

УДК 528.88+551.465

DOI: <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2018-3-125-136>

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛЕНОК ЕСТЕСТВЕННЫХ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ*

М.И. Митягина

Институт космических исследований РАН. Москва

В работе представлены результаты исследований, направленных на оценку пространственно-временной изменчивости загрязнения морской поверхности, обусловленного естественными выходами углеводородов с морского дна. Проанализированы многолетние ряды данных дистанционного зондирования из космоса. Исследованы относительные вклады приповерхностного ветра и поверхностных течений на дрейф, распространение, эволюцию и время жизни нефтяных slickов. Показано, что при умеренных ветрах нефтяные плёнки естественного происхождения могут распространяться на расстояния до 50 км от точки всплытия и сохраняться на поверхности вплоть до 48 часов, являясь индикатором для выявления структуры поверхностных течений в районе интереса. Построена карта нефтяного загрязнения поверхности Чёрного моря в районе континентального склона вблизи побережья Грузии, позволяющая оценить вероятность загрязнения различных участков морской поверхности.

***Ключевые слова:** Чёрное море, спутниковое дистанционное зондирование, спутниковая радиолокация, морская поверхность, нефтяное загрязнение, естественные нефтепроявления.*

Повышенный уровень загрязнения морской поверхности плёнками сырой нефти обусловлен двумя основными причинами. Одной из причин является хозяйственная деятельность человека, связанная с добычей, транспортировкой, очисткой, хранением и использованием нефти. Примером может служить разлив нефти в море, вызванный сбоями в спроектированных человеком транспортных системах, таких как танкеры и трубопроводы, которые предназначены для перемещения сырой нефти. Второй причиной являются естественные выходы нефти с морского дна. Естественные выходы нефти с морского дна

* Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Мониторинг», госрегистрация № 01.20.0.2.00164

географически широко распространены и выделяют нефть из недр на поверхность в течение длительных промежутков геологического времени. Согласно недавним оценкам [14] можно предположить, что в настоящее время 47% сырой нефти, поступающей в Мировой Океан, обусловлено естественными выходами с морского дна, а 53% являются результатом утечек и разливов во время добычи, транспортировки, переработки, хранения и промышленного использования нефти.

Просачивающаяся с морского дна нефть, достигая поверхности, формирует на ней тонкую пленку - нефтяной слик, дрейф и растекание которого определяются совместным воздействием ветра и поверхностных течений.

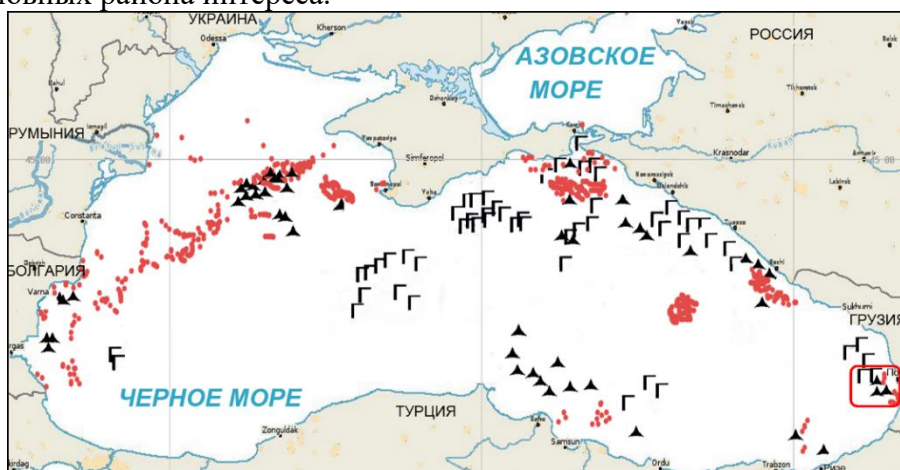
Используемые данные

Основным средством выявления на морской поверхности нефтяных пленок как природного, так и антропогенного происхождения, и оценки степени загрязненности, являются установленные на искусственных спутниках Земли радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА). Эти сенсоры обладают возможностью круглосуточной работы благодаря использованию активного зондирования, причём характеристики изображения не зависят от освещенности и возможностью всепогодной съёмки, т.к. атмосфера практически прозрачна для используемого РСА микроволнового излучения. В основе метода спутникового мониторинга загрязнения морской поверхности лежит возможность выявления пленочных сликков методами спутниковой радиолокации. Наличие поверхностной пленки приводит к понижению интенсивности волно-ветрового взаимодействия и к затуханию резонансной гравитационно-капиллярной компоненты поверхностного волнения, вследствие чего пленочные сликки проявляются на радиолокационном изображении (РЛИ) как области пониженного рассеяния, которые могут служить индикаторами загрязнения поверхности [10, 1]. Высокое пространственное разрешение современных космических РСА позволяет с необходимой точностью детектировать нефтяные загрязнения даже относительно небольшого размера и оценивать их параметры. Экспериментальную основу работы составляют данные РСА ИСЗ Envisat (до 2012 г.) и РСА ИСЗ Sentinel-1A;1-B 9 (начиная с октября 2014 и сентября 2016 соответственно). Кроме того, к исследованию привлекались данные многоспектральных сенсоров оптического диапазона - MSI ИСЗ Sentinel-2A, сканирующих радиометров ETM+ Landsat-7 и OLI/TIRS Landsat-8; спектрометрических MODIS ИСЗ Terra/Aqua [7, 8]. Естественные нефтепроявления отчетливо проявляются и на изображениях цветосинтезированных по данным сенсоров оптического диапазона, проявляясь как характерные радужные структуры повышенной яркости, окруженные темным ореолом. Однако для этих сенсоров существенными ограничивающими факторами

являются требования к освещённости и отсутствию облачности, благодаря чему они проигрывают радиолокационным данным, когда речь идёт о ежедневном круглогодичном мониторинге и накоплении статистических данных. Использование оптических изображений, особенно полученных в зоне солнечного блика, зачастую помогает разрешить неоднозначности в интерпретации радиолокационных данных и уточнить природу плёнок, формирующих слики, относя их к классам нефтяных или биологических плёнок [8].

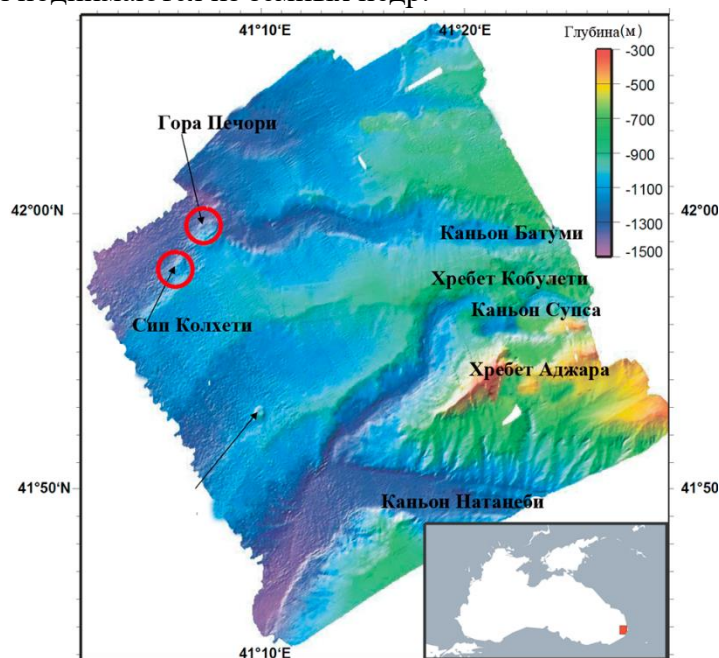
Район интереса

В последние годы появился целый ряд публикаций, посвящённых грязевому вулканизму, естественным газо- и нефтепроявлениям и газогидратам в Чёрном море. Согласно опубликованным результатам серий натурных экспериментов, проводившихся с 1993 г. по настоящее время, в Чёрном море обнаружены струйные газовыделения и холодные метановые сипы по периметру свала глубин и в глубоководной части, а также районы локализации глубоководных грязевых вулканов [3, 4, 5, 11]. Естественные выходы метана и грязевый вулканизм обнаруживаются в Чёрном море практически повсеместно, тогда как естественные выходы нефти с морского дна Чёрного моря встречаются достаточно редко. В частности, естественные выходы нефти на поверхность моря наблюдаются на турецком шельфе вблизи г. Ризе и в грузинском секторе Чёрного моря в районе Поти-Батуми [2, 9, 13]. На рис. 1 приведена карта-схема различных типов выходов с морского дна углеводородов, составленная на основе обобщения данным публикаций различных научных групп. Красными прямоугольниками выделен основных района интереса.



Р и с.1. Карта-схема распределения естественных выходов углеводородов со дна Черного моря. Красные точки – метановые выделения. Черные треугольники – выходы нефти и газа на поверхность. Г – грязевые вулканы

В связи с повышенным интересом к естественным выходам углеводородов с морского дна, с 1993 г. в грузинском секторе Чёрного моря ведутся экспедиционные работы. Ряд исследований проводился в рамках международных проектов, участниками которых были исследователи как из причерноморских, так и из других европейских государств [3, 12, 16, 17]. По данным акустического зондирования была построена числовая модель рельефа дна в этом районе [15]. На основе этой модели показано, что существуют два конусообразных поднятия: диапировая гора Печори, диаметром 2–2,5 км и высотой 75 м и диапир у сипа Колхети диаметром 1,4 км и высотой 20 м (см. рис. 2). Внутри этих конусообразных возвышений проходят питающие каналы, по которым углеводороды поднимаются из земных недр.



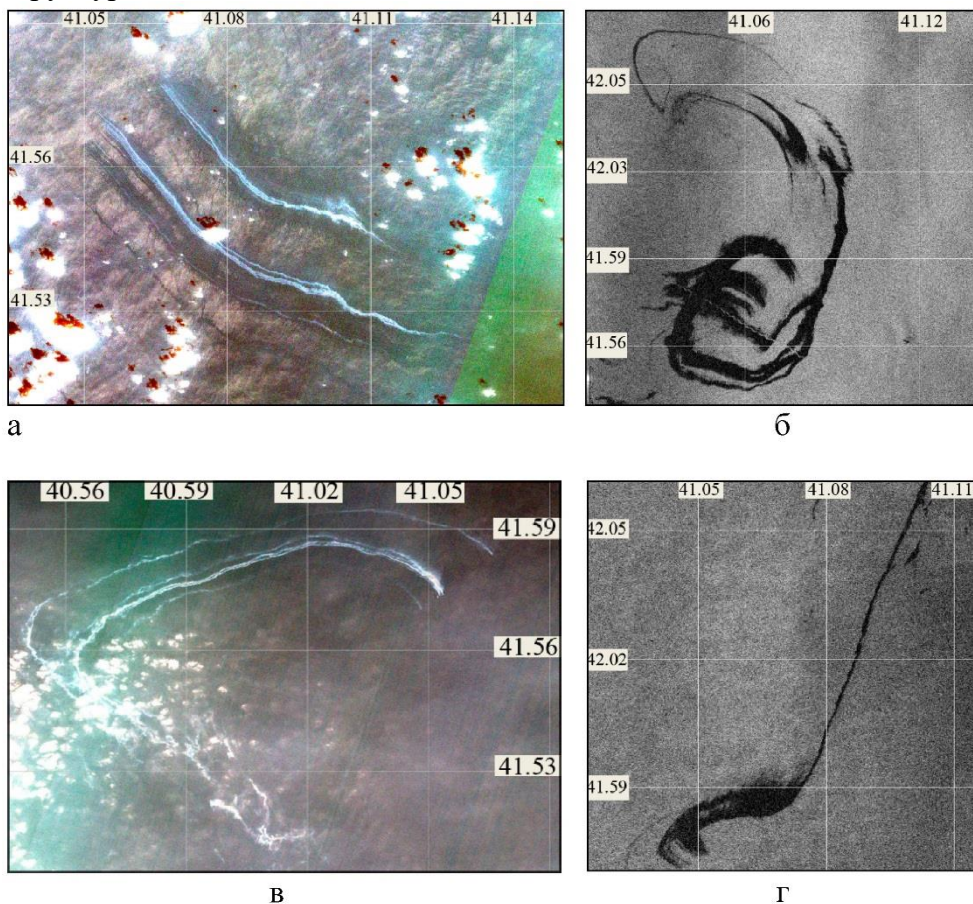
Р и с. 2. Батиметрическая карта морского дна в грузинском секторе Чёрного моря

Распространение естественного нефтяного загрязнения на морской поверхности юго-восточной части Чёрного моря

Нами были проанализированы траектории распространения пленок естественных нефтепроявлений, выявленных на спутниковых снимках юго-восточной части Чёрного моря.

На рис. 3 приведены характерные примеры плёночных загрязнений, детектированных на радиолокационных изображениях морской поверхности, полученных над континентальным склоном в районе Поти – Батуми. На всех приведённых изображениях отчётливо выделяются крупные слики характерных форм, привязанные к определенной исходной точке на морской поверхности. Еще один

характерный признак, общий для естественных нефтепроявлений на морской поверхности в рассматриваемом районе – их «полосчатая» структура.



Р и с. 3. Фрагмент цветосинтезированного изображения сенсора MSI Sentinel 2-B (4, 3 и 2 спектральные каналы) от 10.09.2017, 08:17 UTC (а); фрагмент РЛИ SAR Sentinel-1B от 28.03.2018, 03:16 UTC (б); фрагмент цветосинтезированного изображения сенсора MSI Sentinel 2-B (4, 3 и 2 спектральные каналы) от 20.09.2017, 08:17 UTC (в); фрагмент РЛИ SAR Sentinel -1A от 08.04.2017, 03:16 UTC (г).

Вблизи точки всплытия наблюдаются три сликовые полосы различной ширины. В процессе эволюции и дрейфа слика эти полосы могут слиться, а могут продолжать эволюционировать относительно синхронно, сохраняя при этом свою обособленность. Факт наличия трех четко различимых полос объясняется тем, что нефть доставляется на морскую поверхность газовыми пузырьками в результате одновременной активности трёх газовых факелов: из горы Печори и двух ядер прорывания сипа Колхети (для сравнения см. рис. 2). Наибольшая

толщина плёнки наблюдается вблизи точки всплытия. Поверхностный слик формируется под влиянием поля ветра и течений.

На цветосинтезированном изображении, представленном на рис. 3а, три сформированные тонкие протяжённые полосы повышенной яркости, окружённые тёмным ореолом после выхода на поверхность, распространяются, слегка изгибаясь, в юго-восточном направлении на расстояние 10 и 15 км от точки всплытия. Общая площадь нефтесодержащего слика – 36,5 км².

Фрагмент РЛИ, представленный на рис. 3б, иллюстрирует, насколько сложной может оказаться траектория дрейфа нефтяной пленки под влиянием сформировавшейся в районе интереса картины ветра и течений. После всплытия на поверхность нефтяные плёнки немедленно вовлекаются в движения, обусловленные субмезомасштабным вихрем (возможно диполем), развивающимся в непосредственной близости от точки выхода нефти на поверхность. Вблизи точки всплытия наблюдается область, покрытая достаточно толстой плёнкой, по мере распространения слики изгибаются, толщина пленки уменьшается, общая площадь нефтесодержащего слика – 36,5 км².

На примере, представленном на рис. 3в нефтяные плёнки после всплытия на поверхность немедленно вовлекаются в движения, обусловленные субмезомасштабным вихрем. На расстоянии 6 км к северо-востоку от точки всплытия слик резко изгибается, сужается и практически прямолинейно распространяется к северо-северо-востоку еще на 13 км. Момент излома слика соответствует времени резкого усиления и изменения направления ветра. Общая площадь нефтесодержащего слика – около 9 км².

На цветосинтезированном изображении, представленном на рис. 3д, нефтяные пленки, видимые как три сформированные тонкие протяжённые полосы повышенной яркости, распространяются по дуге. Пройдя по этой дуге расстояние примерно 15 км в западном направлении, слик начинает распространяться к юго-востоку и завершается на расстоянии 13 км к юго-западу от точки всплытия, пройдя в общей сложности 27 км.

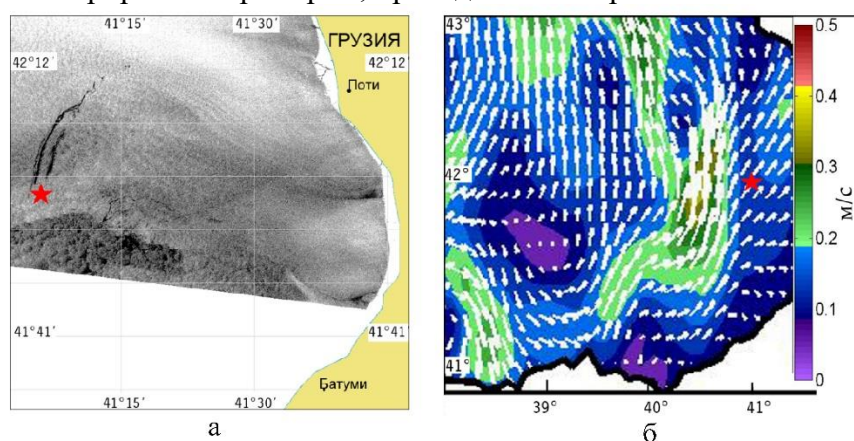
Очевидно, что ветер и течения являются основными движущими силами дрейфа, растекания и деградации пленок естественных нефтепроявлений. Дальнейший анализ спутниковых снимков и сопутствующей гидрометеорологических данных был направлен на выявление относительного вклада приповерхностных ветров и течений на формирование, дрейф и распад нефтяного слика.

Произведено сопоставление выделенных по спутниковым изображениям траекторий распространения сликов и пространственных полей поверхностных течений (http://dvs.net.ru/mp/data/main_ru.shtml) рассчитанных по комбинированным данным о полях приповерхностного ветра и геострофических скоростей [6]. При этом геострофическая

скорость восстановлена по данным спутниковой альтиметрии с использованием регионального массива картированных аномалий уровня AVISO) и средней динамической топографии, а ветер рассчитан по оперативной модели NOMADS, NOAA (<https://nomads.ncdc.noaa.gov/nomads.php>). В целом наблюдалось неплохое соответствие, особенно при устойчивых умеренных ветрах, хотя на рассчитанных по модели полях поверхностных скоростей на разрешаются мелкомасштабные особенности, которые часто выявляются по спутниковым данным.

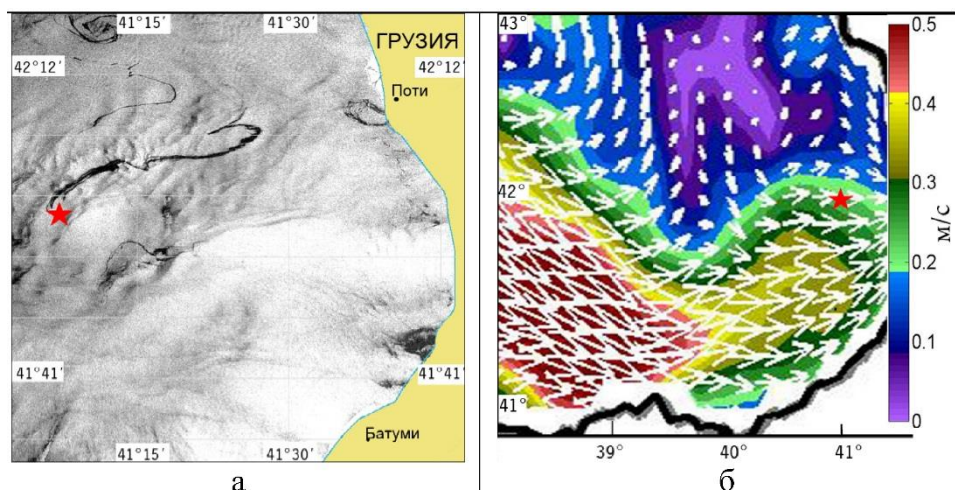
Ниже рассматриваются примеры сопоставления траекторий распространения сликов, выделенных на РЛИ, и полей поверхностных течений, рассчитанных по модели. Рассмотрены три наиболее распространенные ситуации, обусловленные тем, что поле течений в районе интереса формируется под влиянием трех основных факторов, каждый из которых может оказаться доминирующим в определенный промежуток времени.

Первым фактором является наличие основного черноморского течения (ОЧТ), скорости в стрежне которого достигают 40-60 см/с, постепенно уменьшаясь как к берегу, так и к открытому морю. ОЧТ способствует переносу загрязнений по циклонической схеме, что проиллюстрировано примером, приведенным на рис. 4.



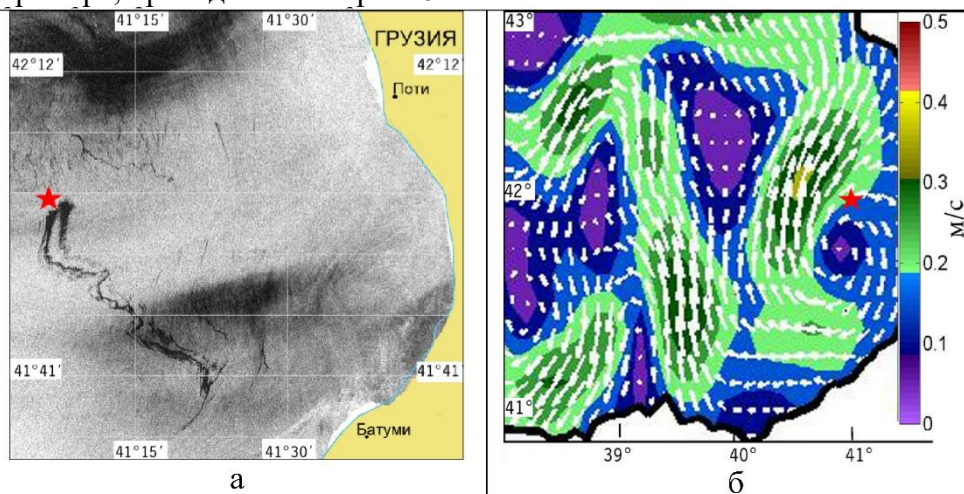
Р и с. 4. Перенос загрязнений по циклонической схеме. а) РЛИ SAR Sentinel-1A. 21 октября 2014, 03:16 UTC. Слик распространяется на северо-восток на расстояние 28 км от точки всплытия; б) рассчитанные по модели поверхностные течения на 21 октября 2014, 06:00 UTC;

В качестве второго фактора выступают вихревые структуры разного знака завихренности, которые возникают вследствие интенсивного меандрирования ОЧТ, обусловленного синоптической изменчивостью ветра, и способствует кроссшельфовому переносу загрязнений. Такая ситуация отображена на примере, приведенном на рис. 5.



Р и с. 5. Кросс-шельфовый перенос загрязнений: а) РЛИ SAR Sentinel-1A. 2 июня 2016, 03:24 UTC. Слик, вовлеченный в вихревое движение, распространяется поперек шельфа на расстояние 33 км от точки всплытия; б) рассчитанные по модели поверхностные течения на 2 июня 2016, 12:00 UTC

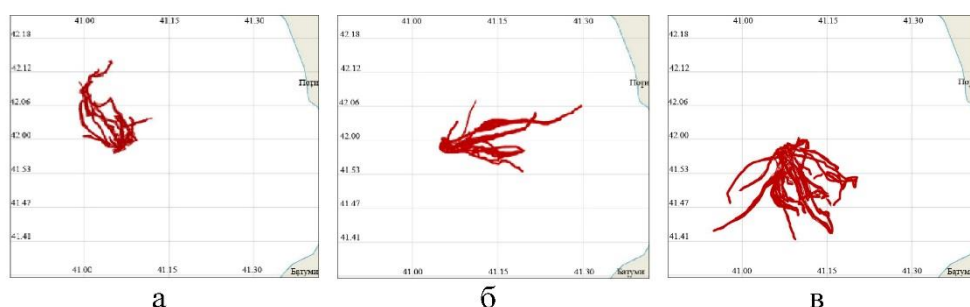
Третьим фактором, оказывающим влияние на распространение естественных нефтепроявлений, является квазистационарный батумский антициклонический вихрь, наличие которого способствует распространению нефтяных пленок, вовлеченных в вихревые движения антициклона, в южном направлении. Такая ситуация отображена на примере, приведенном на рис. 6.



Р и с. 6. Перенос загрязнений в южном направлении: а) РЛИ SAR Sentinel-1A. 7 мая 2015, 15:10 UTC. Слик, вовлеченный в вихревое движение, распространяется на юго-восток на расстояние 50 км от точки всплытия; б) рассчитанные по модели поверхностные течения на 7 мая 2015, 12:00 UTC.

Выводы и результаты

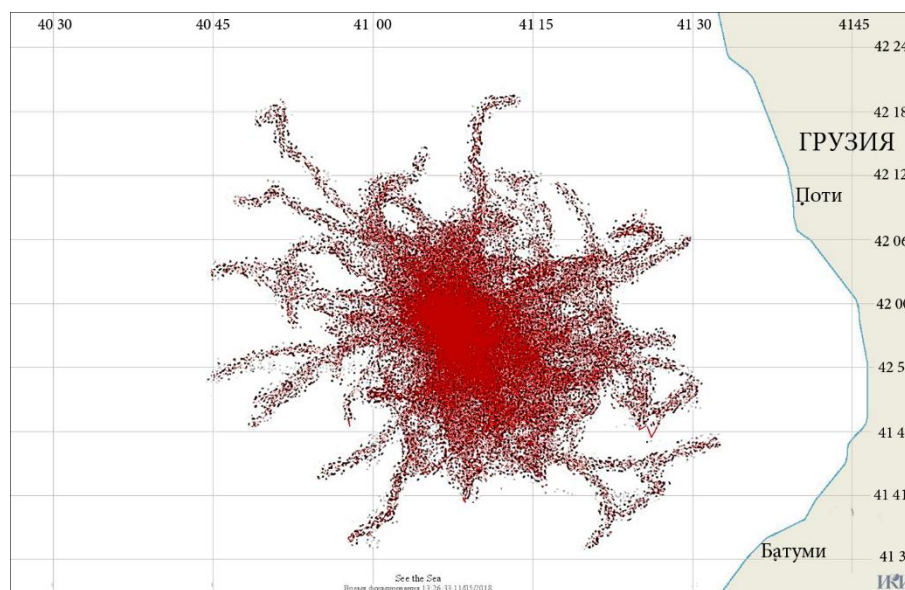
Использование результатов спутниковых наблюдений пленок естественных нефтепроявлений вблизи точки всплытия, регулярно выявляемых на спутниковых данных, может принести существенную пользу для решения задачи выявления направления поверхностных течений, преобладающего на момент наблюдений. Опосредованным параметром при этом может служить траектория распространения слика. Для примера на рис. 7 приведены траектории распространения нефтяных сликов, выявленные по спутниковым данным за различные месяцы 2017 г. Видно, что доминирующее направление поверхностных течений вблизи точки всплытия медленно менялось в течение полугода от северо-западного до южного.



Р и с. 7. Распространение пленок естественных нефтепроявлений на морской поверхности по результатам спутниковых наблюдений за 2017 г: а) январь–февраль; б) март–апрель; в) май–июнь.

На основе спутниковых данных установлено также, что в условиях, когда преобладающее направление ветра и течений сохраняется в течение длительного времени, нефтяная пленка может распространяться на большие расстояния – вплоть до 45 км от точки всплытия. Исходя из протяженности следов, выявленных по радиолокационным данным, и задавшись средней скоростью течения 25 см/с, что можно считать достаточно высокой скоростью, получаем приблизительную оценку продолжительности жизни пленок естественных нефтепроявлений вплоть до 50 часов. Следует отметить, что для пленок естественных нефтепроявлений время жизни на поверхности значительно варьируется в зависимости от изменений гидрометеорологических условий. Кроме того, при высоких скоростях ветра (более 9–10 м / с) нефтяные пленки разрушаются ветром и волнами и не всегда могут быть идентифицированы на спутниковых РЛИ.

На рис. 8 показаны ареал распространения пленок естественного нефтепроявления на морской поверхности вблизи точки всплытия.



Р и с. 8. Обобщенная схема нефтяного загрязнения морской поверхности над районом естественных выходов углеводородов со дна в юго-восточной части Черного моря, построенная по спутниковым данным

Дрейф нефтяных пленок на морской поверхности в шельфовой зоне грузинского сектора Черного моря определяется, прежде всего, неустойчивой системой течений. Здесь с высокой степенью вероятности может происходить кросс-шельфовый перенос нефтяного загрязнения.

Площадь акватории, потенциально подверженной загрязнению пленками естественных нефтепроявлений, составляет около 860 км².

По результатам проведенных спутниковых наблюдений восточная часть акватории Черного моря в районе континентального склона вблизи побережья Грузии должна быть отнесена к районам экологического риска.

Список литературы

1. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Раев М.Д., Сабинин К.Д., Трохимовский Ю.Г., Чурюмов А.Н., Шуган И.В. 2003. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи Физических Наук. 2003. Т. 173. № 1. С. 69–87.
2. Евтушенко Н.В., Иванов А.Ю. 2012. Нефтепроявления в юго-восточной части Черного моря по данным космической радиолокации // Исследование Земли из космоса. № 3. С. 24–30.

3. Егоров В.Н., Артемов Ю.Г., Гулин С.Б. 2011. Метановые сипы в Черном море. Средообразующая и экологическая роль. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». 405 с.
4. Иванов М.К., Конюхов А.И., Кульницкий Л.М. и др. 1989. Грязевые вулканы в глубоководной части Чёрного моря // Вест. Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология. № 3. С. 48–54.
5. Круглякова Р.П., Круглякова М.В., Шевцова Н.Т. 2009. Геолого-геохимическая характеристика естественных проявлений углеводородов в Черном море // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. № 1. С. 37 – 51.
6. Кубряков А.А., Станичный С.В., Плотников Е.В. 2011. Определение полей скоростей поверхностных течений дистанционными методами // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Вып. 24. С. 299–307. Кубряков А.А., Станичный С.В., 2011.
7. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. 2011. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН. 480 с.
8. Лаврова О.Ю., Митягина М. И., Костяной А.Г. 2016. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН. 334 с.
9. Лаврова О.Ю., Митягина М.И. 2012. Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. № 3. С. 48–65.
10. Митягина М.И., Чурюмов А.Н. 2006. Механизмы формирования радиолокационного сигнала в области нефтяного загрязнения на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 3. № 2. С. 135–139.
11. Шнюков Е.Ф., Клещенко С.А. 2001. Грязевой вулканизм западного суббассейна Черного моря // Геологические проблемы Черного моря. Киев: НАНУ. С. 121–144.
12. Klaucke, I., Sahling, H., Weinrebe, W., Blinova, V., Boerk, D., Lursmanashvili, N., Bohrman, G. 2006. Acoustic investigation of cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea // Marine Geology. V. 231. No 1. P. 51–67.
13. Körber, J.H., Sahling, H., Pape, T., Ferreira, C.S., MacDonald, I., Bohrman, G. 2014. Natural oil seepage at Kobuleti Ridge, eastern Black Sea. // Marine and Petroleum Geology. V. 50. P. 68–82.
14. Kvenvolden K.A., Cooper C.K. 2003. Natural seepage of crude oil into the marine environment // Geo-Mar Lett. V. 23. P. 140–146.
15. Naehr, T.H., MacDonald, I.R. 2010. Remote Sensing and Sea-Truth Measurements of Methane Flux to the Atmosphere (HYFLUX project): Quarterly Progress Report, July – September. Texas A&M University-Corpus Christi. 24 p.

16. Reitz, A., Pape, T., Haeckel, M., et al. 2011. Sources of fluids and gases expelled at cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea// *Geochim. Cosmochim. Acta* 75. P. 3250–3268.
17. Wagner-Friedrichs, M. 2007. Seafloor seepage in the Black Sea: Mud volcanoes, seeps and diapiric structures imaged by acoustic methods. Ph.D. Thesis. University of Bremen. 154 p.

**DISTRIBUTION OF NATURAL OIL FILMS ON THE SURFACE
OF THE SOUTH-EASTERN BLACK SEA REVEALED
BY THE MULTI-YEAR SATELLITE OBSERVATIONS**

M.I. Mityagina

Space Research Institute of Russian Academy of Sciences

The paper presents results of studies aimed at the revealing of the spatial and temporal variability of marine surface pollution caused by natural hydrocarbons showings from the seafloor. Long-term series of satellite remote sensing data are analyzed. Relative contributions of the near-surface wind and surface currents to the natural oil slick formation, drift and fate are investigated. It is shown that under moderate winds, oily films of natural origin can drift to distances up to 50 km from the emersion point and remain on the surface for up to 48 hours, being an indicator for revealing a fine structure of surface currents with a high spatial resolution. The detailed map of the sea surface oil pollution caused by natural hydrocarbons showings from the sea bottom in the south-eastern of the Black Sea was produced, which makes it possible to estimate the probability of the sea surface oil pollution in the region under study.

Keywords: *the Black Sea, satellite remote sensing, radar imagery, sea surface, surface films, oil pollution, natural hydrocarbon seeps*

Об авторе:

МИТЯГИНА Марина Ивановна – доцент, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Института космических исследований РАН, e-mail: mityag@iki.rrssi.ru.