© Иванов А.Ю., 2019, Океанологические исследования, 2019, Том 47, № 5, С. 52–64

УДК 551 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).4

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЯ В КАСПИЙСКОМ И БАРЕНЦЕВОМ МОРЯХ: ОБНАРУЖЕНИЕ И АНАЛИЗ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Иванов А.Ю.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e–mail: ivanoff@ocean.ru

Статья поступила в редакцию 09.01.2019, одобрена к печати 13.12.2019

Методами радиолокационного дистанционного зондирования Земли исследуются естественные нефтепроявления и источники-выходы нефтеуглеводородов в южной части Каспийского моря у побережья Ирана и в Баренцевом море. Показано, что анализ поверхностных проявлений с использованием геоинформационного подхода, дополнительных геолого-геофизической информации и батиметрических данных позволяет не только определить реальное положение источников на дне, но и получить информацию об их активности − периодичности и объемах выбросов нефти. Кроме того, подобный подход позволяет обнаруживать новые источники нефти или газоконденсата в тех или иных морях. Сделан вывод о том, что радиолокационные данные европейских спутников Sentinel-1 представляют собой отличный материал для мониторинга и изучения естественных нефтепроявлений через наблюдение нефтяных пятен, плавающих на поверхности моря.

Ключевые слова: Каспийское море, Баренцево море, естественные нефтепроявления, пятна нефти, космическая радиолокация, радиолокационные изображения, геоинформационный подход

Введение

Изучение нефтегазоносности Мирового океана является одним из актуальных фундаментальных и прикладных научных направлений. С середины XX века в различных его частях активно идут поиски как естественных источников нефтеуглеводородов (НУ), так и их месторождений. Не секрет, что ряд месторождений в Каспийском регионе, Мексиканском заливе и других районах был открыт благодаря обнаружению естественных выходов НУ. О том, что в Каспийском море есть газ и нефть, известно давно (добыча ведется с конца XIX века). В настоящее время это море является одним из важных источников НУ, главным образом нефти. Более того, юго-западная часть моря – один из хорошо известных регионов сосредоточения естественных выходов нефти. Однако менее известны и исследованы естественные выходы нефти в Баренцевом море, несмотря на то, что неоднократно предпринимались многочисленные попытки их обнаружения.

Очевидно, что применение методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для исследования естественных нефтепроявлений в морях представляет

большой интерес. Космическая радиолокационная (РЛ) съемка в настоящее время позволяет получать информацию о явлениях, наблюдаемых в верхнем слое морей и океанов, и в том числе о пятнах нефти, нефтепродуктов и прочих маслянистых веществ, плавающих на поверхности моря (Иванов, 2007). Современные РЛ-средства наблюдения, такие, как радиолокаторы с синтезированной апертурой на спутниках Sentinel-1A и Sentinel-1B, а также Radarsat-2 и TerraSAR-X, обеспечивают регулярное получение подобной информации в различных районах Мирового океана, а благодаря частой повторяемости съемок, широкому обзору и всепогодности, позволяют получать мгновенные картины распределения нефтяных пятен на поверхности того или иного моря (Иванов, 2007).

Для анализа и исследования нефтепроявлений, обнаруженных в одном и том же месте на разновременных радиолокационных изображениях (РЛИ), используется методика, разработанная в работах Williams and Lawrence (2002), Иванова и др. (2007) и Иванова (2010а), а также геоинформационный (ГИС) подход (Иванов, Затягалова, 2007); эти методы использовалась в большинстве подобных проектов, реализуемых в РФ. С помощью космической радиолокации и ГИС-подхода были исследованы и даже открыты естественные источники нефти в Каспийском море (Иванов и др., 2007, 2015), на северо-восточном шельфе о. Сахалин (Иванов, 2010а), в Черном море (Евтушенко, Иванов, 2012) и оз. Байкал (Иванов, 2010б). Попытка оценки региональной нефтегазоносности (юго-западный Каспий), по данным радиолокации, но с использованием доступных геофизических данных, предпринята в работе Иванова и др. (2015). Кроме того, в работах Лавровой и др. (2016) и Mityagina and Lavrova (2016) обобщены результаты наблюдений естественных нефтепроявлений в Черном и Каспийском морях дистанционными методами.

Обработка РЛИ для этих задач обычно проводится по стандартной схеме и, помимо всего прочего, включает: геометрическую коррекцию, географическую привязку изображений к цифровой карте и интерактивную интерпретацию РЛИ с выделением/векторизацией темных пятен (сликов) с учетом окружающей обстановки и наличия сликообразующих явлений иной природы. В частности, идентификация обнаруженных пятен-сликов естественных нефтепроявлений происходит по их форме, размерам, направлению дрейфа, степени кластеризации (повторяемости во времени и пространстве), наличию повторяющихся сигнатур и т.п. Кроме того, пленки естественных нефтепроявлений, имея значительно большую толщину, чем биогенные пленки, существуют на поверхности моря в более широком диапазоне скоростей ветра – до 6–7 м/с, то есть наблюдаются и тогда, когда биогенные пленки исчезают с поверхности моря (при ветре большем 3–4 м/с). На заключительном этапе обработки сами РЛИ, векторные слои пятен и необходимая для анализа геолого-геофизическая информация объединяется на специализированных геопорталах веб-картографического сервиса «Геомиксер» (http://geomixer.ru), позволяющего проводить интерактивный анализ собранных данных. В частности, для успешного анализа на таком портале должна быть собрана информация о гидрометеорологических условиях (ГМУ) съемок, батиметрии, геологических структурах и строении

дна, прочие геофизические данные и данные о региональной нефтегазоносности. Более подробно о подходах и методах анализа РЛ-данных для обнаружения и исследования естественных нефтепроявлений можно узнать из работ Иванова (2007, 2010а), Иванова и Затягаловой (2007), Иванова и др. (2007, 2015), Голубова и Иванова (2014).

В настоящей статье изложены основные результаты работ, полученные в рамках российско-иранского и российско-норвежского проектов. В них, помимо всего прочего, исследовались естественные нефтепроявления у южного побережья Ирана и в центральной части Баренцева моря. В Южном Каспии в качестве тестового полигона для разработки методологии исследования флюидодинамики Каспийского моря был выбран участок моря напротив м. Сефидруд (рис. 1); в Баренцевом море – вся акватория, охваченная РЛ-мониторингом, который проводится с 2015 г. (Иванов и др., 2017; Ivanov et al., 2018).

Нефтепроявления в южной части Каспийского моря

Нефтепроявления у м. Сефидруд в Южном Каспии известны с начала 1990-х гг. прошлого века, когда были запушены первые РЛ спутники. Однако им по непонятной причине не уделялось должного внимания. В связи с этим с помощью метода, описанного выше, была проанализирована серия РЛИ, полученная европейскими спутниками Sentinel1-A и Sentinel-1B на район интереса в апреле–июне 2018 г. (рис. 1). С использованием методов ДЗЗ, батиметрических и геолого-геофизических данных эти нефтепроявления были исследованы.

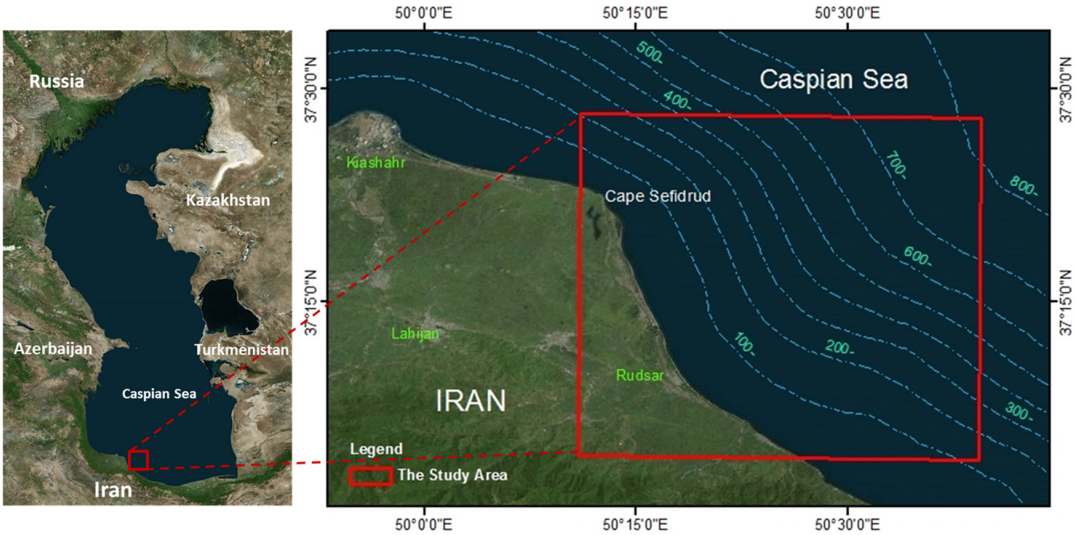

Рис. 1. Район исследования в Южном Каспии.

На основе анализа пятен, обнаруженных на 12 последовательных разновременных РЛИ (рис. 2), полученных в 2018 г., в ГИС установлено, что: 1) нефтепроявления в этом месте в виде групп линейчатых нефтяных пятен на РЛИ наблюдаются практически на каждом РЛИ, полученном при скорости ветра, не превышающей

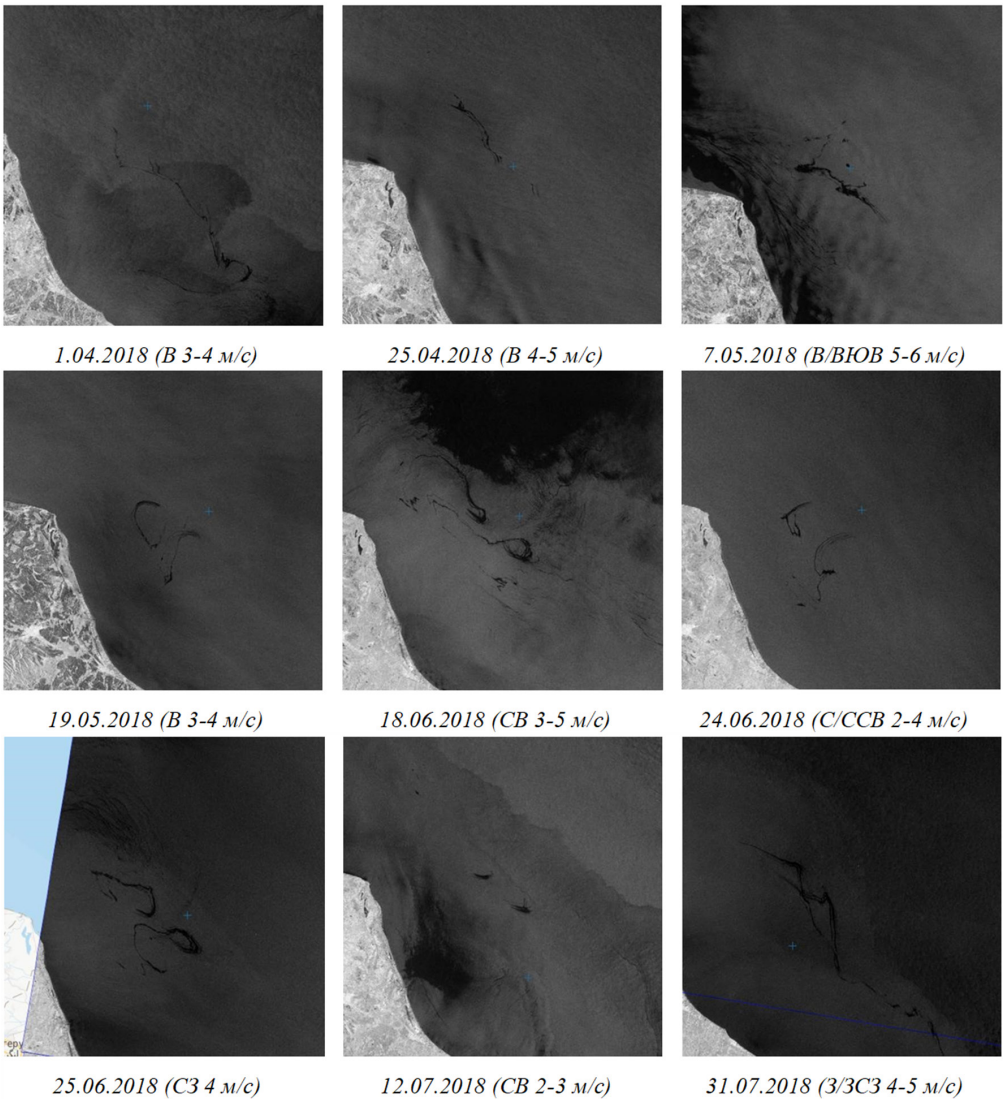

Рис. 2. Нефтепроявления у м. Сефидруд в Южном Каспии на серии РЛИ спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B, полученных в 2018 г. (в скобках дано направление и скорость ветра). © ESA

6–7 м/с; 2) нефтепроявления были обусловлены двумя основными источниками, расположенными в точках координатах: 37°23′00″с.ш. и 50°24′30″в.д., 37°19′30″с.ш. и 50°29′06″в.д. (рис. 3); 3) основные источники осложнены вторичными (грифонами или сипами), что наглядно показали данные оптических сенсоров на ИСЗ Sentinel-2 (рис. 4).

Для дальнейшего анализа были использованы данные о батиметрии, геологическом строении дна и нефтегазоносности. Анализ всей совокупности данных (рис. 5) позволил установить, что: 1) нефтяные пятна (образованные ими слики) группируются над континентальным склоном в районах, где глубина моря составляет 535 и 675 м; 2) они привязаны к локальными геологическим структурам, выявленным в строении осадочного чехла, которые были интерпретированы как отложения палеодельты реки Сефидруд; 3) эти нефтепроявления соотносятся с нефтегазоносной структурой Ramsar (N 3), которая была обнаружена в конце 1990-х гг. прошлого века сейсмоакустическими методами (данные иранской ком-

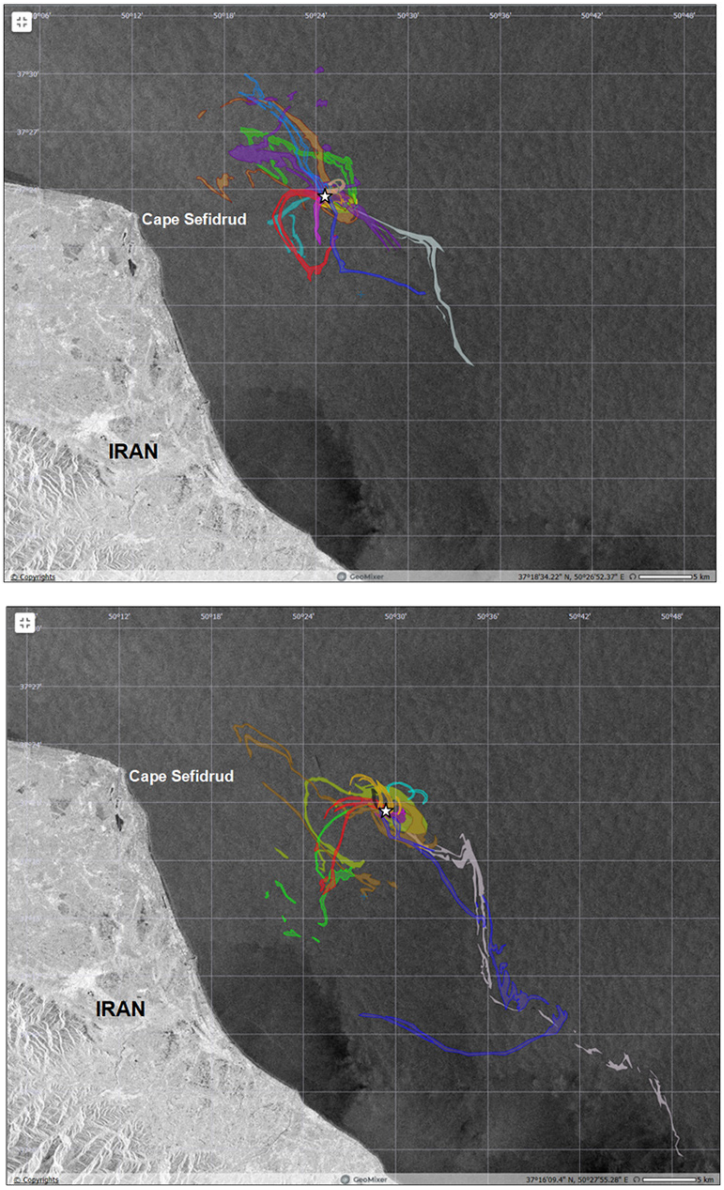

Рис. 3. Сводные карты нефтяных пятен, обусловленных нефтепроявлениями и обнаруженных на РЛИ спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B в апреле–июле 2018 г. Координаты источников (показаны звездочками) установлены по группировке нефтяных пятен на поверхности моря: источник 1: 37°23′00″ с.ш. и 50°24′30″ в.д. (вверху); источник 2: 37°19′30″ с.ш. и 50°29′06″ в.д. (внизу). © ESA, СКАНЭКС.

пании KEPCO); 4) Очевидно, что эти нефтепроявления обусловлены процессами образования и миграции НУ в осадочном комплексе ЮЗ части Каспийского моря, и 5) их источники характеризуются активным режимом с выбросами по оценкам на основе методики определения толщины пленки Bonn Agreement Oil Appearance Code (BAOAC, 2016) до 5–6 т нефти в сутки (подробнее см. Иванов и др. (2007) и Евтушенко и Иванов (2012)).

Кратко остановимся на том, каким образом могут быть получены оценки объемов выбросов. Для определения объемов по данным космической радиолокации применяется подход, в котором площадь пятен измеряется на РЛИ, а толщина

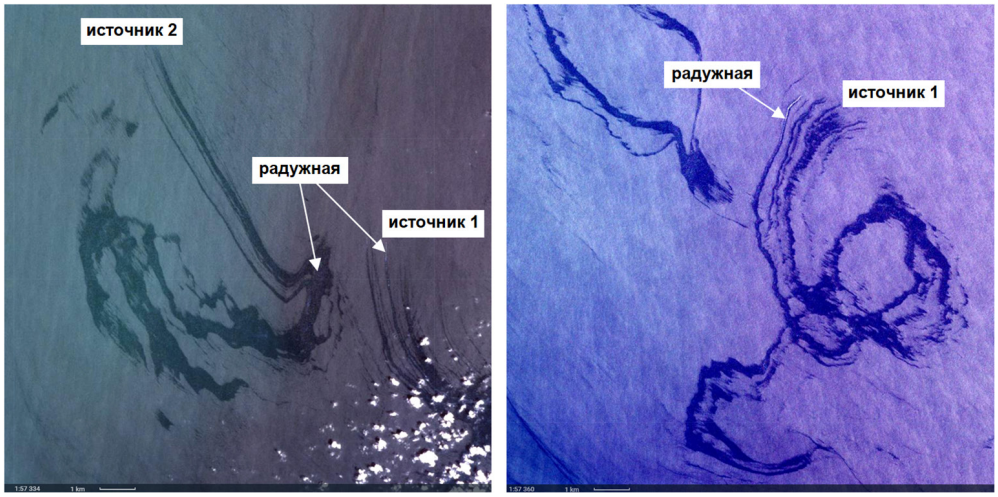

Рис. 4. Цвет пленок естественных нефтепроявлений на оптических снимках ИСЗ Sentinel-2A от 17.06.2018, 07:03 UTC (слева) и 27.06.2018, 16:21 UTC (справа). © ESA.

пленки оценивается из общих физических соображений, связывающих визуальный цвет пленок (в оптическом диапазоне) с их толщинами. Согласно BAOAC (2016), толщина нефтяных пленок в море в общем случае варьирует в широком диапазоне от 0.04×10^{-3} до 200×10^{-3} мм, а цвет визуально – от серебристо-серого (самые тонкие нефтяные пленки) и радужного – до реальных нефтяных цветов. Здесь следует заметить, что данная методика постоянно совершенствуются: в частности, могут быть получены более точные оценки выбросов, если учитывать время существования тонких пленок на поверхности моря, для чего необходимо знать поля ветра и локальных течений во время съемки; это достигается с помощью привлечения подспутниковых измерений или моделирования дрейфа (Daneshgar Asl et al., 2017).

В общем случае пленки грифонного происхождения, согласно ряду исследований (см. MacDonald et al., 1993; de Miranda et al., 2004), имеют радужную окраску

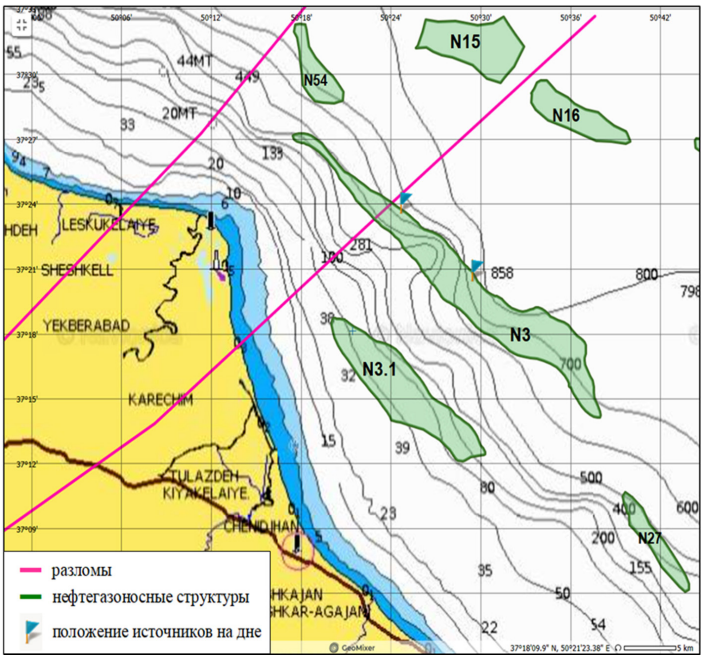

Рис. 5. Окно геопортала с данными батиметрии (webapp.navionics.com) и нефтегазоносности (сейсмосъемка иранского сектора моря в 1999–2000 гг.) с результатами анализа. © Navionics, KEPCO.

в месте всплытия (диапазон толщин пленки 0.3×10^{-3} – 5.0×10^{-3} мм) и серебристо-серый цвет на периферии (диапазон 0.04×10^{-3} – 0.3×10^{-3} мм), что соответствует содержанию нефти в пятне от 40–300 до 300–5000 л/км^2 (BAOAC, 2016). Однако при оценках обычно выбирается пограничное значение в 300 кг/км^2, которое достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными (Проблемы химического загрязнения…, 1989). Таким образом с учетом площади пятен от 0.1 до 19 км^2 были получены оценки выбросов НУ у м. Сефидруд (подробнее см. Ivanov et al., 2019).

В итоге анализ всей совокупности данных позволил установить, что эти источники НУ имеют активный тип, повторяющийся режим и окружены группами сопряженных грифонов, что является свидетельством активных геологических процессов в современной системе накопления и миграции углеводородов Каспийского моря, их нефтепроявления привязаны к выявленной геофизическими методами нефтегазоносной структуре, а объемы выбросов нефти в среднем могут достигать 5–6 тонн в день.

Нефтепроявления в центральной части Баренцева моря

В 2018 г. при анализе результатов мониторинга Баренцева моря, который ведется с 2015 г.; подробнее (см. Иванов и др., 2017; Ivanov et al., 2018) в норвежском секторе моря на РЛИ спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B были обнаружены многочисленные поверхностные нефтепроявления (рис. 6), проинтерпретированные нами как естественные, грифонные. На рис. 7 более детально показано место грифонной активности, установленное по характерной пространственно-временной группировке пятен-сликов на поверхности моря; оно расположено в центральной

Рис. 6. Примеры нефтепроявлений, обнаруженных в одном и том же месте норвежского сектора Баренцева моря на РЛИ спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B. © ESA.

части моря в 232 км к ЮВ от о. Хопен и в 370 км к СВ от о. Медвежий. Нефтепроявления впервые были обнаружены на РЛИ спутника Sentinel-1A от 2 мая 2016 г., а затем − на последующих РЛИ. Всего нефтепроявления были зарегистрированы на 29 РЛИ (на трех, полученных в 2016 г., 11 – в 2017 г. и 15 – в 2018 г.)

На основе вышеописанной методики и анализа совокупности пятен, обнаруженных на разновременных РЛИ в 2016–2018 гг., в веб-картографическом приложении «Геомиксер» (рис. 7, 8), сделан однозначный вывод о наличии группы из трех подводных источников на дне (грифонов или сипов от *англ*. cold seep) и было определено их положение – они расположены в глубоководной части моря на глубине около 345 м в координатах 75°13′с.ш. и 31°45′в.д. (рис. 8). Большая часть пятен-сликов имела линейчатую форму длинами от 1 до 23 км; они появлялись в одном и том же месте моря, группируясь в пространстве и создавая характерные веерные структуры (рис. 7). Площадь пятен в зависимости от ГМУ составляла от 0.2 до 20 км^2.

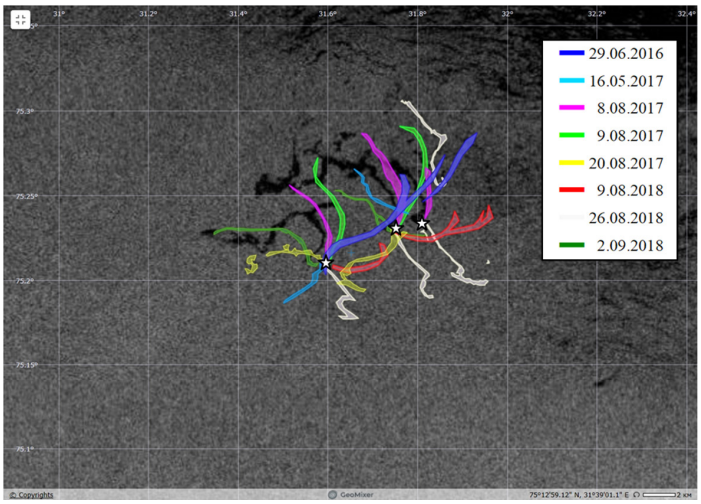

Рис. 7. Пространственно-временная группировка пятен-сликов, обусловленная активностью обнаруженной группы подводных источников НУ (звезды), на фрагменте РЛИ спутника Sentinel-1A от 4.08.2017 (центральная часть моря, норвежский сектор).

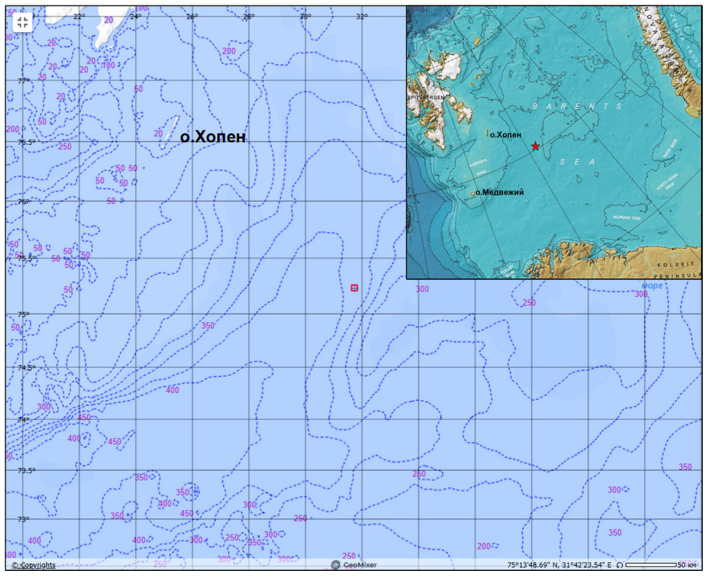

Рис. 8. Положение группы грифонов на обзорной карте Баренцева моря (звездочка на врезке) и на батиметрической карте (красный квадрат); данные © Norgeskart.

Совместный анализ РЛИ и дополнительных данных (батиметрических, навигационных, в том числе данных о затонувших кораблях), также подтвердил, что нефтепроявления, наблюдаемые на поверхности моря в этом районе, могут быть обусловлены процессами накопления и миграции НУ в осадочном комплексе центральной части Баренцева моря,как и в других районах Мирового океана. Дальнейшее исследование обнаруженных нефтепроявлений в настоящее время затруднено из-за отсутствия, во-первых, доступных геолого-геофизических данных на район интереса, а, во-вторых, оптических съемок среднего или высокого разрешения (получению которых мешает частая облачность или полярная ночь), на основе которых можно определить реальный цвет нефтяных пленок, диапазон их толщин и в итоге получить оценки объемов выбросов.

Заключение

На основе анализа радиолокационных изображений, полученных на южную часть Каспийского моря и Баренцево море, исследованы естественные выходы нефти по их проявлениям на поверхности моря. Установлена их связь с подводными источниками и процессами образования, миграции и просачивания нефтеуглеводородов в осадочном комплексе этих морей. На основе анализа пятен, обнаруженных на разновременных РЛИ, полученных в 2016–2018 гг., было определено положение источников на дне, а также ряд их других характеристик.

В частности, результаты исследований в Южном Каспии показали, что в настоящее время обнаружить и исследовать выходы жидких нефтеуглеводородов с помощью спутниковых и сопутствующих геофизических методов не представляет труда. С привлечением доступных геолого-геофизических данных исследованы естественные выходы НУ в прибрежной зоне Ирана, которые находятся на континентальном склоне в границах выявленной структуры Ramsar, в осадочных породах р. Сефидруд и характеризуются активным режимом с выбросами до нескольких тонн нефти в сутки. Естественные нефтепроявления на морском дне, связанные с современными скоплениями нефтеуглеводородов, можно рассматривать не только как один из признаков нефтегазоносности недр, но и как индикатор флюидодинамики Каспийского бассейна в целом. Вполне очевидно, что на основе оценок выбросов нефти могут быть получены общие оценки флюидов (вода и НУ), поступающих в южную часть моря.

В Баренцевом море подводный источник нефти был обнаружен впервые. Место грифонной активности, установленное по характерной пространственно-временной группировке пятен-сликов на поверхности моря, расположено в центральной части моря. Следует заметить, что после запуска европейского спутника Envisat в 2002 г., когда стал возможен радиолокационный мониторинг Баренцева моря, неоднократно предпринимались попытки обнаружить естественные нефетепроявления в море путем анализа распределений пятен-сликов, появляющихся в тех или иных местах акватории (например, этим занималось подразделение европейской компа-

нии Airbus Defence & Space). Однако съемки проводились нерегулярно, а процессу обнаружения часто мешали сильный ветер и волнение. Это стало возможно только с запуском европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B, которые обеспечивают ежедневную радиолокационную съемку акваторий северных морей. Кроме того, в сложных ГМУ полярных морей, когда часто мешает облачность, а поверхностные проявления бывают крайне невыразительными, только космическая радиолокации и ГИС-подход позволяет получить положительный результат. В связи с этим, обнаружение с помощью космической съемки нового источника нефтеуглеводородов в Баренцевом море еще раз подтверждает эффективность применяемого метода.

Работа выполнена при финансовой поддержке российско-иранского и российско-норвежского проектов РФФИ (гранты 17-55-560003 и 18-55-20010). Права копирайт на данные спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B принадлежат Европейскому космическому агентству (ESA). Автор благодарит ГК СКАНЭКС за возможность использования ресурсов геопорталов, созданных на базе веб-ГИС приложения «Геомиксер».

Литература

Голубов Б.Н., Иванов А.Ю. Активизация выбросов нефти из недр Северного и Среднего Каспия в апреле-июне 2012 г. по спутниковым и геолого-геофизическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 2. С. 67–81.

Евтушенко Н.В., Иванов А.Ю. Нефтепроявления в юго-восточной части Черного моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 3. С. 2430.

Иванов А.Ю. Слики и плёночные образования на космических радиолокационных изображениях // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.

Иванов А.Ю. О восстановлении параметров морской среды по данным космических РСА // Исслед. Земли из космоса. 2010а. № 3. С. 77–92.

Иванов А.Ю. Нефтепроявления на поверхности озера Байкал // Исслед. Земли из космоса. 2010б. № 2. С. 75–87.

Иванов А.Ю., Голубов Б.Н., Затягалова В.В. О нефтегазоносности и разгрузке подземных флюидов в южной части Каспийского моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 62–81.

Иванов А.Ю., Голубов Б.Н., Терлеева Н.В. Сравнительный анализ распределения естественных нефтепроявлений в юго-западной части Каспийского моря по данным космической радиолокации с оценкой нефтегазоносности недр // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 6. С. 47–61.

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.

Иванов А.Ю., Терлеева Н.В., Евтушенко Н.В., Кучейко А.Ю., Филимонова Н.А., Кучейко А.А. Основные результаты радиолокационного спутникового мониторинга нефтяных загрязнений Баренцева моря // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2017. № 3. С. 17–32.

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.

Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана. Т. 8. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 208 с.

BAOAC-2016 (Bonn Agreement Oil Appearance Code) // https://www.bonnagreement.org/publications (дата обращения: 15. 01.2019).

Daneshgar Asl S., Dukhovskoy D., Bourassa M., MacDonald I.R. Hindcast modeling of oil slick persistence from natural seeps // Remote Sens. Environ. 2017. Vol. 189. P. 96–107.

De Miranda F.P., Marmol A.M.Q., Pedroso E.C., Beisl C.H., Welgan P., Morales L. Analysis of Radarsat-1 data for offshore monitoring activities in the Cantarell Complex, Gulf of Mexico using the unsupervised semivariogram textural classifier (USTC) // Can. J. Remote Sens. 2004. Vol. 30. No. 3. P. 424–436.

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 s ources // Int. J. Remote Sens. 2018. Vol. 39. No. 13. P. 4484–4498.

Ivanov A.Yu., Gerivani H., Evtushenko N.V. Characterization of natural hydrocarbon seepage in the South Caspian Sea off Iran using satellite SAR and geological data // J. Mar. Georesour. Geotec. 2019. P. 1–12. DOI: 10.1080/1064119X.2019.1600175.

MacDonald I.R., Guinasso N.L.Jr., Ackleson S.G, Amos J.F., Duckworth R., Sassen R., Brooks J. Natural oil slicks in the Gulf of Mexico visible from space // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98. No. C9. P. 16351–16364.

Mityagina M., Lavrova O. Satellite survey of inner seas: Oil pollution in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2016. Vol. 8. P. 875.

Williams A., Lawrence G. The role of satellite seep detection in exploring the South Atlantic's ultra deep water // AAPG Studies in Geology. 2002. No. 48 and SEG Geophysical References Series. 2002. No. 11. P. 327–344.

REMOTE SENSING DETECTION AND ANALYSIS OF OIL SEEPS IN THE CASPIAN SEA AND THE BARENTS SEA

Ivanov A.Yu.

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: ivanoff@ocean.ru
Submitted 31.01.2019, accepted 13.12.2019

By remote sensing methods natural oil seeps and their sources in the southern part of the Caspian Sea off the coast of Iran and in the Barents Sea are studied. It is shown that with the help of a geoinformational approach and additional geological-geophysical information and bathymetric data, it is possible not only to determine their actual position at the bottom, but also to obtain information on their activity, e.g., frequency, volumes of emitted oil, and oil and gas deposits. In addition, this approach allows discovering new seep sources in various seas. It is concluded that the SAR data of the European Sentinel-1 satellites is an excellent material for monitoring and studying natural oil seeping through the observation of oil slicks floating on the sea surface.

Keywords: Caspian Sea, Barents Sea, oil seeps, oil slicks, synthetic aperture radar (SAR), SAR images, geoinformational approach

References

BAOAC-2016 (Bonn Agreement Oil Appearance Code), https://www.bonnagreement.org/publications, (last accessed on 15. 01.2019).

Daneshgar Asl S., Dukhovskoy D., Bourassa M., and MacDonald I.R. Hindcast modeling of oil slick persistence from natural seeps. *Remote Sens. Environ.*, 2017, Vol. 189, pp. 96–107.

De Miranda F.P., Marmol A.M.Q., Pedroso E.C., Beisl C.H., Welgan P., and Morales L. Analysis of Radarsat-1 data for offshore monitoring activities in the Cantarell Complex. Gulf of Mexico using the unsupervised semivariogram textural classifier (USTC). *Can. J. Remote Sens.*, 2004, Vol. 30, No. 3, pp. 424–436.

Evtushenko N.V. and Ivanov A.Yu. Nefteproyavleniya v yugo-vostochnoy chasti Chernogo morya po dannym kosmicheskoy radiolokatsii (Oil seeps in the Southeastern Black Sea studied from space using SAR images). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 3, pp. 24–30.

Golubov B.N., and Ivanov A.Yu. Aktivizatsiya vybrosov nefti iz nedr Severnogo i Srednego Kaspiya v aprele-iyune 2012 po sputnikovym i geologo-geofizicheskim dannym (Activation of oil seeping in the Northern and Middle Caspian Sea in April–June 2012 studied by satellite and geology-geophysical data). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 2, pp. 67–81.

Ivanov A.Yu. Sliki i plonochnyye obrazovaniya na kosmicheskikh radiolokatsionnykh izobrazheniyakh (Slicks and oil films signatures on synthetic aperture radar images). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 3, pp. 73–96.

Ivanov A.Yu. O vosstanovlenii parametrov morskoy sredy po dannym kosmicheskikh RSA (On extraction of marine parameters from spaceborne SAR data). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2010a, No. 3, pp. 77–92.

Ivanov A.Yu. Nefteproyavleniya na poverkhnosti ozera Baykal (Seepage slicks on the surface of Lake Baikal). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2010b, No. 2, pp. 75–87.

Ivanov A.Yu., Golubov B.N., and Zatyagalova V.V. O neftegazonosnosti i razgruzke podzemnykh flyuidov v yuzhnoy chasti Kaspiyskogo morya po dannym kosmicheskoy radiolokatsii (On oil-gas-bearing and unloading of underground fluids in the southern part of the Caspian Sea using synthetic aperture radar images). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 2, pp. 62–81.

Ivanov A.Yu., Golubov B.N., and Terleeva N.V. Sravnitel'nyy analiz raspredeleniya yestestvennykh nefteproyavleniy v yugo-zapadnoy chasti Kaspiyskogo morya po dannym kosmicheskoy radiolokatsii s otsenkoy neftegazonosnosti nedr (Comparative analysis of oil seep slick distribution in the Southern Caspian Sea with estimation of oil-and-gas bearing using satellite SAR images). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 6, pp. 47–61.

Ivanov A.Yu. and Zatyagalova V.V. Kartografirovaniye plenochnykh zagryazneniy morya s ispol'zovaniyem kosmicheskoy radiolokatsii i geograficheskikh informatsionnykh system (Mapping oil spills in marine environment using satellite radar imagery and geographic information systems). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 6, pp. 46–63.

Ivanov A.Yu., Terleeva N.V., Evtushenko N.V., Kucheiko A.Yu., Filimonova N.A., and Kucheiko A.A. Osnovnyye rezul'taty radiolokatsionnogo sputnikovogo monitoringa neftyanykh zagryazneniy Barentseva moray (Main results of radar satellite monitoring the oil pollution of the Barents Sea). *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse*, 2017, No. 3, pp. 17–32.

Ivanov A.Yu., Filimonova N.A., Kucheiko A.Yu., Evtushenko N.V., and 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, pp. 4484–4498.

Ivanov A.Yu., Gerivani H., and Evtushenko N.V. Characterization of natural hydrocarbon seepage

in the South Caspian Sea off Iran using satellite SAR and geological data. *Mar. Georesour. Geotec.*, 2019, pp. 1–12, doi: 10.1080/1064119X.2019.1600175.

Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., and Kostianoy A.G. Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk. Moscow, SRI RAS, 2016. 335 p.

MacDonald I.R., Guinasso N.L. Jr., Ackleson S.G., Amos J.F., Duckworth R., Sassen R., and Brooks J. Natural oil slicks in the Gulf of Mexico visible from space. *J. Geophys. Res.*, 1993, Vol. 98, No. C9, pp. 16351–16364.

Mityagina M. and Lavrova O. Satellite survey of inner seas: Oil pollution in the Black and Caspian Seas. *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, p. 875.

Problemy khimicheskogo zagryazneniya vod Mirovogo okeana. (Problems of chemical pollution of the World ocean), Vol. 8. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989, 208 p.

Williams A. and Lawrence G. The role of satellite seep detection in exploring the South Atlantic's ultra deep water. *AAPG Studies in Geology*, 2002, No. 48, and *SEG Geophysical References Series*, 2002, No. 11, pp. 327–344.