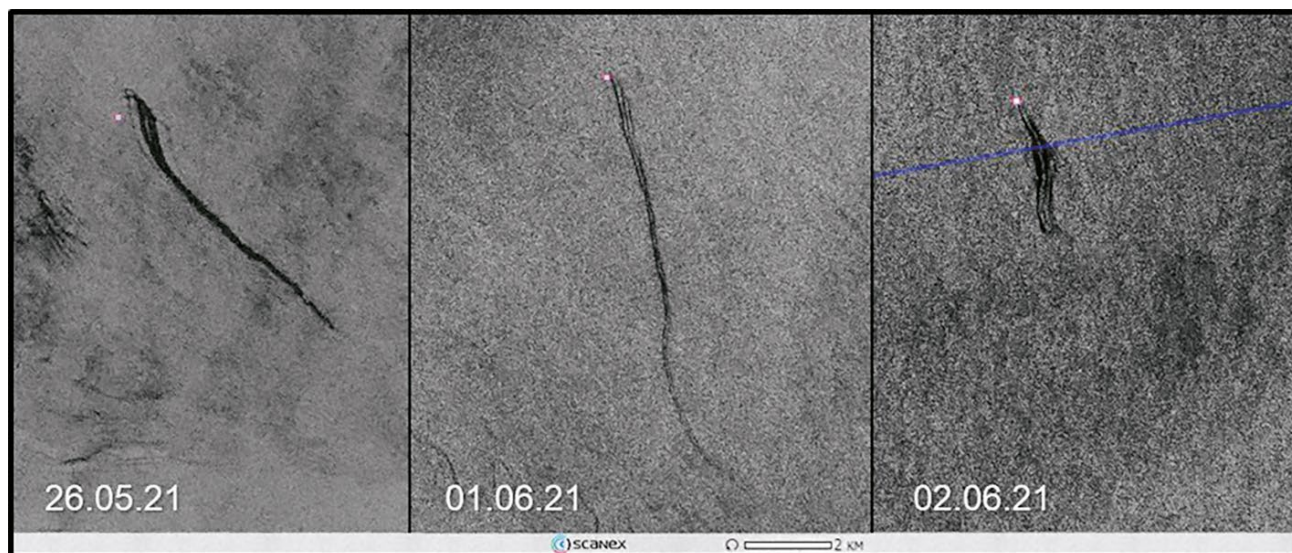


Рис. 9. Примеры повторяющихся сигнатур естественных нефтепроявлений на фрагментах радиолокационных изображений Sentinel-1 напротив г. Унье в турецком секторе Черного моря в 2021 г. © ESA

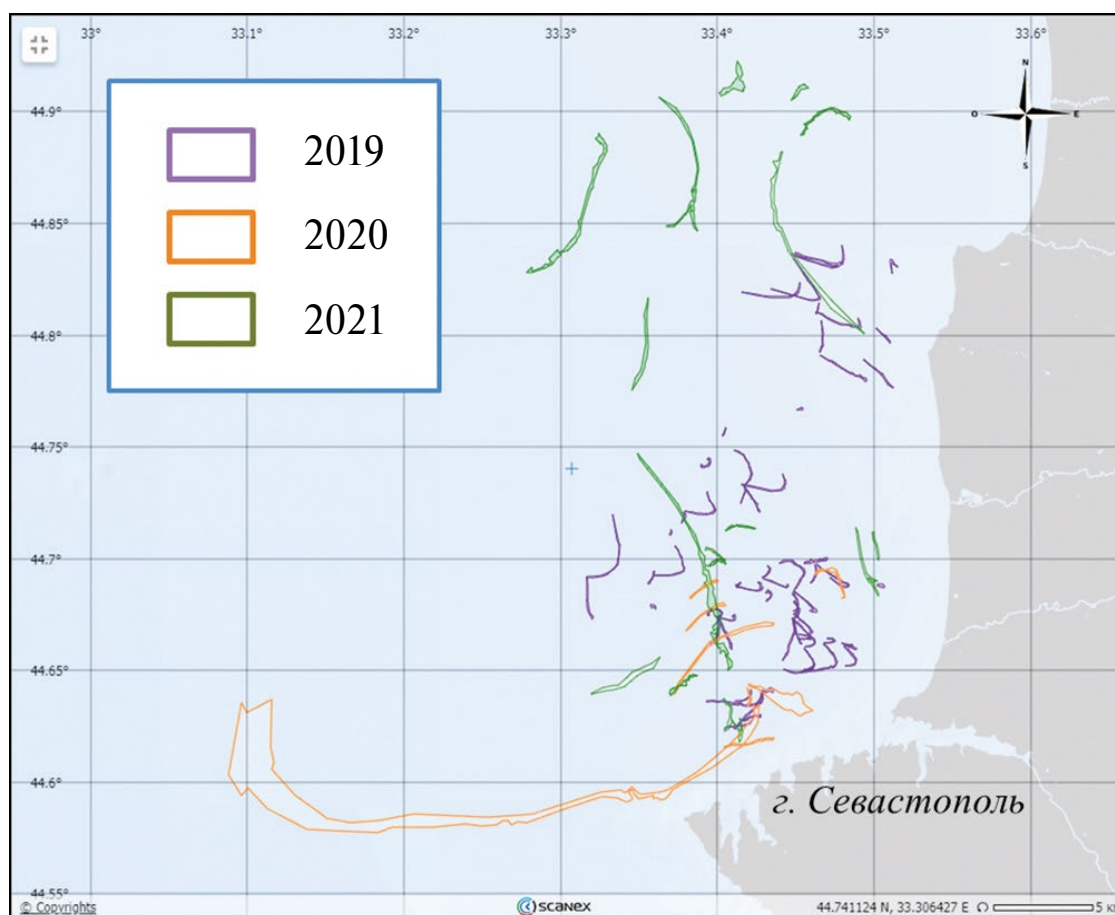


Рис. 10. Пространственно-временное распределение единичных пятен естественных нефтепроявлений на западном Крымском шельфе в период с 2019 по 2021 г.

Нефтепроявления здесь — явление эпизодическое: они были различимы на РЛИ только в узком диапазоне ветра 1.5–3.0 м/с, преимущественно в мае–июне. Слик максимальной площади (20 км²) был обнаружен 30.07.2020 на оптическом снимке Sentinel-2. Общая площадь акватории, где периодически наблюдались нефтепроявления, составляет более 500 км².

Материковый склон северо-западной части Черного моря давно привлекал внимание своими акустическими аномалиями, которые в итоге были интерпретированы как следствие газовыделений из грязевых вулканов на дне моря [28]. С помощью РЛ-методов здесь также наблюдались области грифонной активности (см., например, [10]), однако из-за нерегулярности появления пятен ЕН на РЛИ конкретные места выхода УВ установлены не были.

Мониторинг 2020–2022 гг. позволил установить два новых источника ЕН, которые расположены на материковом склоне с глубинами 1400–1500 м и 1700–1800 м (рис. 11) в точках с координатами 44°29'49" с. ш. и 32°35'52" в. д., 44°18'27" с. ш. и 33°05'47" в. д. соответственно.

Обнаруженные источники расположены в границах Одесско-Синопской разломной зоны, где, в том числе, были выделены характерные

структуры грязевого вулканизма [26]. Поэтому найденные с помощью радиолокации источники с высокой вероятностью могут быть также отнесены к подводным вулканам, один из которых, расположенный в 9 км от второго источника ЕН, отображен на карте GEBCO, послужившей подложкой для рис. 12. На батиметрических картах Navionics Marine Charts [41] отметка высоты этой горы составляет 80 м.

Слики данных источников появлялись эпизодически. Анализ архивных снимков показал, что впервые пятна ЕН, которые можно было бы отнести к установленным координатам найденных источников, отобразились в июле–августе 2017 г. — снимки спутника Sentinel-2 от 29.07.2017 в 08:53 UTC, 13.08.2017 в 08:53 UTC, 28.08.2017 в 08:54 UTC. Но затем эти ЕН регистрировались крайне редко, из-за чего могли ошибочно идентифицироваться на РЛИ как судовые разливы.

Максимальное количество пятен пришлось на 2021 г. — 50% от общего количества за три года наблюдений, причем большая часть установлена у первого источника (рис. 13). Форма и размеры сликов, как и в остальных случаях, существенно зависели от ГМУ. Наибольшая длина и площадь нефтепроявления первого источника установлена в ноябре 2020 г. — 42.5 км и 8.6 км² соот-

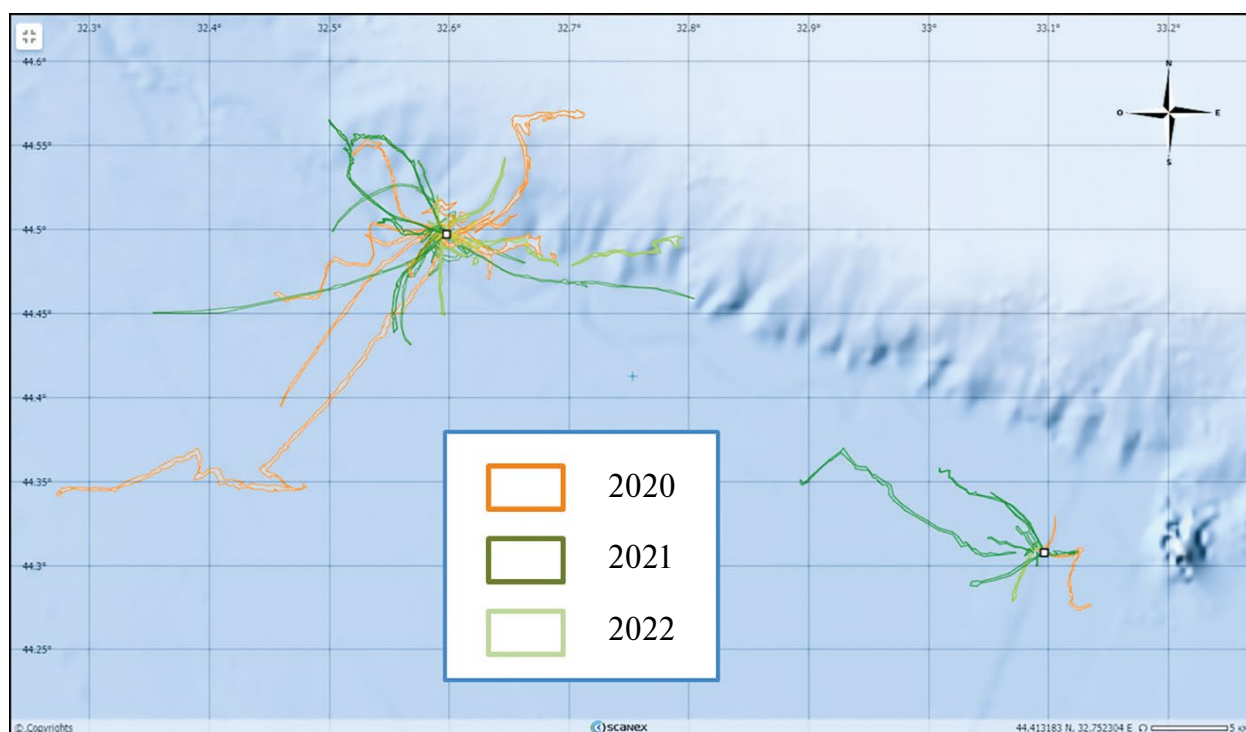


Рис. 11. Пространственно-временная группировка пятен естественных нефтепроявлений материкового склона северо-западной части Черного моря в период с 2020 по 2022 г.

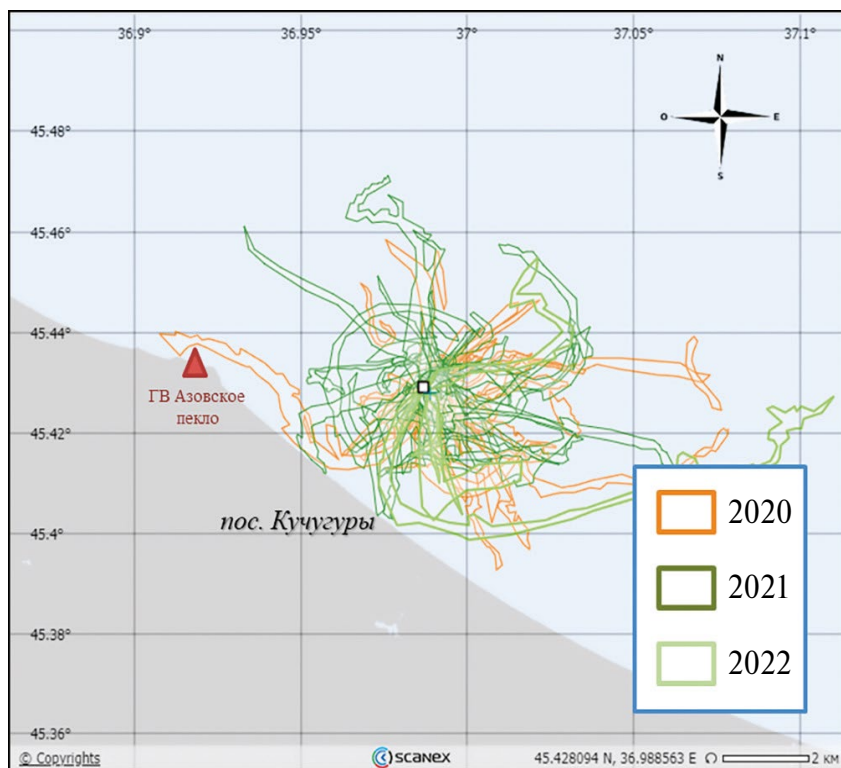


Рис. 12. Пространственно-временная группировка пятен естественных нефтепроявлений в Азовском море у пос. Кучугуры в период 2020–2022 гг.

ветственно, а у второго в июле 2021 г. – 18.7 км и 2.8 км².

Азовское море. Кучугуры. Согласно [24] геологическое единство Азовского моря и шельфа Черного моря определило высокий потенциал нефтегазоносности первого. Здесь еще в прошлом столетии открыты газовые месторождения: Стрелковое, Морское, Северо-Керченское, Восточно-Казантипское, Северо-Казантипское и др. И хотя предполагалось, что из-за особенностей геологического строения большая часть Азовского моря перспективна преимущественно на газ [29], с помощью радиолокационного мониторинга здесь был выделен источник ЕН на морской поверхности (см. рис. 12).

В 2020 г. в ходе анализа результатов РЛ-мониторинга 2017–2019 гг. в южной части Азовского моря в 3.5 км от пос. Кучугуры на поверхности моря были обнаружены повторяющиеся нефтепроявления, которые в итоге были идентифицированы как естественные [12].

Источник расположен на глубине около 10 м в координатах 45°25'45" с. ш. и 36°59'13" в. д. (см. рис. 13). Нефтепроявления, наблюдаемые на поверхности моря в этом районе, могут быть связаны с процессами грязевого вулканизма

и возможными выбросами небольших количеств УВ из осадочного комплекса Азовского моря, как на Таманском полуострове и в районе обнаруженных источников в Керченском предпроливье Черного моря – все входят в район Керченско-Таманской грязевулканической области [30]. В непосредственной близости от обнаруженного источника как на побережье, так и в прибрежной зоне располагается несколько активных грязевых вулканов, в частности: Пекло Азовское на суше в 5.5 км от источника и в море в 4.5 км, Кучугурский (в 4.6 км), Тиздар (сухопутный и морской) в 10.5 км и некоторые другие [24].

ЕН данного источника на РЛИ появляются регулярно при благоприятных ГМУ, т.е. имеет постоянный режим. Площадь обнаруженных slickов варьирует от сотни метров квадратных до единиц километров квадратных – максимальная площадь пятна составила 6.34 км² (26.05.2021).

Проведенные исследования показали, что всего в Азово-Черноморском бассейне расположено 29 источников естественных нефтепроявлений (см. рис. 13, табл. 1): 28 в Черном море и один в Азовском море.



Рис. 13. Карта-схема мест обнаружения естественных нефтепроявлений, обнаруженных и верифицированных во время многолетнего радиолокационного мониторинга Азово-Черноморского бассейна.

Таблица 1. Районы естественных нефтепроявлений и их характеристики, установленные на основе радиолокационных наблюдений 2020–2022 гг.

Черное море				
Район	Регион моря	Количество источников	Характер активности	Средняя площадь, км ²
Черное море				
Керченское предпроливье	Восточная часть	4	Постоянный	1–2
Грузинский сектор	Юго-восточная часть	16	Постоянный	15–30
Турецкий сектор	Юго-восточная часть	2	Постоянный	0.5–15
Турецкий сектор (вне территориальных вод)	Южная часть	1	Постоянный	0.2–12
Западный крымский шельф	Северо-западная часть	1	Эпизодический	0.5–2
Материковый склон	Северо-западная часть	2	Эпизодический	0.5–2
Кизилташский лиман	Северо-восточная часть	2	Эпизодический	1–2
Азовское море				
Акватория у пос. Кучугуры	Южная часть	1	Постоянный	0.1–1.5

Таким образом, большинство активных и вновь обнаруженных источников ЕН в рамках исследования расположено в восточной и юго-восточной частях Черного моря. Здесь, в частности, было обнаружено несколько ЕН: четыре источника в районе Керченского предпроливья и два в Кизилташском лимане, группа из 16 источников в пределах грузинского сектора моря напротив г. Поти, два в территориальных водах Турции между гг. Ризе и Пазар, а также один источник вне их — на удалении в 43 км от турецкого г. Унье. В северо-западной части Черного моря обнаружено поле мелких эпизодических природных источников, расположенных на западном шельфе Крыма, а также впервые два активных источника на материковом склоне моря к юго-западу от Севастополя. В Азовском море обнаружен один устойчивый источник естественных нефтепроявлений — напротив пос. Кучугуры.

Вклад естественных нефтепроявлений в общее количество обнаруженных пятен пленочных загрязнений за три года наблюдений в Черном море в среднем составил 38%, а в Азовском море — 30%.

Обнаруженные источники тяготеют к нефтегазоносным бассейнам, преимущественно располагаясь в грязевулканических областях. Материалы геолого-геофизических исследований Азово-Черноморского бассейна [1, 2, 4] однозначно подтверждают этот вывод.

Пятна ЕН в зимние месяцы обнаруживались редко, так как не отображались на РЛИ, полученных при скорости ветра, превышающей 5–6 м/с, что характерно для периода с конца ноября до начала марта. Из-за малой плотности и толщины [37] нефть ЕН легко переносится течениями, из-за чего при благоприятных ГМУ пятна принимают на морской поверхности различные формы и дрейфуют на большие расстояния от места образования — до десятков километров.

Верификация ранее обнаруженных источников проведена с помощью дополнительного анализа данных космической радиолокации с привлечением доступных оптических снимков высокого разрешения (на которых отображается цвет пленки) и визуального наблюдения с берега (в Кизилташском лимане). Исключением является один из источников в Керченском предпроливье Черного моря, который был верифицирован путем подспутниковых наблюдений. Надводные и подводные исследования морско-

го дна близ банки Мария Магдалина установили многочисленные потоки газа, выходящих из донных отложений, и однозначно подтвердили природное происхождение нефтяных пятен, наблюдаемых на морской поверхности, а анализ проб донных осадков показал высокую концентрацию углеводородов.

ВЫВОДЫ

С помощью данных космической радиолокации и информации о физико-географических особенностях Черного и Азовского морей были выявлены и верифицированы основные районы и источники естественных нефтепроявлений Азово-Черноморского бассейна. Всего установлено 29 источников, восемь из которых были обнаружены впервые. Их верификация проводилась с помощью подспутниковых экспериментов, визуальных наблюдений с берега, а также с использованием повторных радиолокационных съемок и оптических снимков высокого разрешения.

На крымском шельфе, как в Черном, так и в Азовском морях, были обнаружены поля небольших естественных нефтепроявлений, отобразившихся на радиолокационных изображениях морской поверхности эпизодически в мае–июне в маловетренных условиях 1.5–3 м/с [13], однако для верификации нефтепроявлений этих акваторий необходимы дальнейшие наблюдения. Для этого следует провести привязку таких источников к структурным элементам земной коры, исследовать особенности современной геодинамической активности, а также учесть техногенные нагрузки на недра этих морских регионов.

Вклад естественных нефтепроявлений в общее загрязнение Черного и Азовского морей на основе настоящего исследования в среднем составляет 34%. За трехлетний период отмечена тенденция увеличения доли пятен естественного происхождения, что обусловлено как геолого-геофизическими процессами, так и происходящими в недрах глобальными изменениями, что в итоге может существенно повлиять на нефтеуглеводородный фон водных масс Азово-Черноморского бассейна.

Методы дистанционного зондирования, в данном случае космической радиолокации, дают актуальные и объективные данные о распространении естественных нефтепроявлений и их современной активности, дополняя

геолого-геофизические съемки и измерения интересующих акваторий. Представленный подход для поиска и обнаружения природных источников нефтепроявлений может применяться повсеместно в морях РФ.

Благодарности. Авторы благодарят д. г.-м. н. И.А. Немировскую за помощь в анализе донных осадков. Авторы благодарят ГК “СКАНЭКС” за возможность использования ресурсов геопорталов, созданных на базе веб-ГИС приложения “ГеоМиксер”.

Источник финансирования. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (в рамках государственного задания Министерства науки и образования России FMWE-2024-0015). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Права копирайта на данные спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B принадлежат Европейскому космическому агентству (ESA).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобылев В.В., Железняк В.Е., Шиманов Ю.В. и др. Геология и нефтегазоносность шельфа Черного и Азовского морей. М.: Недра, 1979. 184 с.
2. Богаец А.Т., Бондарчук Г.К., Леськив И.В. и др. Геология шельфа УССР. Нефтегазоносность // Киев: Наукова Думка, 1986. 152 с.
3. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
4. Глузов И.Ф., Гулев В.Л., Карнаухов С.М., Сенин Б.В. Региональная геология и перспективы нефтегазоносности Черноморской глубоководной впадины и прилегающих шельфовых зон / Под ред. Б.В. Сенина. Ч. 2. М.: Недра, 2014. 181 с.
5. Евтушенко Н.В., Иванов А.Ю. Нефтепроявления в юго-восточной части Черного моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 3. С. 24–30.
6. Егоров В.Н., Артемов Ю.Г., Гулин С.Б. Метановые сипы в Черном море. Средообразующая и экологическая роль. Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2011. 405 с.
7. Затягало В.В. Комплексный анализ естественных выходов углеводорода в восточной части Азово-Черноморского бассейна на основе спутниковых наблюдений и данных геолого-геофизических исследований // Метеорология и гидрология. 2012. № 3. С. 56–70.
8. Иванов А.Ю. Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
9. Иванов А.Ю., Затягало В.В. Картографирование пленочных загрязнений моря с использованием космической радиолокации и географических информационных систем // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 46–63.
10. Иванов А.Ю., Кучейко А.Ю., Евтушенко Н.В. и др. Естественные нефтепроявления в крымских водах Черного моря по данным радиолокационного зондирования // 16-я Всеросс. откр. конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. 13–17 ноября 2017 г. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 254.
11. Иванов А.Ю., Матросова Е.Р. Техногенная грифонная активность в северо-западной части Черного моря по данным съемок из космоса // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 8. С. 57–63.
12. Иванов А.Ю., Матросова Е.Р., Кучейко А.Ю. и др. Поиск и обнаружение естественных нефтепроявлений в морях России по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5. С. 43–62.
13. Клименко С.К. Пространственно-временные характеристики естественных нефтепроявлений Азово-Черноморского бассейна по данным космической радиолокации за 2020–2023 гг. // Комплексные исследования Мирового океана / Материалы VIII Всероссийской научной конференции молодых ученых. Владивосток: ДВО РАН, 2024. С. 531–532 (в печати).
14. Клименко С.К., Иванов А.Ю., Немировская И.А. Спутниковый радиолокационный мониторинг и верификация естественных нефтепроявлений в Керченском предпроливье Черного моря // Труды XII Всерос. конф. с международным участием “Современные проблемы оптики естественных вод”. М.: ИО РАН, 2023. С. 143–146.
15. 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.
16. Круглякова Р.П., Круглякова М.В., Шевцова Н.Т. Геолого-геохимическая характеристика естественных проявлений углеводородов в Черном море // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 1. С. 37–51.
17. Круглякова Р.П., Кругляков В.В., Шевцова Н.Т. Естественные выходы нефти и газа на дне турецкого континентального склона Черного моря // Труды XIX Межд. науч. конф. по морской геологии. М.: ИО РАН, 14–18 ноября 2011 г. Т. 2. С. 57–60.
18. Кутас Р.М., Русаков О.М., Коболев В.П. Геолого-геофизические исследования газовыделяющих

- структур в северо-западной части Черного моря // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. JSV7. С. 698–705.
19. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 335 с.
20. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Оценка рисков загрязнения поверхности юго-восточной части Черного моря, обусловленного естественными выходами нефти с морского дна // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 211–220.
21. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. Морской нефтегазовый комплекс: состояние, перспективы, факторы воздействия. М.: Изд-во ВНИРО, 2017. Т. 1. 326 с.
22. СКАНЭКС, 2022. В Кизилташском лимане Черного моря обнаружены естественные нефтепроявления. <https://www.scanex.ru/company/news/v-kiziltashskom-limane-chernogo-morya-obnaruzheny-estestvennye-nefteproyavleniya/>
23. Туголесов Д.А., Горшков А.С., Хахалев Е.М. и др. Тектоника мезокайнозойских отложений Черноморской впадины. М.: Недра, 1985. 215 с.
24. Шнюков Е.Ф., Зиборов А.П. Минеральные богатства Черного моря. Киев: НАН Украины, 2004. 285 с.
25. Шнюков Е.Ф., Иноземцев Ю.И., Куковская Т.С. и др. Геолого-океанологические исследования в Черном море. Киев: Логос, 2014. 132 с.
26. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П. Слепые грязевые вулканы Черного моря // Геологія і корисні копалини Світового океану. 2020. Т. 16. № 2. С. 49–65.
27. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Пасынков А.А. Газовый вулканизм Азово-Черноморского региона. Киев: Логос, 2013. 384 с.
28. Шнюков Е.Ф., Митин Л.П., Клещенко С.А., Григорьев А.В. Зона акустических аномалий в Черном море близ Севастополя // Геологический журнал. 1993. № 4. С. 62–67.
29. Шнюков Е.Ф., Орловский Г.Н., Усенко В.П. и др. Геология Азовского моря. К.: Наукова думка, 1974. 247 с.
30. Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.И. и др. Грязевые вулканы Керченско-Таманской области. Атлас. К.: Наукова Думка, 1986. 152 с.
31. Alpers W., Espedal H.A. Oils and surfactants. In: Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual, 2004. P. 263–275.
32. Alpers W., Holt B., Zeng K. Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls // Remote Sens. Environ. 2017. V. 20. P. 133–147.
33. Ivanov A.Yu., Morović M. Detection and mapping oil seeps in the Adriatic Sea using SAR imagery // Acta Adriatica. 2020. V. 61. № 1. P. 13–26.
34. Jatiault R., Dhont D., Loncke L., Dubucq D. Monitoring of natural oil seepage in the Lower Congo Basin using SAR observations // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 191. № 7. P. 258–272.
35. Judd A., Hovland M. Seabed fluid flow. The impact on geology, biology and the marine environment. Cambridge Univ. Press, 2007. 475 p.
36. Kvenvolden K.A., Cooper C. Natural seepage of crude oil into the marine environment // Geo-Marine Letters. 2003. V. 23. № 3. P. 140–146.
37. MacDonald I.R. Natural oil spills // Sci. American, 1998. V. 279. № 50. P. 51–66.
38. MacDonald I.R., Naehr T. Remote sensing and sea truth measurements of methane flux to the atmosphere (HYFLUX project) // Quarterly Report, October–December 2010. National Energy Technology Laboratory / Texas A&M University. USA, 2011. 24 p.
39. MacDonald I.R., Redly J.F.Jr., Best S.E. et al. Remote sensing inventory of active oil seeps and chemosynthetic communities in the northern Gulf of Mexico / In: Hydrocarbon Migration and its Near-Surface Expression, 1996, AAFG Memoir 66, p. 27–37.
40. Najoui Z., Riazanoff S., Deffontaines B., Xavie J.-Pl. Estimated location of the sea floor sources of marine natural oil seeps from sea surface outbreaks: A new “source path procedure” applied to the northern Gulf of Mexico // Marine and Petroleum Geology. 2018. V. 91. P. 190–201.
41. Navionics ChartViewer. <https://webapp.navionics.com/>
42. Quintero-Marmol A.M., Pedroso E.C., Beisl C.H. et al. Operational applications of Radarsat-1 for the monitoring of natural oil seeps in the South Gulf of Mexico // Proceedings IGARSS. 2003. V. 4. P. 2744–2746.
43. Wagner-Friedrichs M., Bulgay E., Keil H. et al. Gas seepage and gas/fluid migration associated with the canyon-ridge system offshore Batumi (Georgia, south-eastern Black Sea) inferred from multichannel seismic data // Int. J. Earth Sci. 2011. P. 1–25.
44. Williams A., Lawrence G. The role of satellite seep detection in exploring the South Atlantic's ultra deep water. Surface exploration case histories: Applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing // AAPG Studies in Geology. 2002. V. 48. P. 327–344.

MODERN DISTRIBUTION AND VERIFICATION OF DETECTED NATURAL OIL SEEPS IN THE AZOV-BLACK SEA BASIN

S. K. Klimenko*, A. Yu. Ivanov

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

**e-mail: klimenko.sk@ocean.ru*

The results of monitoring of natural oil seeps in the Azov-Black Sea basin with synthetic aperture radar (SAR) in the period from 2020 to 2022 are analyzed. The SAR images of European satellites Sentinel-1A and Sentinel-1B were used for their search, detection and study. Using the geoinformation approach the main areas of oil seepage were identified and new oil seeps were detected. Their verification was carried out by analyzing all available information on geological and geophysical features of the water basins experimentally by subsatellite observations and measurements as well as by alternative remote sensing methods such as high resolution optical imagery. This allowed identifying twenty-eight oil seep sources in the Black Sea and one in the Sea of Azov. It is shown the study of natural oil seeps, their distribution and current activity is one of the important research tasks that is currently receiving considerable attention.

Keywords: Black Sea, Sea of Azov, natural oil seepage, oil slicks, spaceborne SAR, geoinformation approach, oil seep distribution