

Нефтяные загрязнения морской поверхности: взгляд из космоса

О.Ю.Лаврова, М.И.Митягина

Огромные размеры Мирового океана и его постоянная изменчивость затрудняют изучение происходящих там процессов традиционными контактными методами. Сегодня такие исследования невозможно представить без использования информации, полученной с помощью приборов дистанционной диагностики, установленных на различных спутниках, предназначенных для дистанционного зондирования Земли.

Развитие методов спутникового зондирования суши и океана и их применения для фундаментальных исследований и решения широкого круга научных и прикладных задач — одно из важнейших направлений, успешно развивающихся в ИКИ РАН. В 1974 г. эти работы возглавил профессор В.С.Эткин, один из пионеров изучения Мирового океана микроволновыми методами. Его усилия во многом определили высокий уровень дистанционных исследований океана в нашей стране. Сегодня научное направление, начатое Эткиным, продолжает развиваться в лаборатории аэрокосмической радиолокации нашего института, образованной в 2002 г. [1]. За годы ее существования накоплен уникальный опыт работы с разнообразной спутниковой информацией о состоянии морей



Ольга Юрьевна Лаврова, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая лабораторией аэрокосмической радиолокации ИКИ РАН. Специалист в области дистанционного зондирования поверхности океана из космоса, исследования процессов и явлений в океане и атмосфере над ним, мониторинга антропогенных загрязнений.



Марина Ивановна Митягина, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник той же лаборатории. Научная деятельность направлена на развитие физических основ микроволнового зондирования поверхности океана с использованием космических систем.

и океанов и развит комплексный (многосенсорный и междисциплинарный) подход к исследованию Мирового океана на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса [2].

Спутниковый экологический мониторинг

В настоящее время один из основных методов изучения океанических и атмосферных процессов — спутниковое радиолокационное зондирование поверхности океана. Его радиолокационные изображения несут информацию о разнообразных явлениях, происходящих как непосредственно в приповерхностном слое, так и в глубине океана. Разумеется, электромагнитные волны СВЧ-диапазона проникают в воду не более чем на несколько миллиметров, и протекающие в океане процессы заметны только благодаря своим поверхностным проявлениям. Возбуждаемая приповерхностным вет-

© Лаврова О.Ю., Митягина М.И., 2015

ром рябь отображает как атмосферные, так и внутрокеанические процессы, которые тем или иным способом модулируют короткие гравитационно-капиллярные волны на поверхности океана, проявляющиеся в модуляциях радиолокационного сигнала. Таким образом, такие изображения поверхности океана отображают движения как в самом океане, так и в атмосфере. Это своего рода природная камера Вильсона, позволяющая наблюдать эффекты, скрытые от глаз. Волны СВЧ-диапазона, в отличие от других электромагнитных волн, проникают через облачный покров, обеспечивая постоянное наблюдение океана.

Нефтяные пятна и поверхностно-активные вещества (ПАВ) органического происхождения меняют поверхностное натяжение, «выглаживая» тем самым поверхностную рябь и уменьшая сечение рассеяния. В этом случае на поверхности океана образуются области пониженного рассеяния (слики), которые могут служить индикаторами загрязнения поверхности. Автоматическое распознавание нефтяных пятен на радиолокационных снимках — задача непростая, поскольку такие пятна, особенно при слабом ветре, почти не отличаются от проявлений других объектов. Их принято называть «подобия пятен»: это органические пленки, некоторые типы льда («сало») и затененные суши области, дождевые ячейки, зоны апвеллинга.

Радиолокационные изображения нефтяных разливов, естественно, зависят от внешних условий. Контраст между областью разлива и окружающей поверхностью определяется скоростью ветра, высотой волн, количеством и типом разлитой нефти. Форма разлива будет отличаться при выбросе нефти из стационарного и движущегося объекта, а также для разного количества нефти, различной динамики ветра и разного течения между моментами разлива. Для надежной интерпретации изображений морской поверхности, полученных со спутниковых радиолокаторов, в лаборатории разрабатываются методики анализа всей совокупности информации; она включает данные приборов дистанционной диагностики с различных спутников. Ключевой момент составляет возможность комплексного использования данных, различных по своей физической природе (активного и пассивного микроволнового зондирования, много- и гиперспектральных оптических и ИК-данных), по пространственному разрешению и размерности.

В спутниковый экологический мониторинг морской поверхности входит не только выявление нефтяных и других антропогенных загрязнений, но и прогноз их распространения. Он может строиться только на детальном знании всей совокупности гидродинамических процессов, характерных для района мониторинга, так как загрязнения, попадая в морскую среду, развиваются вместе с ней под воздействием метеорологических и гидрологических факторов [3]. Один из важнейших элементов динамики вод, ответственных за

интенсивное перемешивание и распространение загрязнений, — субмезомасштабные вихри, фронты, струи и внутренние волны. На основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения в нашем институте изучаются основные механизмы генерации вихревых структур разных масштабов и определяются районы их пространственной локализации в Черном, Каспийском и Балтийском морях. Разработанный в лаборатории метод реконструкции реальных полей поверхностных течений позволяет выявлять мезо- и мелкомасштабные структуры (вихри, диполи и мультиполи, струи, филаменты), а также оценивать влияния динамических структур в прибрежной зоне моря на распределение основных параметров загрязнения морской среды [2, 5, 6].

Совокупность накопленных экспериментальных фактов и теоретических моделей легла в основу развиваемой в настоящее время в ИКИ РАН технологии экологического мониторинга состояния морской поверхности. Используемые алгоритмы и методики тематической обработки спутниковых данных, в первую очередь спутниковой радиолокации морской поверхности, дают возможность находить различные антропогенные загрязнения с большой степенью точности и определять зоны экологического риска.

Катастрофические разливы нефти

Случаи разливов нефти, связанные в первую очередь с авариями на морских нефтяных платформах или с крушением танкеров, к счастью, происходят редко, но часто приводят к серьезным экологическим катастрофам. По данным международной организации «The International Tanker Owners Pollution Federation Limited» (ITOPF), более 700 т нефти и нефтепродуктов за один инцидент попадают в море из-за пробоев корпуса, пожаров, посадки на мель и столкновений танкеров. Так, с 1970 по 2014 г. в результате аварий танкеров вылилось примерно 5,74 млн т нефти*. Хорошо, что таких чрезвычайных ситуаций становится с каждым годом все меньше и меньше.

По данным, накопленным ИТОПФ, большая часть аварий приходится на 70-е годы прошлого столетия, их доля в общем количестве крупных разливов нефти (более 7 т) составила 58%. В последние годы, в связи с вводом в эксплуатацию современных и более надежных танкеров, количество аварий резко сократилось. Однако практически все катастрофические разливы нефти случались в непосредственной близости от берега, что неминуемо вело к серьезному загрязнению береговой черты. Ущерб от этих катастроф мог быть еще большим, если бы не удалось отслеживать пе-

* <http://www.itopf.com/information-services/data-and-statistics/statistics/>

ренос нефтяных пятен в море и прогнозировать место и время их выброса на побережье. Наиболее эффективное средство для наблюдения распространения нефтяного загрязнения — спутниковый мониторинг с помощью радиолокаторов.

По инициативе канадского космического агентства (CSA) 20 октября 2000 г. европейское и французское космические агентства подписали хартию «Космос и крупные бедствия» (The International Charter «Space and Major Disasters») для обеспечения широкого доступа к космической мониторинговой информации в ходе мероприятий по ликвидации последствий всех возможных природных и техногенных катастроф. Каждый член Хартии включает свои спутниковые данные в общее пользование во время чрезвычайных ситуаций. Российская Федерация в лице Роскосмоса присоединилась к Хартии только в 2013 г. и в случаях необходимости предоставляла (например, при наводнении на Амуре) мировой общественности данные с космических аппаратов «Ресурс-П», «Метеор-М» и «Канопус-В».

Одна из важнейших задач спутниковой океанологии — определение масштаба бедствия и прогнозирование последствий в случае природных и антропогенных катастроф. Сотрудники нашей лаборатории активно участвовали в мониторингах, проводимых при катастрофических разливах нефтепродуктов: в Керченском проливе (авария танкера «Волгонепфть-139» 11 ноября 2007 г.); в Мексиканском (разрушение нефтяной платформы «Deerwater Horizon» 20 апреля 2010 г.) и Гвинейском заливах (авария на морской нефтяной платформе «Bonga» 21 декабря 2011 г.).

Катастрофические разливы нефти происходят не только в результате аварий танкеров. Так, в историю техногенных катастроф на морских платформах в Мировом океане вошло гигантское по масштабу нефтяное загрязнение в 2010 г. Это случилось в результате утечки нефти из скважины «Макондо», которая произошла вследствие разрушения нефтяной платформы «Deerwater Horizon», управляемой компанией «British Petroleum» (BP). Платформа находилась в северной части Мексиканского залива, на расстоянии менее 100 км от дельты р. Миссисипи. Масштабность аварии и разлива нефти усугублялась непрерывным фонтанированием скважины (с расходом порядка 800 т нефти в сутки), расположенной на глубине 1.5 км, в течение трех месяцев.

Практически сразу после катастрофы руководство Геологической службы США от имени береговой охраны США обратилось в международную хартию «Космос и крупные бедствия» с просьбой о космическом мониторинге района бедствия всеми возможными средствами. Начиная с 22 апреля практически все космические сенсоры были переориентированы на съемку Мексиканского залива. В оперативном режиме производилась съемка, обработка и анализ данных следующих сенсо-

ров: «MODIS Aqua/Terra», «ASAR», «MERIS Envisat», «Radarsat S», «TerraSAR-X».

С первого же дня катастрофы ученые из ИКИ РАН совместно с коллегами из Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Москва) и Морского гидрофизического института (Севастополь) начали работу по комплексному анализу мультисенсорных спутниковых и метеорологических данных района аварии в Мексиканском заливе. На основе всех доступных спутниковых данных оценивали площадь пятна и его распространение, изучали метеобстановку и гидродинамическую ситуацию в районе катастрофы, прогнозировали распространение загрязнения. Все имеющиеся в нашем распоряжении спутниковые изображения в оперативном режиме выставлялись на специальном сайте, созданном в нашей лаборатории*.

В первую неделю после катастрофы пятно постоянно увеличивалось в размерах, но сохраняло компактность и четкие границы. В дальнейшем, 29 апреля, пятно, видимо, попало в циклонический вихрь, сильно изменило форму, а площадь поверхностных загрязнений составила 2400 км². От него стали отходить шлейфы нефтяных загрязнений до 75 км в длину, впервые с момента аварии они достигли берега в районе дельты Миссисипи. Затем нефтяное пятно, постоянно пополнявшееся за счет утечки нефти со дна моря, изменялось под действием слабых течений и ветра (рис.1). 17 мая спутниковые изображения показали, что общая площадь загрязнения морской поверхности возросла с 11 до 16 тыс. км² за счет гигантской нефтяной струи, шириной от 40 км у основания до 10 км

* http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_mex.html

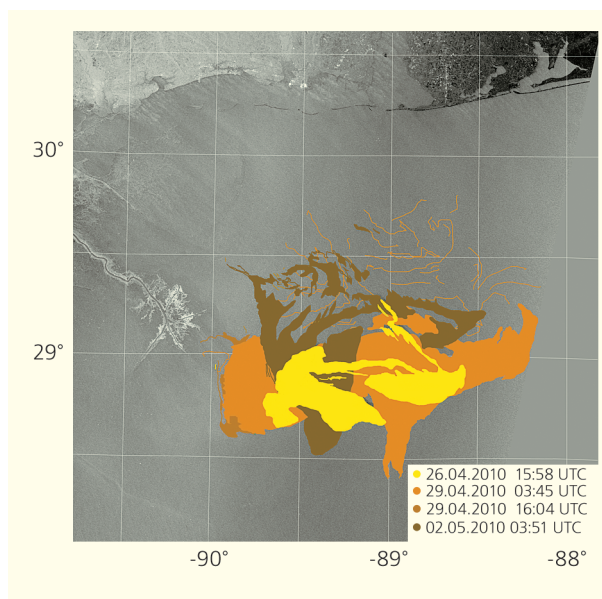


Рис.1. Композиция четырех радиолокационных снимков «ASAR Envisat», показывающая распространение нефтяного пятна с 26 апреля по 2 мая 2010 г. [2].

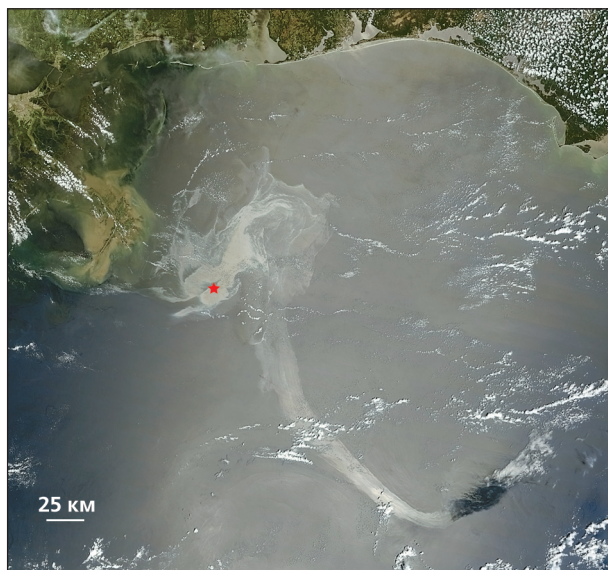


Рис.2. Спутниковое изображение нефтяного загрязнения с образовавшейся струей по данным «MODIS-Terra» от 17 мая 2010 г. 16:40 UTC. Снимок получен в зоне солнечного блика. Звездочкой отмечено место аварии [4].

MODIS Rapid Response Team

на ее конце и длиной до 300 км,двигающейся по дуге из района утечки нефти в юго-восточном направлении (рис.2). Площадь самой струи составила примерно 4700 км².

Мы доказали, что струя образовалась не в результате ветрового воздействия, поскольку ветер

15–17 мая был прямо противоположным по направлению — юго-юго-восточным. Модельные расчеты американских специалистов, учитывающие только влияние ветра и волнения, не предсказывали появления подобной струи. Наш анализ данных о поле температуры поверхности океана показал, что нефтяное пятно частично попало в зону действия гигантского дипольного вихря общим поперечным размером 300 км, направленного на запад. Часть пятна была захвачена передним фронтом диполя и вовлечена в движение циклоническим вихрем диполя, чем и объясняется наблюдаемая траектория движения струи. На основе анализа спутниковых данных мы смогли не только объяснить причины образования струи, но и сделать прогноз ее распространения. Наши расчеты показали, что «нефтяная струя» (нужны ли кавычки?) не вынесет загрязнения к западным берегам Флориды или в Гольфстрим, а будет захвачена циклоническим вихрем, распадется на отдельные фрагменты и диссипирует. В дальнейшем этот прогноз полностью оправдался [4].

Антропогенные загрязнения прибрежных акваторий

Источниками нефтяных и других антропогенных загрязнений могут быть не только аварии с танкерами или взрывы на нефтяных платформах. Как показал наш 12-летний опыт спутникового мониторинга акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей, сильное нефтяное загрязнение

возникает в результате широкого освоения запасов нефти и газа на морском шельфе: строительством морских стационарных платформ, береговых терминалов, хранилищ углеводородов, прокладкой подводных трубопроводов, сейсмическими и буровыми работами, а главное — ростом судоходства. По данным спутниковой радиолокации за 2004–2012 гг., для каждого из перечисленных морей были составлены карты нефтяного загрязнения, определены межгодовая и сезонная изменчивость его совокупной площади, пространственные распределение и изменчивость загрязнений для различных акваторий [7, 8].

В Балтийском море ситуация, связанная с антропогенными загрязнениями, в последние годы значительно улучшилась, поскольку усилился контроль за экологическим состоянием вод (рис.3). Интересно сравнить ко-

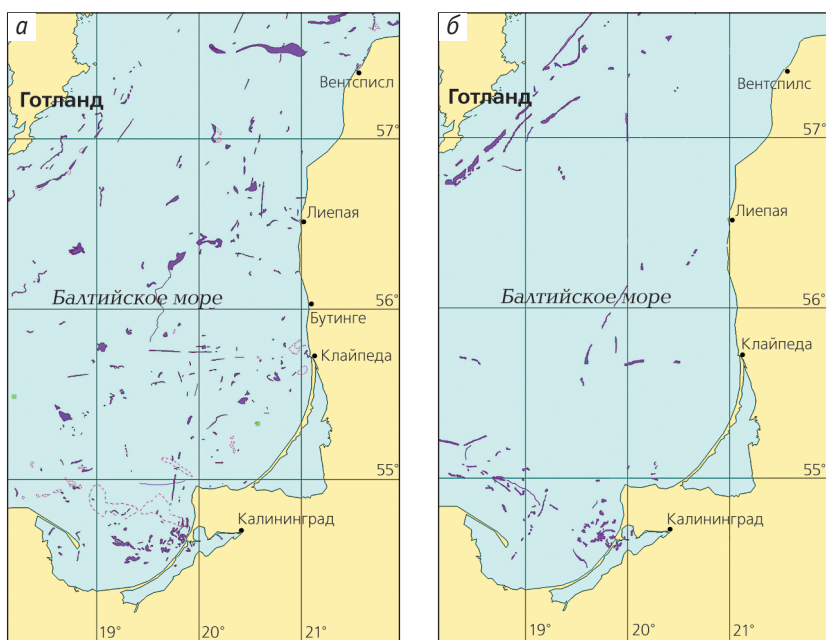


Рис.3. Сводные карты нефтяных пятен в юго-восточной части Балтийского моря, обнаруженных в результате анализа данных спутниковой радиолокации с июля 2004 г. по ноябрь 2005 г. (а) и с января 2009 г. по март 2012 г. (б).

личество и местоположение судовых загрязнений, выявленных за 18 мес мониторинга в 2004—2005 гг. (рис.3,а) и в 2009—2012 гг. (рис.3,б). Основные источники загрязнений остаются прежними: несанкционированный сброс нефтепродуктов с судов и вынос загрязненных вод реками и из Калининградского обводного канала. Сброс с судов традиционно осуществляется на якорной стоянке в районе г.Балтийска, на основных судоходных трассах вдоль о.Готланда, севернее Гданьского залива и на подходах к крупным портам (Клайпеде, Лиенае, Вентспилсу и Гданьску). Однако если в 2004—2005 гг. на поверхности юго-восточной части Балтийского моря было выявлено 274 отдельных пятна нефтепродуктов, то в 2009—2012 гг. обнаружили всего 122 пятна.

В Черном и особенно Каспийском море нет такого активного судоходства, но нет и строгого контроля над незаконными сбросами с судов вод, загрязненных нефтепродуктами. Результаты круглогодичного спутникового мониторинга акватории Черного моря позволили сделать следующие заключения. Как и следовало ожидать, сбросы с судов концентрируются вдоль основных судоходных трасс: Стамбул—Новороссийск, Стамбул—Одесса и Стамбул—Туапсе. Кроме того, большое количество сбросов происходит вблизи крупных портов Болгарии, Турции, Румынии и Украины, а также там, где функционируют нефтеналивные терминалы. В российской части Черного моря по-прежнему сильнее загрязняется акватория в районе порта Новороссийск и черноморского предпроливья Керченского пролива. К сожалению, география обнаруженных загрязнений не ограничивается отмеченными выше зонами повышенной концентрации, а охватывает практически всю акваторию моря (рис.4).

Перед исследователями, занимающимися спутниковым мониторингом загрязнений морской поверхности, стоит еще много важных задач. Помимо нефтяных загрязнений в воду сбрасываются, в частности, сточные воды с очистных сооружений приморских городов. Давно вызывает серьезное беспокойство система очистки сточных вод и трубопровод глубоководного выпуска в районе г.Геленджика. К сожалению, в этом крупнейшем в России после Сочи рекреационном центре на кавказском берегу Черного моря городские очистные коммуникации не рассчитаны на все возрастающий наплыв туристов. Сточные воды с городских очистных сооружений должны уходить в мо-

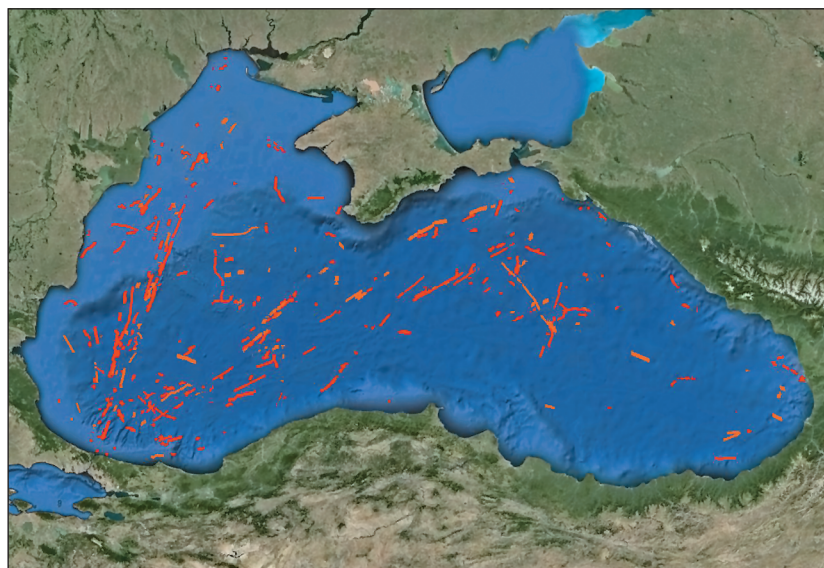


Рис.4. Обобщенная карта-схема нефтяных загрязнений поверхности Черного моря, составленная на основе анализа данных спутниковой радиолокации за 2009—2011 гг.

ре по глубоководному выпуску, оголовок которого расположен в районе Толстого мыса, южнее Геленджикской бухты (на расстоянии 2095 м от берега на глубине около 30 м). Однако уже много лет из-за серьезных повреждений выпуска часть очищенных сточных вод сбрасывается в прибрежной полосе (рис.5).

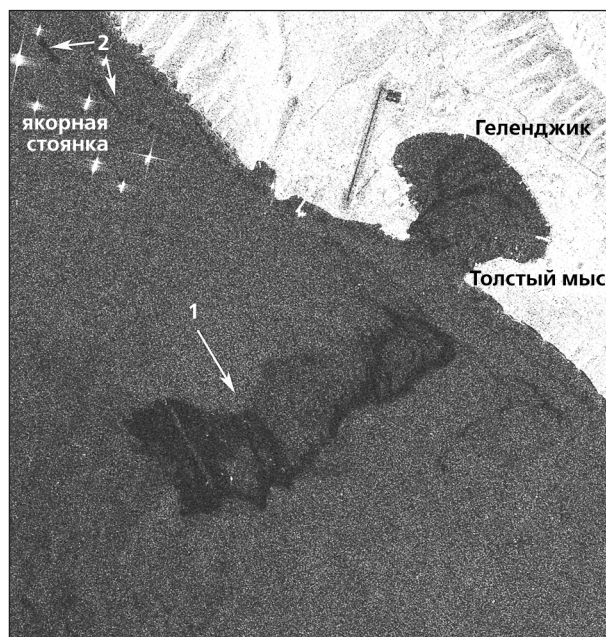


Рис.5. Утечка сточных вод из глубоководного выпуска у Толстого мыса (1) и сброс технологических вод с судов, находящихся на якорной стоянке Дооб (2). Фрагмент изображения «ASAR Envisat», полученного 29 сентября 2010 г. [2].

Естественные выходы углеводородов

По данным спутникового мониторинга, картина загрязнения Каспийского моря нефтесодержащими пленками существенно отличается от таковой в Черном и Балтийском морях. Во многом это связано с природными особенностями Каспийского моря, в недрах которого имеются большие запасы нефти и газа.

На открытые участки Каспийского моря (в центральной его части и в области Апшеронского и Бакинского архипелагов) нефть попадает при добыче и бурении, подводном ремонте скважин, при аварийных разрывах нефтепроводов и зачистке выкидных линий. Кроме того, существенен выход нефти на поверхность моря из естественных и особенно искусственных грифонов, во время действия которых ее количество может колебаться от 100 до 500 т/сут. На всех без исключения радиолокационных изображениях, полученных нами в ходе мониторинга в районах нефтедобычи, идентифицируются ее пятна, причем их следы выявляются зачастую на площади более 800 км² вокруг морских буровых платформ (рис.6). На северо-западном борту Южно-Каспийской впадины сконцентрировано наибольшее количество подводных вулканов, притом крупных. Большинство их находится в грифоновой стадии развития и выделяет илистую грязь, воду, газ и нефть. Активизация подводных вулканов и грифонов в местах разгрузки углеводородов приводит к появлению на воде грязевых и нефтяных пятен (рис.7).

Проявления естественных выходов углеводородов на поверхность видны и на радиолокационных изображениях восточной части Черного моря. Глубоководные сипы в грузинских водах — это уникальный для Черного моря тип струйных выделений, в которых метан сосуществует одновременно в свободной форме и в виде газогидратов. Отличительной чертой таких сипов служит присутствие следов нефти в донных газогидратах. На поверхности моря в районах обнаружения этих сипов были замечены нефтяные пятна природного происхождения, которые разносятся по поверхности моря в соответствии с ветровой ситуацией и гидродинамическими процессами (раскручивание поверхностной пленки под действием вихря) (рис.8). Такие пленочные загрязнения наблюдаются практически на всех радиолокационных изображениях этой акватории Черного моря.

* * *

Рост объемов нефти, перевозимых морским путем, а также ввод в эксплуатацию все новых нефтяных платформ на морском шельфе в непосредственной близости от берега делает задачу регулярного контроля состояния морской поверхности все более актуальной. Единственный эффективный метод такого контроля — мониторинг акватории

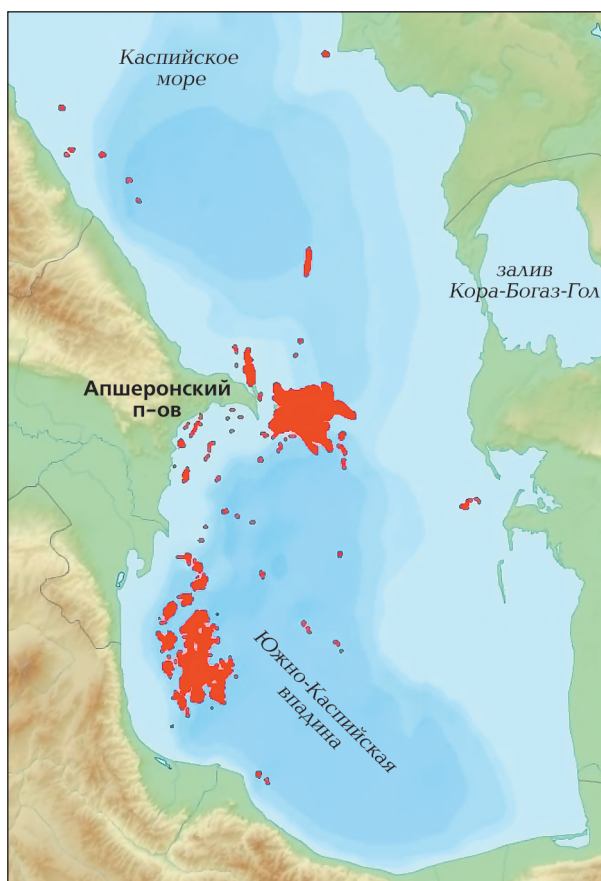


Рис.6. Сводная карта нефтяных загрязнений поверхности Каспийского моря, обнаруженных в результате анализа данных спутниковой радиолокации за 2009—2011 гг. [8].



Рис.7. Грязевулканические проявления в южном Каспии. Фрагмент радиолокационного изображения «ASAR Envisat», полученного 19 июня 2011 г.

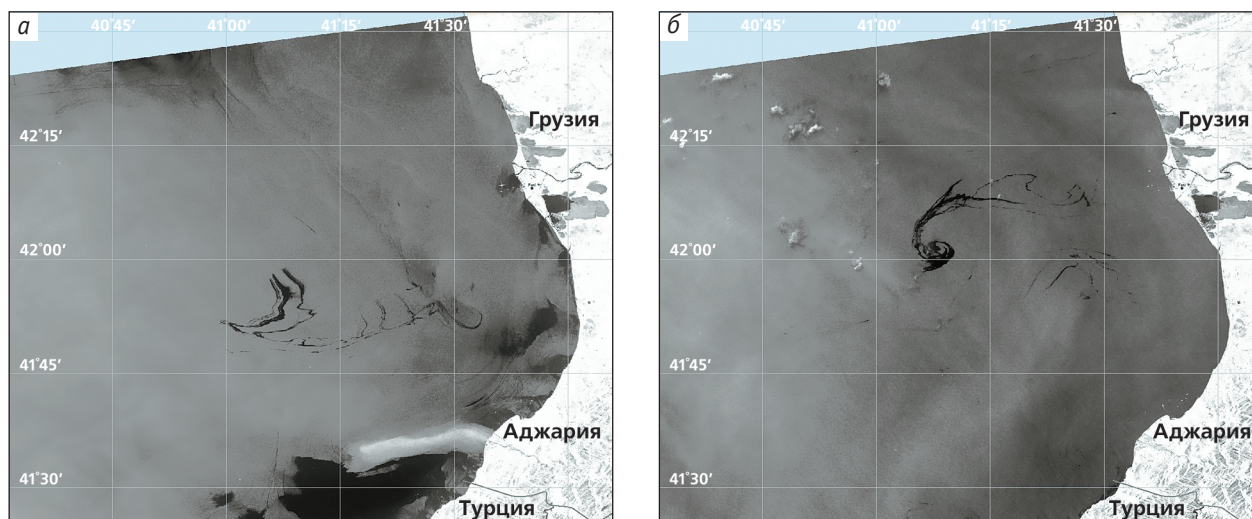


Рис.8. Примеры проявлений сликовых структур в районе метановых сипов над акваторией континентального склона рядом с г.Поти (Грузия). Фрагменты радиолокационных изображений «Sentinel-1» от 08 ноября 2014 г. (а) и 15 октября 2014 г. (б).

морей из космоса. Мы постарались коротко описать наш практический опыт проведения комплексного спутникового мониторинга нефтяного загрязнения различных морей. Мы проанализировали типичные ситуации, возникающие при наблюдении из космоса областей морской поверхности, покрытых пленками, в том числе нефтяными. Важно подчеркнуть, что остро назрела необходимость внедрения систем оперативного спутникового контроля загрязнения акваторий. Они позво-

лят устанавливать источники загрязнения, производить количественную оценку объемов загрязнений и прогнозировать их распространение. После принятия соответствующих законодательных актов, результаты космических измерений могут быть признаны в качестве доказательств экологической экспертизы. Особое значение имеет степень достоверности интерпретации спутниковых данных для извлечения информации об антропогенном загрязнении морской поверхности. ■

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-17-00555).

Литература

1. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю. и др. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи физических наук. 2003. Т.173. №1. С.69—87.
2. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: 2011.
3. Бедрицкий А.И., Асмус В.В., Кровотынцев В.А. и др. Космический мониторинг загрязнения российского сектора Азово-Черноморского бассейна в 2008 году // Метеорология и гидрология. 2009. №3. С.5—19.
4. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г. Катастрофический разлив нефти в Мексиканском заливе в апреле-мае 2010 года // Исследование Земли из космоса. 2010. №6. С.67—72.
5. Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Gade M. Multi-Sensor Observation of Meso-Scale Features in European Coastal Waters // Remote Sensing of the European Seas. Eds. V.Barale and M.Gade. Springer Netherlands, 2008. P.463—474.
6. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. №5. С.72—79.
7. Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2012. №3. С.48—65.
8. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Многолетний комплексный спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений поверхности Балтийского и Каспийского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №5. С.269—288.