

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЯ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

© 2012 г. Н. В. Евтушенко^{1, 2}, А. Ю. Иванов^{2*}

¹Инженерно-технологический центр “СКАНЭКС”, Москва

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва

*E-mail: ivanoff@ocean.ru

Поступила в редакцию 03.06.2011 г.

Одна из задач, которая решалась в ходе мониторинга нефтяных загрязнений в Черном море, — исследование естественных нефтепроявлений; два из них находятся в юго-восточной части моря (грузинский сектор). В архивах Европейского космического агентства и Инженерно-технологического центра “СКАНЭКС” было обнаружено большое количество радиолокационных изображений (РЛИ) спутников ERS-1/2, Envisat и Radarsat-1, на которых отобразились грифонные пятна нефти на поверхности моря. Обработка РЛИ в сочетании с геоинформационным подходом выявила однозначную связь этих пятен с очагами разгрузки нефти на структурах осадочного чехла в юго-восточной части Черного моря. Анализ РЛИ позволил получить ряд новых сведений об этих нефтепроявлениях — с учетом детальных батиметрических данных определено положение основных источников на дне, получены оценки объемов естественных выбросов нефти.

Ключевые слова: естественные нефтепроявления, спутниковый мониторинг, радиолокационные изображения, Черное море

ВВЕДЕНИЕ

О том, что в Черном море есть газ и нефть, стало известно в 1972 г. В настоящее время Черное море считается одним из важных источников нефтеуглеводородов, главным образом газа (Kruglyakova et al., 2004; Judd, Novland, 2007; Круглякова и др., 2009). С середины 1980-х годов в различных частях моря активно идут поиски как естественных источников углеводородов, так и их месторождений. Ряд из них хорошо известен, — например, естественные выходы метана в шельфовых водах Украины и Болгарии (Круглякова и др., 2009; Judd, Novland, 2007). Однако менее известны и исследованы естественные выходы нефти. Так, по данным Kruglyakova et al. (2004), Кругляковой и др. (2011) и Judd, Novland (2007), один из них находится в турецких водах (мористее г. Ризе), а ряд других — в грузинском секторе Черного моря.

Осадочный чехол восточной части материкового склона и впадины Черного моря сложен осадочными породами (Круглякова и др., 2009). Полагают, что здесь нефть формируется в осадках нижнего комплекса глубоководной части моря, где условия благоприятны для нефтегазообразования. Вполне очевидно, что нефть может разгружаться в водную толщу моря через проницаемые зоны различных геологических структур и их нарушений. Нефть и газ, образованные в продук-

тивных осадках, сначала поступают в район дна, а затем на поверхность моря. В таких местах на дне часто имеются грифоны, сипы или грязевые вулканы, нефтеуглеводороды из которых с той или иной периодичностью выделяются в виде капель или пузырьков газа. Газ, достигнув поверхности моря, уходит в атмосферу, а нефть, скапливаясь и растекаясь на ней, образует многокилометровые пятна (слики), которые видны из космоса (рис. 1).

Очевидно, что применение методов дистанционного зондирования для исследования нефтепроявлений Черного моря представляет большой интерес. Наш выбор остановился на космической радиолокационной (РЛ) съемке, которая в настоящее время позволяет получать информацию о ряде явлений, наблюдаемых в морях и прибрежных зонах, в том числе о нефтяных загрязнениях. Хорошо также известно, что космическая радиолокация позволяет наблюдать грифонные нефтяные пятна на поверхности моря (Иванов, 2007; Иванов и др., 2007). В настоящее время РЛ средства наблюдения, такие, как радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) на ИСЗ Envisat и Radarsat-1, обеспечивают регулярное получение подобной информации в различных частях Мирового океана благодаря всепогодности, а также возможности получения практически мгновенных картин распределения нефтяных пятен в пространстве (Иванов, 2007).

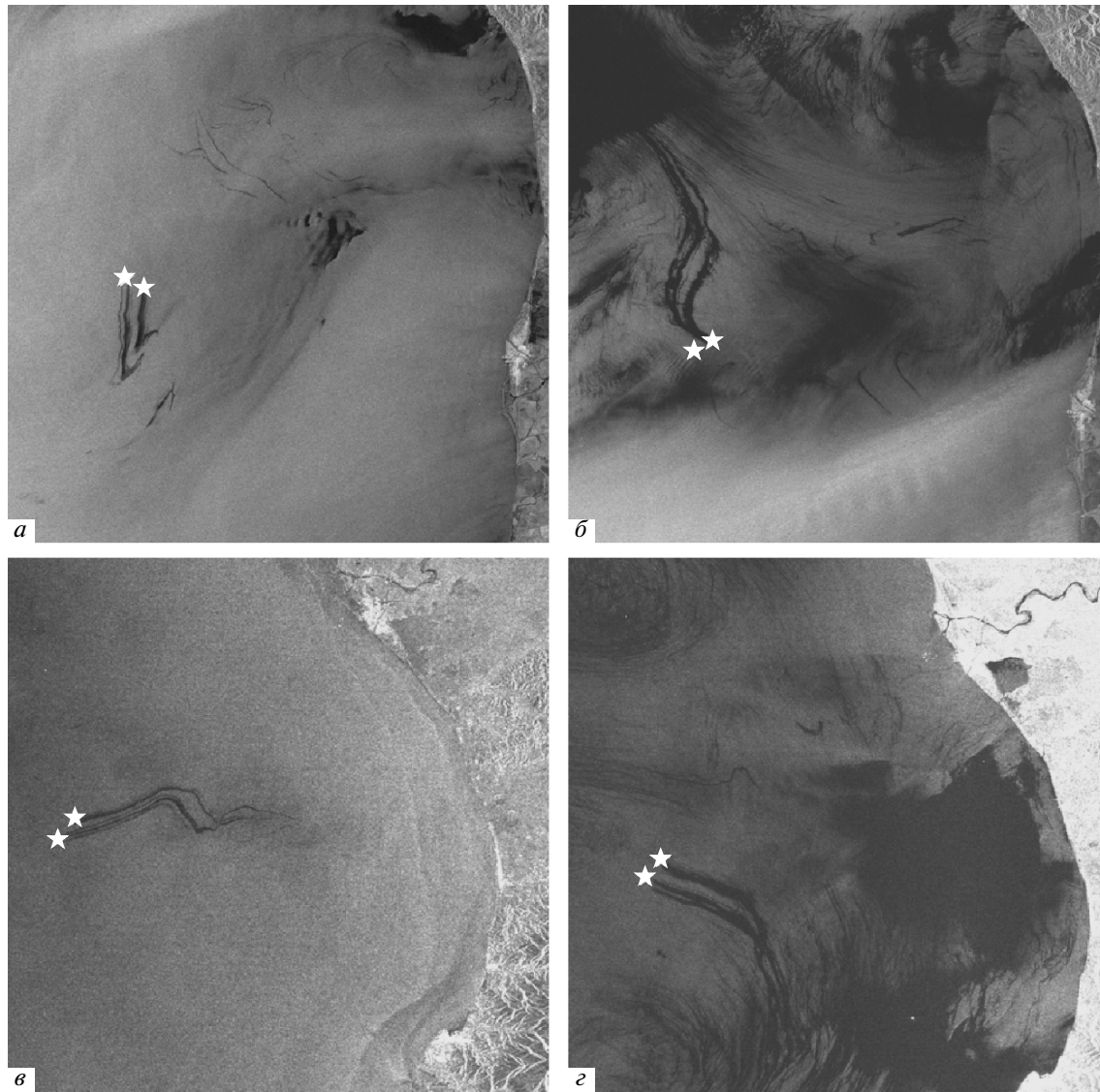


Рис. 1. Фрагменты РЛИ (70 × 70 км) с грифоновыми пятнами (двойные-тройные сигнатуры; звездочками показано положение источников): *a* – ERS-2 от 22.12.1998 (19:28 UTC), *б* – ERS-2 от 13.08.2002 (19:27 UTC), *в* – Envisat от 6.05.2011 (07:32 UTC) и *з* – Envisat от 17.05.2011 (07:31 UTC). © ESA, ИТЦ СКАНЭКС.

Естественные источники нефти в грузинском секторе юго-восточной (ЮВ) части Черного моря мористее г. Потти известны давно (Kruglyakova et al., 2004; Judd, Novland, 2007), причем Judd, Novland классифицировали их как нефтевыделяющие сипы (англ. oil seep), что предполагает наличие пятен нефти над ними на морской поверхности. Экспедиционные исследования здесь выполнялись главным образом с судов в 2004, 2005, 2007, 2010 и 2011 гг. С помощью акустической съемки и отбора проб грунта было установлено положение геологических структур на дне, а также газовых сипов, с ними связанных (Wagner-Friedrichs et al., 2011). Первым космическим снимком этого нефтепроявления следует считать радиолокационное изображение (РЛИ), получен-

ное в декабре 1993 г. Спутниковые РЛ-наблюдения 2009–2011 гг. показали, что на этом участке моря грифоновые пятна появляются с завидной регулярностью – практически на каждом РЛИ, полученном при ветре, не превышающем 5–6 м/с. С проявлением широкого доступа к данным ДЗЗ, в частности, к архивам РЛИ, полученных, в рамках мониторинга Черного моря, проводимого ИТЦ “СКАНЭКС”, появилась возможность исследовать его более детально.

Помимо чисто научно-исследовательских задач (MacDonald, 1998), важность изучения подводных грифонов и сипов заключается еще и в том, что, помимо индикации нефтегазоносности, они являются еще и источниками постоянного естественного “загрязнения” соответствующих

Параметры съемок и оценки объемов выбросов на основе площади пятен, измеренной на РЛИ, и данных о толщине пленки из (Bonn Agreement..., 2009)

Спутник/Дата	Время, UTC	Суммарная площадь, км ²	Оценки объемов, м ³			
			Серебристо-серая пленка, толщина 0.04×10^{-3} мм		Радужная пленка, толщина 0.3×10^{-3} мм	
			в день	в год	в день	в год
ERS-1/26.12.1993	19:31	9.6	0.38	138.7	2.88	1051.2
ERS-2/31.03.1996	19:31	41.1	1.64	598.6	12.33	4500.5
ERS-2/22.12.1998	19:28	19.9	0.8	292.0	5.97	2179.1
ERS-2/26.10.1999	07:59	21.7	0.9	328.5	6.51	2376.2
ERS-2/20.12.2000	07:59	20.8	0.87	317.6	6.24	2277.6
ERS-2/13.08.2002	19:27	64.3	2.57	938.1	19.29	7040.9
Radarsat-1/28.10.2008	03:27	2.3	0.09	32.9	0.69	251.9
Envisat/13.09.2010	07:32	48.1	1.92	700.8	14.43	5267.0
Envisat/18.10.2010	07:31	58.5	2.34	854.1	17.55	6405.8
Radarsat-1/27.03.2010	15:19	6.7	0.27	98.6	2.01	733.7
Envisat/09.11.2010	19:12	18.9	0.76	277.4	5.67	2069.6
Radarsat-1/03.03.2011	15:17	7.9	0.32	116.8	2.37	865.1
Radarsat-1/10.04.2011	15:10	56.5	2.26	824.9	16.95	6186.8
Envisat/19.04.2011	19:12	2.3	0.09	32.9	0.69	251.9
Radarsat-1/21.04.2011	03:31	23.8	0.95	346.8	7.10	2591.5
Envisat/06.05.2011	07:31	35.4	1.42	518.3	10.62	3876.3
в среднем		27.4	1.1	401.0	8.2	2995.2

акваторий, которое необходимо знать и учитывать в частных и общих оценках (Kvenvolden, Cooper, 2003).

В данном сообщении представлены результаты исследования нефтепроявлений в ЮВ части Черного моря, проведенного на основе анализа РЛ-данных, полученных РЛ-спутниками.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ, ИХ ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ

РЛИ спутников ERS-1, ERS-2 и Envisat на район интереса за 1993–2008 гг. были получены из Европейского космического агентства (ESA), а за 2009–2011 гг., включая РЛИ Radarsat-1, – из ИТЦ “СКАНЭКС” в виде стандартных продуктов SAR_PRI, ASA_IMP, ASA_WSM и SNA с размером кадра 100×100 , 400×400 км или 300×300 км соответственно, с оригинальным пространственным разрешением 25, 50 и 150 м, вертикальной (ERS-1/2 и Envisat) и горизонтальной (Radarsat-1) поляризацией сигнала. Из более чем 70 доступных РЛИ с нефтепроявлениями было обработано и детально проанализировано 16 наиболее характерных (см. таблицу). На рис. 1 приведены фрагменты четырех РЛИ со сликами-пятнами. Для оценки гидрометеорологических условий (ГМУ) были собраны доступные сведения о скорости ветра, которая во

время съемок варьировала от 2 до 7 м/с, в среднем не превышая 3–4 м/с, что, в целом, создавало благоприятные условия для наблюдения нефтяных пятен.

Для анализа и исследования нефтепроявлений, обнаруженных примерно в одном и том же месте на разновременных РЛИ, использовались методика, применявшаяся в ряде публикаций (Иванов и др., 2007; Иванов, Затягалова, 2008; Иванов, 2010б), и, в частности, геоинформационный подход (Иванов, Затягалова, 2007). С помощью последнего были исследованы и даже открыты естественные источники нефти в Каспийском море (Иванов и др., 2007), на северо-восточном шельфе о. Сахалин (Иванов, Затягалова, 2008; Иванов, 2010а) и в оз. Байкал (Иванов, 2010б). Обработка РЛИ проводилась по стандартной схеме и включала: радиометрическую коррекцию, сглаживание спекл-шума, геометрическую коррекцию по орбитальным данным, географическую привязку изображений к цифровой карте и, наконец, интерактивную интерпретацию РЛИ с выделением/векторизацией темных пятен (сликов) с учетом окружающей обстановки и присутствия сликоподобных явлений иной природы. В частности, идентификация обнаруженных сликов происходила по их форме и размерам, степени кластеризации (повторяемости во времени и

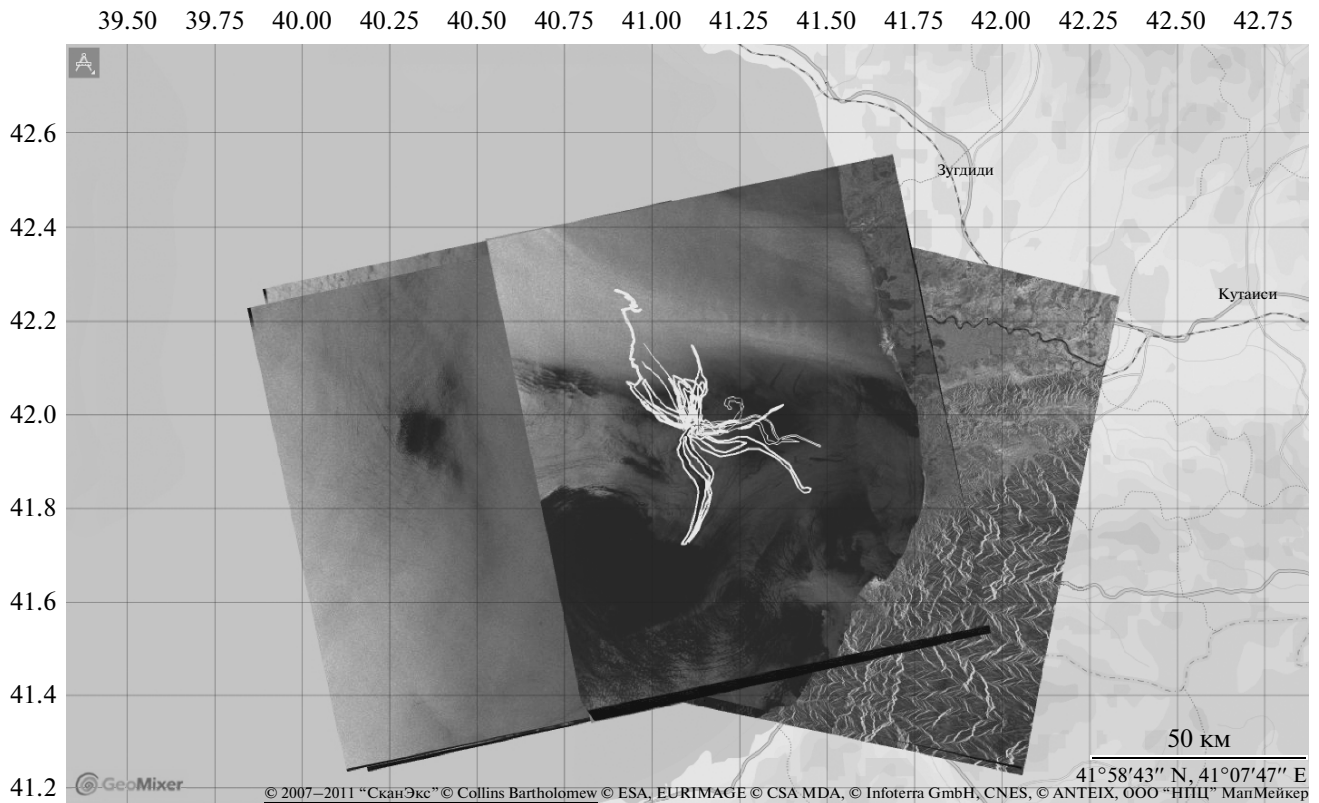


Рис. 2. Анализ РЛИ с помощью веб-картографического сервиса “Геомиксер”; белыми линиями показаны нефтяные пятна, дрейфующие в разные стороны от места всплытия под действием ветра и течений.

пространстве), наличию двойных-тройных сигнатур, и, самое главное, по их геопространственной привязке к достоверно известному источнику на дне. Более того, имея значительно большую толщину, чем биогенные пленки, грифонные пятна существуют на поверхности моря в более широком диапазоне скоростей ветра – до 6–8 м/с, т.е. наблюдаются и тогда, когда биогенные пленки уже исчезли с поверхности (более подробно, как идентифицируют грифонные пятна, см. (Иванов, 2007)). На заключительном этапе обработки сами РЛИ, векторные слои пятен и необходимая для анализа информация объединялись с помощью веб-картографического сервиса “Геомиксер”, разработанного в ИТЦ “СКАНЭКС” приложения, позволяющего размещение и интерактивный анализ геопространственных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице и на рис. 2, 3 представлены основные результаты, полученные в ходе исследования. Анализ совокупности пятен в “Геомиксере” (рис. 2, 3) позволил выделить и измерить площади пятен, определить координаты мест всплытия нефти на поверхности, периодичность работы и оценить объемы выбросов.

Положение подводных источников может быть установлено путем анализа мест всплытия пятен нефти (их координат) на всех полученных РЛИ. Опыт работы с РЛ-данными показывает, что в целом точность географической привязки РЛИ составляет $\pm 15\text{--}20$ м. Однако это не равносильно точности привязки пятна к его подводному источнику, которая зависит от ряда факторов. Подповерхностные и поверхностные течения, которые сначала отклоняют восходящую струю пузырьков/капель нефти от вертикали, а затем переносят слик по поверхности моря – один из важных источников погрешностей. При средней скорости подъема пузырьков газа в оболочке нефти 15–25 см/с и наличии течений место появления нефти на поверхности может сместиться на сотни метров относительно положения источника на дне (Иванов и др., 2007). В связи с этим используют совокупность разновременных слик, которая с большей точностью маркирует источник на дне, чем единичное пятно (Иванов и др., 2007; Иванов, Затягалова, 2008; Иванов, 2010а; 2010б).

Координаты места образования (всплытия) пятен на поверхности были также получены в “Геомиксере”. 23 слик на 16 изображениях, ве-

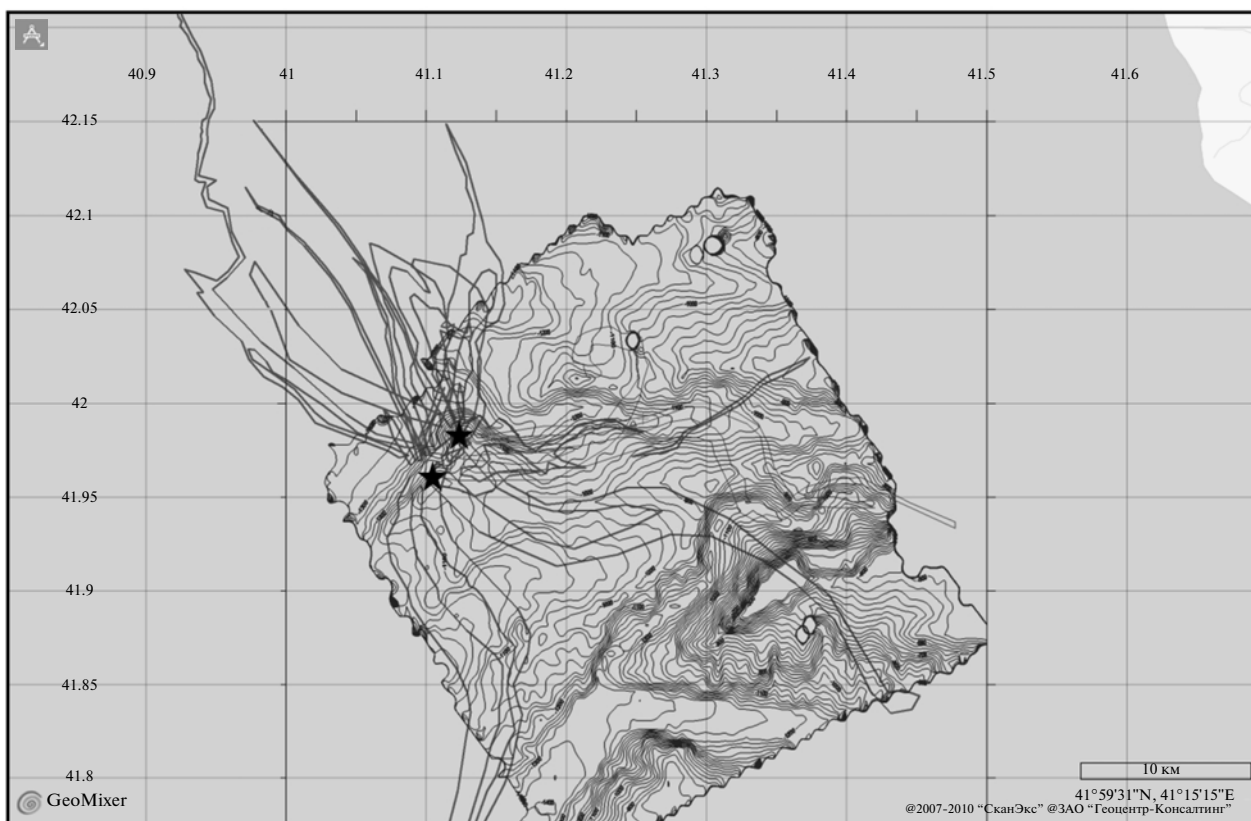


Рис. 3. Анализ пятен, обнаруженных на РЛИ, совместно с данными батиметрии (изобаты проведены через 50 м). Локальные возвышения дна (г. Печори и г. Колхети – звездочки), расположенные на глубинах 1050 и 1150 м с координатами $41^{\circ}58'59''$ с.ш., $41^{\circ}07'25''$ в.д. и $41^{\circ}58'10''$ с.ш., $41^{\circ}06'15''$ в.д., являются подводными источниками нефти; батиметрические данные предоставлены IFM-GEOMAR.

ром расходящиеся от мест всплытия (рис. 2), с точностью практически до минут определяют их положение. Для привязки центров всплытия пятен к подводным источникам использовалась детальная карта подводной топографии с разрешением 50 м, построенная по данным эхолотации и любезно предоставленная I. Klaucke из IFM-GEOMAR (Klaucke et al., 2006). С ее помощью можно установить координаты подводных источников нефти, привязав их к положительным формам рельефа дна (рис. 3).

Совмещение в геоинформационной системе (ГИС) точек всплытия нефти по данным радиолокации с детальными батиметрическими данными показало, что в этом месте на дне расположены две положительные формы рельефа – купола г. Печори и Колхети, которые, очевидно, и являются источниками выбросов нефти, и что подтверждают данные независимых исследований (Klaucke et al., 2006; Preliminary results..., 2010; Wagner-Friedrichs et al., 2011). Кроме того, на РЛИ в этом районе был обнаружен ряд пятен меньших размеров (рис. 1а, б, в), приуроченных к второстепенным структурам, что говорит о наличии других естественных источников нефти.

На многих РЛИ видны двойные или даже тройные сигнатуры пленочных slickов (рис. 1). Их образование можно объяснить наличием на дне двух–трех близко расположенных источников (т.е. г. Печори и Колхети), образующих группу, выбрасывающую нефть и газ в синхронном режиме.

Анализ РЛИ Envisat и Radarsat-1, полученных в 2009–2011 гг., показал высокую частоту появления пятен, иногда даже ежедневную, из чего сделано заключение о постоянстве работы источников. Это также подтверждается наличием выходов газа, которые регистрируются над данными структурами каждой экспедицией (Klaucke et al., 2006; Wagner-Friedrichs et al., 2011).

Для определения объемов разливов по данным космической радиолокации применяется косвенный подход, в котором по площади пятен на РЛИ имеется возможность оценки объемов разлива (de Miranda et al., 2004; Иванов и др., 2007). Для решения этой задачи необходимо знать толщину пленки, которую можно получить из физических соображений, связывающих визуальный цвет пленок с их толщинами. Согласно Bonn Agreement (2009), толщина нефтяных пленок в общем случае

варьирует в широком диапазоне от 0.04×10^{-3} до 200×10^{-3} мм, а цвет (окраска) визуальнo – от радужного до серебристо-серого.

Пленки грифонного происхождения, согласно (MacDonald et al., 1993; MacDonald, 1998), имеют радужную окраску в месте всплытия (толщина пленки 0.3×10^{-3} – 5.0×10^{-3} мм) и серебристо-серый цвет на периферии (толщина пленки 0.04×10^{-3} – 0.3×10^{-3} мм), что соответствует содержанию нефти от 40–300 до 300–5000 л/км² в этих пятнах (Bonn Agreement..., 2009). Однако при оценках обычно выбирают пограничное значение в 300 кг/км², которое достаточно хорошо согласуется с экспериментальными оценками (300–350 кг/км²) и совпадает с данными наблюдений (Проблемы химического загрязнения..., 1989).

Исходя из того факта, что один квадратный километр акватории моря, покрытой пленкой, может содержать до 300–350 кг нефти (Проблемы химического загрязнения..., 1989; Bonn Agreement..., 2009), а время существования пятна на морской поверхности составляет 12–24 ч, можно получить оценки активности подводных источников в грузинском секторе моря. С учетом значений толщин пленки 0.04×10^{-3} и 0.3×10^{-3} мм и площадей пятен от 2.3 до 64.3 км², которые, очевидно, зависят как от ГМУ, так и от времени растекания нефти на поверхности, получаем минимальные и максимальные оценки (таблица). Эти оценки могут охарактеризовать естественные выбросы нефти в количестве от 1 до 8 м³ в день или от 400 до 3000 м³ нефти в год (в случае постоянной ежедневной активности). Тем не менее средние значения (последняя строка таблицы) более реально характеризуют существующее положение дел. Кроме того, с учетом плотности нефти пересчет полученных объемов в м³ в массу в тоннах даст на 10% меньшие значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа РЛИ с помощью геоинформационного подхода установлена связь естественных проявлений нефти, наблюдаемых на поверхности моря, с процессами образования и миграции углеводородов в осадочном комплексе ЮВ части Черного моря. На основе анализа пятен, обнаруженных на 16 разновременных РЛИ, полученных в период с 1993 по 2011 г., было определено положение основных источников на дне. По РЛ-данным, они расположены в точках с координатами 41°58'59" с.ш., 41°07'25" в.д. и 41°58'10" с.ш., 41°06'15" в.д. на глубинах около 1050 и 1150 м и связаны с активностью сипов гг. Печори и Колхети. Режим выбросов, судя по частоте появления пятен на РЛИ, особенно в 2011 г., близок к постоянному.

Такая природная инфильтрация нефти представляет собой одну из характерных особенностей этой части Черного моря. По оценкам на основе РЛ-данных, разгрузка пластовых нефтей в ЮВ части моря только от данных источников, с учетом постоянного истечения, может обеспечивать поставку в среднем от 1 до 8 т в день или от 400 до 3000 т нефти в год. Максимально возможные оценки объемов естественных выбросов нефти из недр в этом месте, по данным космической радиолокации, составляют 7 тыс. т нефти в год. Эти оценки следует рассматривать как предварительные, они нуждаются в экспериментальной проверке. Пятна, приуроченные к второстепенным структурам, и их источники также представляют интерес и требуют дальнейших исследований дистанционными методами.

РЛ-данные, использованные в работе, были получены в рамках проектов ESA C1P.3424, C1P.8611 и предоставлены ИТЦ “СКАНЭКС”. Авторы признательны специалистам ESA и руководству ИТЦ “СКАНЭКС” за возможность их использования. Авторы благодарят I. Klaucke из IFM-GEOMAR (Leibniz Institute of Marine Sciences) за данные цифровой батиметрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иванов А.Ю. Стики и пленочные 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. № 5. С. 77–92.
- Иванов А.Ю. Нефтепроявления на поверхности озера Байкал // Исслед. Земли из космоса. 2010б. № 3. С. 75–87.
- Иванов А.Ю., Голубов Б.Н., Затыгалова 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., Затыгалова 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., Затыгалова В. Радиолокационный мониторинг мест установки и транспортировки морской платформы // Oil & Gas J. Russia. 2008. № 3. С. 61–70.
- Круглякова Р.П., Кругляков 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.
- Круглякова Р.П., Кругляков В.В., Шевцова Н.Т. Естественные выходы нефти и газа на дне турецкого континентального склона Черного моря / Тр. XIX Межд. науч. конф. по морской геологии. М.: ИО РАН, 14–18 ноября 2011. Т. 2. С. 57–60.

Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана. Т. 8. Методы и средства борьбы с нефтяным загрязнением вод Мирового океана. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 208 с.

Bonn Agreement Aerial Operations Handbook, 2009 ([http://www.bonnagreement.org/eng/doc/Bonn Agreement Aerial Operations Handbook.pdf](http://www.bonnagreement.org/eng/doc/Bonn%20Agreement%20Aerial%20Operations%20Handbook.pdf)).

de Miranda F.P., Marmol A.M.Q., Pedrosa E.C., et al. 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. Rem. Sens.* 2004. V. 30. № 3. P. 424–436.

Judd A., Hovland M. Seabed fluid flow. The impact on geology, biology and the marine environment. Cambridge Univ. Press, 2007. 475 p.

Klaucke I., Sahling H., Weinrebe W., et al. Acoustic investigation of cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea // *Marine Geology*. 2006. V. 231. P. 51–67. doi:10.1016/j.mar-geo.2006.05.011.

Kruglyakova R.P., Byakov Y.A., Kruglyakova M.V., et al. Natural oil and gas seeps on the Black Sea floor // *Geo-Mar. Lett.* 2004. V. 24. № 3. P. 150–162.

Kvenvolden K.A., Cooper C.K. Natural seepage of crude oil into the marine environment // *Geo-Mar. Lett.* 2003. V. 23. P. 140–146.

MacDonald I.R. Natural oil spills // *Sci. American*. 1998. V. 279. № 50. P. 51–66.

MacDonald I.R., Guinasso N.L. Jr., Ackleson S.G., et al. Natural oil slicks in the Gulf of Mexico visible from space // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. № C9. P. 16351–16364.

Preliminary results of the Black Sea SAR project. USA National Energy Technology Laboratory, 2010 (http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/2010Reports/NT0005638_QPROct-Dec2010.pdf).

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.

Oil Seeps in the Southeastern Black Sea Studied from Space Using SAR Images

N. V. Evtushenko^{1,2}, A. Yu. Ivanov²

¹Research and Development Center “ScanEx”, Moscow

²P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow

One of the problems, being solved during the monitoring of oil pollution in the Black Sea, was a study of natural seepage. Two of the known oil seeps are located in the south-east section, Georgian sector, from which crude oil comes into the marine environment. The archives of European Space Agency and Research and Development Center “ScanEx” have a considerable quantity of synthetic aperture radar (SAR) images acquired in period 1993–2011 by the ERS-1/2, Envisat and Radarsat-1 satellites, on which seep oil slicks are clearly visible in this region. Processing of the collected SAR images with detected slicks in combination with geo-information approach has revealed a link of these slicks with the bottom sources on the local sedimentary structure in the Southeast Black Sea; their analysis provide both a new insight into this phenomenon and new information to help understand nature of these oil seeps. On the basis of analysis of collected SAR images and detailed bathymetric data information on the source positions on the bottom and estimates of oil volumes entering the sea surface are obtained.

Keywords: oil seeps, satellite monitoring, SAR images, Black Sea