

Спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности

М.И. Митягина, О.Ю. Лаврова, Т.Ю. Бочарова

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: mityag@iki.rssi.ru*

В работе обобщаются результаты, полученные при проведении многолетнего спутникового мониторинга нефтяного загрязнения различных морей. В основу мониторинга положен комплексный подход к решению задачи обнаружения и прогнозирования распространения нефтяных загрязнений, базирующийся на совместном анализе разнородных данных, полученных методами дистанционного зондирования морской поверхности из космоса.

Большой объем данных позволил провести обобщения и получить статистически достоверные результаты о пространственных и временных изменчивостях проявлений пленочных загрязнений различных типов на радиолокационных изображениях морской поверхности. Выявлены районы, подверженные наиболее частому загрязнению нефтепродуктами. Проанализированы типичные ситуации, возникающие при наблюдении из космоса областей морской поверхности, покрытых поверхностными, в том числе нефтяными, пленками. Подавляющее большинство антропогенных загрязнений морской поверхности Балтийского и Черного морей, выявленных в ходе спутникового мониторинга, представляют собой утечки и сбросы с судов загрязненных нефтепродуктами вод вдоль основных судоходных трасс. Основным источником поверхностного загрязнения открытых участков Каспийского моря в центральной его части является поступление нефти при добыче и разведочном бурении, подводном ремонте скважин, при аварийных разрывах нефтепроводов и зачистке выкидных линий, и т.д. Отдельное внимание в статье уделено проявлениям в спутниковых данных естественных выходов углеводородов на дне Черного и Каспийского морей.

Ключевые слова: спутниковые радиолокационные изображения (РЛИ), спутниковый мониторинг, морская поверхность, нефтяное загрязнение, моря России, естественные выходы углеводородов

Введение

Экологическое состояние морей, омывающих Россию, вызывает обоснованную озабоченность специалистов. Это обусловлено многими причинами: увеличением нефтяного загрязнения вследствие расширения деятельности нефтегазовой отрасли и интенсивности судоходства; повышением концентрации взвешенного вещества в воде, что приводит к увеличению мутности вод и снижению биопродуктивности; аномальным цветением вод, которое с каждым годом охватывает все большие площади, становится более продолжительным и возникает в тех районах, где ранее не наблюдалось.

Проведение экологического мониторинга сейчас уже невозможно представить без использования информации, получаемой с помощью приборов дистанционной диагностики, установленных на различных спутниках, специализированных на дистанционном зондировании Земли. Спутниковый мониторинг является эффективным методом контроля морской среды и позволяет ежедневно отслеживать появление нефтяных загрязнений на обширных акваториях одновременно, включая территориальные воды сопредельных стран, что особенно важно в случае трансграничного переноса загрязнений течениями. Загрязнение морской поверхности нефтесодержащими пленками является основным параметром загрязнения морской поверхности, на выявление и оценку которого направлено внимание исследователей. Авторы статьи, являющиеся сотрудниками лаборатории Аэрокосмической радиолокации Института космических исследований РАН (ИКИ РАН), в ходе выполнения

ряда российских и международных проектов совместно с учеными из Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) и Геофизического центра РАН (ГЦ РАН) приобрели уникальный опыт работы с разнообразной спутниковой информацией о состоянии морей и океанов. Ими развиты новые методики исследования, которые могут применяться для комплексного мониторинга экологического состояния морей России, и разработан эффективный комплексный (мультисенсорный и междисциплинарный) подход к оперативному спутниковому мониторингу нефтяного загрязнения морей России. Разработанные методы и технологии применялись нами на практике, в частности:

С 1999 по 2005 гг. (в летний период) проводились спутниковые радиолокационные наблюдения прибрежной зоны Черного моря в районе Новороссийск – Геленджик (Булатов и др., 2004; Литовченко и др., 2007).

В 2004–2005 гг. в юго-восточной Балтике в районе Кравцовского нефтяного месторождения был организован первый в Российской Федерации успешный комплексный оперативный спутниковый мониторинг нефтяного загрязнения и экологического состояния поверхности моря. Этот пилотный проект выполнялся по инициативе нефтедобывающей компании ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» силами объединенного коллектива специалистов в различных областях дистанционного зондирования ряда научных организаций РАН (Костяной и др., 2006, 2009, 2012; Лаврова и др., 2011).

В 2006–2007 гг. (с апреля по октябрь) совместно со специалистами из НИЦ «Планета» Росгидромета и Института океанологии РАН проводились работы по спутниковому мониторингу загрязнений (береговых, судовых и биогенных) водной среды российского сектора Азово-Черноморского бассейна. (Лаврова и др., 2011; Бедрицкий и др., 2007, 2009; Кровотынцев и др., 2007; Shcherbak et al., 2008).

В ходе выполнения этих работ развивалась технология спутникового мониторинга состояния и загрязнения водной среды по данным микроволнового, видимого и инфракрасного диапазонов. Благодаря комплексному (многосенсорному) подходу к оперативному спутниковому мониторингу нефтяного загрязнения морей, включающему совместный анализ разнообразной спутниковой, океанографической и метеорологической информации, проблемы корректного детектирования нефтяных пятен на морской поверхности минимизируются.

Опыт проведения комплексного спутникового мониторинга и дальнейшее развитие комплексного подхода к решению задачи контроля нефтяного загрязнения морской поверхности из космоса использовались нами при проведении круглогодичного ежедневного оперативного спутникового мониторинга акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей (Лаврова, Митягина, 2009, 2012; Лаврова и др., 2011; Mityagina and Lavrova, 2012; Митягина, Лаврова, 2012; Kostianoy et al., 2013a, 2013b), который осуществляется коллективом лаборатории с начала 2009 г. по апрель 2012 г., когда прекратил свое функционирование на орбите ИСЗ Envisat. После вывода на орбиту спутника Sentinel-1, оснащенного радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА), работы были возобновлены и продолжаются до сих пор.

В ходе работ по проведению мониторинга Черного, Балтийского и Каспийского морей нами накоплен большой объем спутниковой информации. В частности только с февраля 2009 г. по апрель 2012 г. получено, обработано и проанализировано более трех с половиной тысяч радиолокационных изображений (РЛИ) морской поверхности высокого разрешения сенсоров Envisat ASAR и ERS-2 SAR. Практически ко всем из них была подобрана сопутствующая информация: данные спутниковых сенсоров видимого и ИК-диапазонов, данные метеостанций. Большой объем накопленного экспериментального материала обеспечил статистическую достоверность результатов. Огромный массив данных потребовал тщательной совместной обработки и осмысления. Следует отметить, что благодаря фактически взрывному росту объемов информации, получаемой на основе данных дистанционного зондирования, эффективная работа с этой информацией, в том числе ее комплексный анализ, становятся возможными только посредством использования специально разработанных систем и технологий, позволяющих оперировать с большими, постоянно пополняющимися архивами данных. Эти технологии позволяют реализовать совершенно новые подходы к работе с данными дистанционного зондирования. В частности в ИКИ РАН создан и находится в опытной эксплуатации спутниковый сервис See the Sea (STS), ориентированный на описание и изучение различных процессов и явлений, происходящих в океане и атмосфере над ним, на основе разнородных данных спутниковых систем дистанционного зондирования (Лупян и др., 2012).

Постановка задачи и средства получения информации

В ходе выполнения мониторинга состояния и загрязнения поверхности морских акваторий на основе спутниковых данных выявлялись пленочные загрязнения четырех основных типов, обусловленные:

- сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты; выносом сточных и речных вод, содержащих пленочные загрязнения смешанного антропогенного и естественного происхождения;
- грязевым вулканизмом и естественными выходами углеводородов (метановые сипы), которые обнаруживаются в Черном море практически повсеместно;
- повышенной биологической продуктивностью, в том числе с жизненными циклами хлорофилла и активным цветением водорослей.

Успешное решение перечисленных выше задач базировалось на оперативном приеме, обработке и совместном анализе космических изображений в микроволновом, видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра, полученных с помощью различных приборов дистанционной диагностики, установленных на различных спутниках, специализированных на дистанционном зондировании Земли.

Основным средством спутникового контроля состояния морской поверхности и оценки степени ее загрязненности являются спутниковые РСА. Это обусловлено их физическими и техническими особенностями:

- возможность круглосуточной работы благодаря использованию активного зондирования, причём характеристики изображения от времени суток не зависят;
- возможность всепогодной съёмки, т.к. атмосфера практически прозрачна для используемого РСА микроволнового излучения;
- диэлектрические свойства воды в микроволновом диапазоне однородны, что позволяет считать вариации рассеянного сигнала связанными только с геометрическими параметрами возмущений и тем самым облегчает интерпретацию снимков;
- высокое пространственное разрешение современных космических РСА позволяет с необходимой точностью детектировать нефтяные загрязнения даже относительно небольшого размера и оценивать их параметры.

Кроме того, использовались данные сенсоров MODIS ИСЗ Aqua/Terra, MERIS ИСЗ Envisat и AVHRR ИСЗ NOAA видимого и инфракрасного диапазонов, несущие информацию о полях температуры поверхности моря (ТПМ) и мезомасштабной динамике вод. Дополнительно использовались данные сканирующих радиометров Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ и Landsat 8 OLI.

Основные принципы радиолокационного обнаружения нефтяных загрязнений морской поверхности

Основой метода спутникового мониторинга загрязнения морских вод является возможность выявления областей морской акватории, покрытых поверхностными, в том числе нефтяными, пленками (так называемых пленочных сликов) методами спутниковой радиолокации. Наличие поверхностной пленки приводит к понижению интенсивности волно-ветрового взаимодействия и к затуханию резонансной гравитационно-капиллярной компоненты поверхностного волнения. В этом случае на поверхности океана образуются выглаженные области (слики), которые проявляются на РЛИ как области пониженного рассеяния, которые могут служить индикаторами наличия загрязняющих пленок на морской поверхности (Huhnerfuss and Garrett 1981; Lombardini et al., 1989; Ермаков, 2003; Mityagina, Churumov 2006; Иванов, 2007).

Установлено, что пленки в разливах нефтепродуктов характеризуются сильной неоднородностью по толщине и по степени гашения волн и в среднем оказывают меньшее гасящее действие, чем пленки ПАВ (Браво-Животновский и др. 1984; Ермаков и др., 1987; Ермаков, 2010).

Важнейшим фактором, определяющим возможность достоверного детектирования нефтяных загрязнений морской поверхности на РЛИ, является приповерхностный ветер. При скорости ветра, превышающей 9–10 м/с, пленочные загрязнения любой природы – как нефтяные, так и биогенные – не различимы на РЛИ морской поверхности.

В штилевых условиях или при слабых неустойчивых ветрах резонансная составляющая поверхностного волнения может не развиваться, что приводит к ослаблению радиолокационных контрастов. На РЛИ морской поверхности, полученных в условиях слабого припо-

верхностного ветра, присутствует большое количество областей ослабления рассеяния, не относящихся к пленочным загрязнениям, что повышает вероятность «ложной тревоги» при детектировании пятен нефтяных загрязнений по радиолокационным данным.

Радиолокационные образы нефтесодержащих разливов на морской поверхности, естественно, зависят от внешних условий. Контраст между областью разлива и окружающей поверхностью определяется рядом параметров, таких как скорость ветра, высота волн, количество и тип содержащейся в разливах нефти. Форма разлива оказывается разной в случаях выброса из стационарного и движущегося объекта.

Загрязнение морской поверхности нефтесодержащими сбросами с судов

По статистике в Мировом океане судоходство является причиной 45% нефтяного загрязнения океана, в то время как добыча нефти на шельфе – только 2%, поэтому судоходство, включая транспортировку и перевалку нефти на терминалах, оказывает основное негативное влияние на морскую окружающую среду и береговую зону. Основными источниками загрязнений, поступающих с судов, являются нефтесодержащие промывочные, балластные, а также льяльные воды из помещений грузовых насосов. Наши многолетние наблюдения показали, что незаконные сбросы с судов настолько распространены в Балтийском и Черном морях, что в совокупности могут нанести сложившимся экосистемам морей даже больший ущерб, чем отдельные катастрофические разливы нефти.

В Балтийском море, в частности, ежедневно находится около 2000 больших кораблей и танкеров, поэтому судоходство, включая транспортировку и перевалку нефти на терминалах, оказывает основное негативное влияние на морскую окружающую среду и береговую зону Балтийского моря. Подавляющее большинство антропогенных загрязнений морской поверхности, выявленных нами в ходе спутникового мониторинга Балтийского моря, представляют собой утечки и сбросы с судов вод, содержащих нефтепродукты. Сводная карта всех нефтяных пятен, обнаруженных в юго-восточной Балтике в 2009–2012 гг., приведена на *рис. 1*. Представлены реальные формы и размеры пятен. Массив пятен четко вырисовывает основные судоходные трассы в юго-восточной части Балтийского моря, а также трассу вдоль Готланда. Поэтому основными источниками нефтяных загрязнений являются несанкционированные сбросы с морских судов.

Как видно из карты, в этой части акватории Балтики можно выделить четыре района, подверженные наиболее частому загрязнению нефтепродуктами. Такими районами являются:

- основные судоходные трассы к юго-востоку от о-ва Готланд;
- судоходные трассы к портам Клайпеда и Лиепая;
- участок акватории в окрестности Хельской косы;
- участок акватории Гданьского залива вблизи входа в Балтийский (Пилавский) пролив.

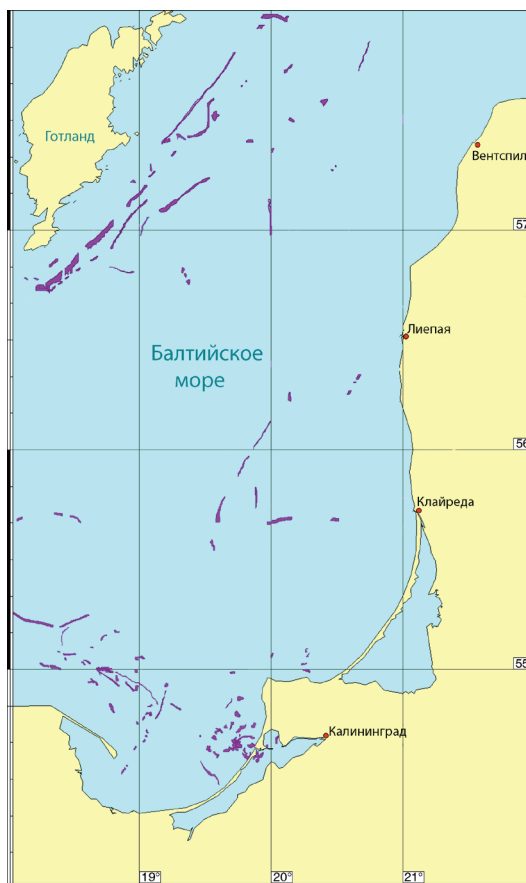


Рис. 1. Сводная карта нефтесодержащих судовых сбросов в юго-восточной части Балтийского моря, обнаруженных в результате анализа данных спутниковой радиолокации в 2009-2012 гг. (Митягина, Лаврова, 2012)

Всего с 1 января 2009 г. по 8 апреля 2012 г. было получено, обработано и проанализировано более семисот РЛИ, полученных радиолокаторами спутников ENVISAT и ERS-2 над юго-восточной частью Балтийского моря, на которых в общей сложности было выявлено 122 отдельных пятна нефтепродуктов. Индивидуальная площадь пятен варьировалась в пределах от 0,1 до 105 км². Количественные оценки межгодовой, сезонной и пространственной изменчивости нефтяного загрязнения морской поверхности в этом районе, выявленного на основе анализа данных спутниковой радиолокации за три года наблюдений, приведены на *рис. 2*.

Совокупная площадь загрязнений, содержащих нефтепродукты, составила более 380 км². Как видно из диаграмм, приведенных на *рис. 2б* и *2в*, количество пятен, выявленных вдоль основных судоходных трасс к портам Клайпеда и Лиепая, трасс, проходящих к юго-востоку от Готланда, и трасс вблизи Хельской косы, примерно одинаково, однако совокупная площадь загрязнений в этих трех районах различна. Максимальная площадь загрязнений выявлена вдоль судоходных трасс к юго-востоку от Готланда, где судовые сбросы отличаются большими длинами и совокупными площадями разливов. Успешное обнаружение нефтяных загрязнений средствами спутниковой радиолокации в определенной степени обусловлено погодными условиями (Brekke, 2005; Espedal, Johannessen, 2000). Этим объясняется тот факт, что наибольшее число загрязнений, выявленных по радиолокационным данным, приходится на период с мая по сентябрь (*рис. 6г*), когда скорость ветра и волнение

преимущественно умеренные или слабые. С октября по апрель нередко наблюдаются ветра со скоростью более 12 м/с и шторма – условия, при которых пленки нефтяных загрязнений быстро разрушаются, и заметного выглаживания морской поверхности не происходит.

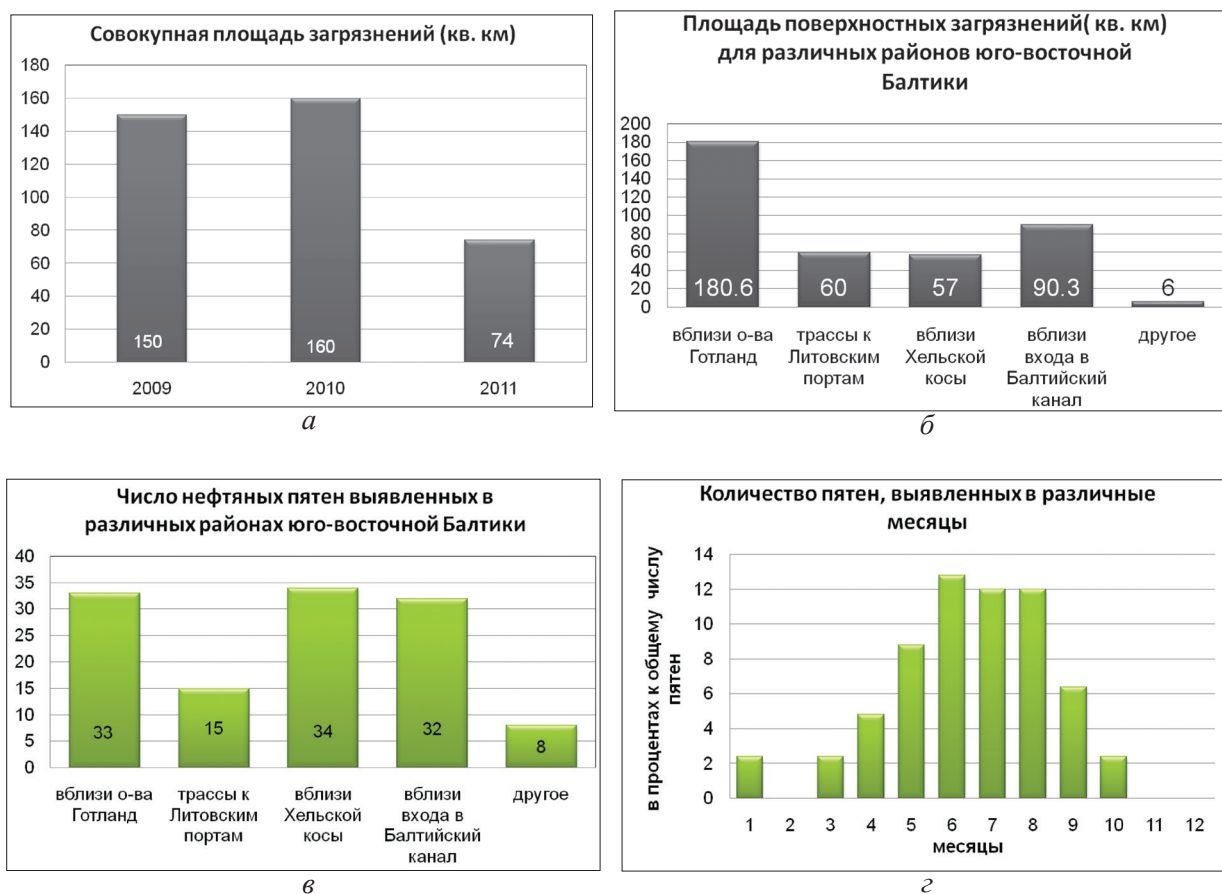


Рис. 2. а) межгодовая изменчивость совокупной площади нефтяного загрязнения морской поверхности в юго-восточной части Балтийского моря; б) пространственная изменчивость площадей нефтяных загрязнений морской поверхности в юго-восточной части Балтийского моря; в) пространственное распределение количества нефтяных пятен в юго-восточной части Балтийского моря; г) сезонная изменчивость количества нефтяных пятен, выявленных в данных спутниковой радиолокации юго-восточной части Балтийского моря (Митягина, Лаврова, 2012)

Отдельный интерес представляет сравнение картины нефтяного загрязнения поверхности Балтийского моря на начало 2012 г. с результатами, полученными в 2004–2005 гг. Сводная карта всех нефтяных пятен, обнаруженных в юго-восточной Балтике в 2004–2005 гг., приведена на рис. 3.

Сравнение результатов комплексного спутникового мониторинга нефтяного загрязнения юго-восточной части Балтийского моря, полученных за 2004–2005 гг. и 2009–2012 гг. показывает (рис. 1 и 3), что ситуация, связанная с антропогенными загрязнениями, в этой части акватории в последние годы значительно улучшилась. Скорее всего, это является следствием усиленного контроля различных организаций стран региона за экологическим состоянием вод. Основной же источник загрязнения, а именно – несанкционированный сброс с судов вод, загрязненных нефтепродуктами, – остается прежним.

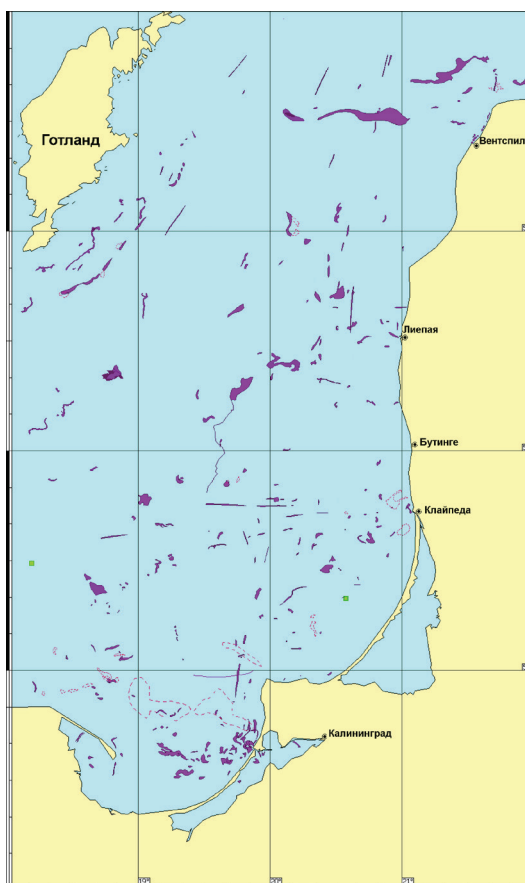


Рис. 3. Сводная карта нефтесодержащих судовых сбросов в юго-восточной части Балтийского моря, обнаруженных в результате анализа данных спутниковой радиолокации с июля 2004 г. по ноябрь 2005 г. (Костяной и др., 2009)

Обобщенная карта-схема нефтяных загрязнений акватории Черного моря, составленная на основе дешифрирования данных спутниковой радиолокации за 2009–2011 гг., представлена на *рис. 4*.



Рис. 4. Сводная карта нефтесодержащих судовых сбросов в Черном море, обнаруженных в результате анализа данных спутниковой радиолокации в 2009-2012 гг.

Как и можно было 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 наибольшему загрязнению подвергается акватория в районе порта Новороссийск и черноморское предпроливье Керченского пролива. К сожалению, география выявленных загрязнений не ограничивается отмеченными выше зонами повышенной концентрации, а охватывает практически всю акваторию моря.

За три года спутниковых наблюдений в акватории Черного моря выявлено более 600 случаев загрязнений морской поверхности нефтепродуктами в результате судовых сбросов. Совокупная площадь загрязнений, содержащих нефтепродукты, выявленных в разные годы, составляла 790 км², 860 км² и 768 км², соответственно (рис. 5а). Индивидуальная площадь пятен варьировалась в пределах от 0,1 до 40 км². Из представленной на рис. 5б диаграммы следует, что более 80% выявленных загрязнений имеют площадь менее 5 км², а в 40% случаев площадь выявленных загрязнений не превосходит 1 км². Однако зачастую суда производят многократные сбросы загрязненных вод в движении на протяжении десятков километров своего пути, и под воздействием ветра и волнения нефтяная пленка растекается и покрывает большую площадь.

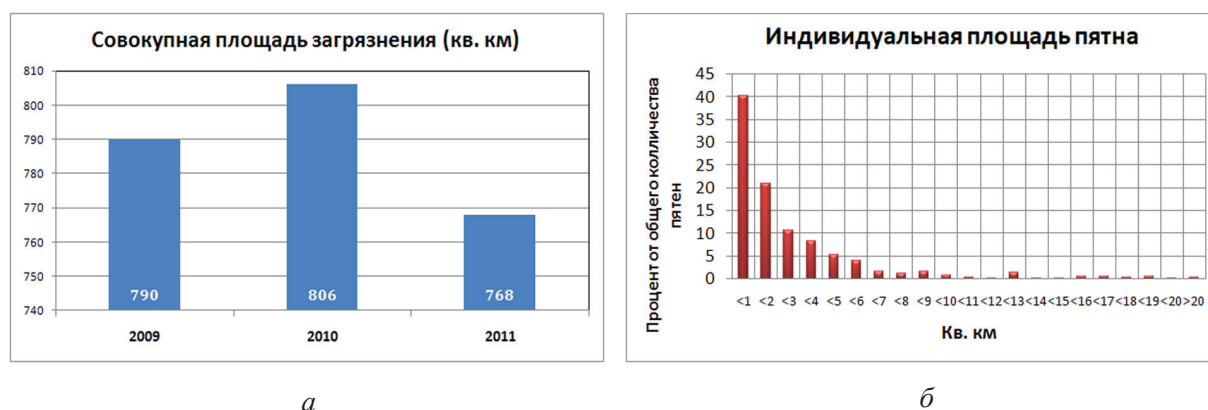


Рис. 5. а) межгодовая изменчивость совокупной площади нефтяного загрязнения морской поверхности Черного моря; б) распределение индивидуальных площадей нефтяных загрязнений морской поверхности Черного моря, выявленных на основе данных спутниковой радиолокации

Антропогенные загрязнения, связанные с утечками и сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты, безусловно, детектируются и на спутниковых РЛИ поверхности Каспийского моря. Анализ спутниковых радиолокационных данных показал, что сбросы с судов концентрируются вдоль основных маршрутов транспортировки нефти судами по Каспийскому морю, которые лежат в направлении Актау – Махачкала, Актау – Нека и Актау – Баку. В отличие от ситуации в Черном и, особенно, в Балтийском морях, несанкционированные сбросы нефтепродуктов с судов на Каспии не являются основным источником пленочных загрязнений морской поверхности, однако, к сожалению, их объемы с каждым годом увеличиваются.

Радиолокационные наблюдения загрязнений морской поверхности в районах добычи нефти на морском шельфе

Выявленная нами в ходе спутникового мониторинга картина поверхностных загрязнений Каспийского моря нефтесодержащими пленками существенным образом отличается от ситуаций, сложившихся в Черном и Балтийском морях, и во многом предопределена природными особенностями Каспийского моря, главной из которых является наличие больших запасов нефти и газа в его недрах. Именно в этом регионе впервые в мире была осуществлена морская добыча, и можно утверждать, что Каспий относится к крупнейшим нефтяным провинциям мира. Доказанные запасы нефти Каспийского региона, составляют 265,2 миллиарда баррелей (Алиев, 2010), что ставит его на второе место после Ближнего Востока. Наиболее существенными источниками загрязнения поверхности Каспийского моря являются разведка и эксплуатация нефтяных месторождений, а также естественные выходы нефти на морскую поверхность по трещинам на дне моря. Существует мнение (Алиев, 2003), что ежегодно из различных источников в Каспий поступает свыше миллиона тонн нефти.

Как видно из приведенной на *рис. 6* обобщенной карты загрязнений, можно выделить два основных района наиболее интенсивного загрязнения морской поверхности Каспийского моря, каковыми являются области Апшеронского и Бакинского архипелагов, а также Западный борт Южно-Каспийской впадины.

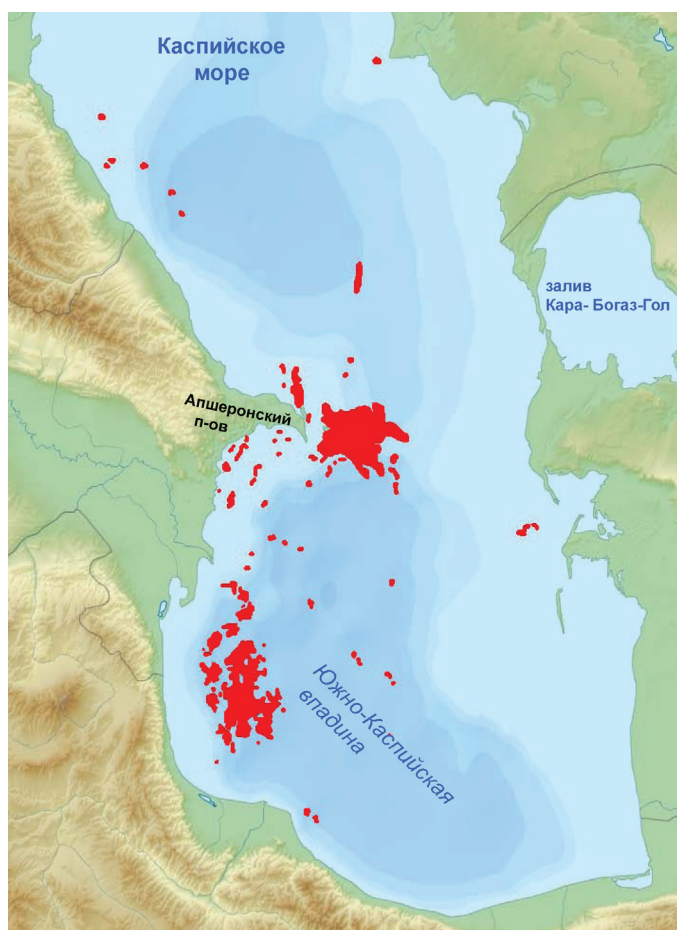


Рис. 6. Сводная карта нефтяных загрязнений поверхности Каспийского моря, обнаруженных в результате анализа данных спутниковой радиолокации за 2009–2011 гг.

Основным источником поверхностного загрязнения открытых участков моря в центральной его части и в области Апшеронского и Бакинского архипелагов является поступление нефти при добыче и разведочном бурении, подводном ремонте скважин, при аварийных разрывах нефтепроводов и зачистке выкидных линий, а также из естественных и особенно искусственных грифонов (выход нефти на поверхность моря). При этом количество выбрасываемой нефти во время действия грифона может колебаться от 100 до 500 т в сутки.

На всех без исключения РЛИ, полученных нами в ходе мониторинга в районах нефтедобычи, идентифицируются нефтяные пятна, причем следы нефти выявляются зачастую на площади более 800 км² вокруг морских буровых платформ. Данные, полученные в 2014–2015 и 2009–2011 гг., сравнивались с архивными данными за 2003, 2006 и 2007 гг., и оказалось, что ситуация практически не меняется.

Факторами, оказывающими наибольшее влияние на размер, форму и направление распространения нефтяного загрязнения в окрестности нефтедобывающей платформы являются приповерхностный ветер и поверхностные течения. Система поверхностных течений в районе нефтедобычи Нефтяные Камни является сложной и отличается неустойчивостью. Именно в этом районе наблюдаются самые высокие по акватории Каспия скорости поверхностных течений, достигающие 10 см/с (Мамедов, 2007). Наши наблюдения показывают, что на первой стадии своей эволюции нефтяное загрязнение растекается и распространяется в основном под действием приповерхностного ветра. Затем нефтяное пятно может оказаться захваченным поверхностными течениями и распространяться этими течениями на достаточно большие расстояния или же оказаться вовлеченным в вихревые движения. Примеры эволюции нефтяных загрязнений вблизи нефтедобывающей платформы «Нефтяные камни» представлены на *рис. 7*.

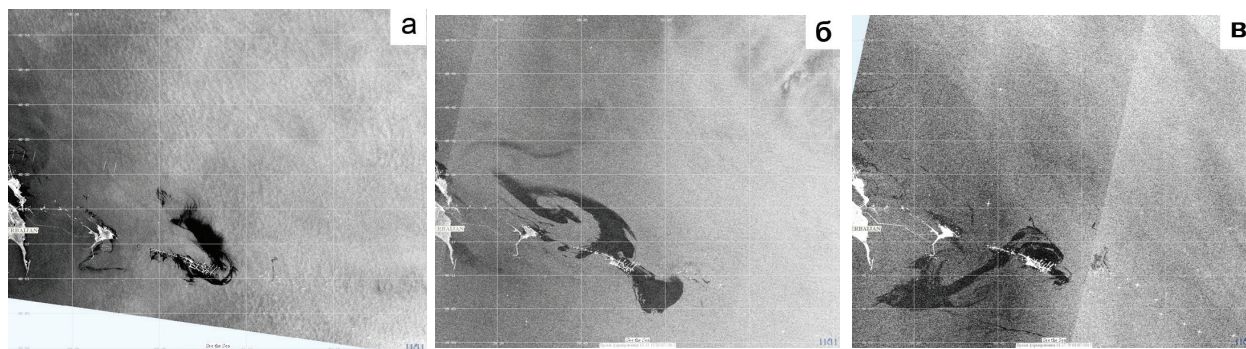


Рис. 7. Примеры эволюции нефтяного загрязнения в окрестности нефтедобывающей платформы «Нефтяные камни» под влиянием ветра и течений.

а) Фрагмент РЛИ Sentinel-1 SAR, полученного 05.01.2015 в 02:43 UTC. Площадь нефтяного загрязнения – 205 км². б) Фрагмент РЛИ Envisat ASAR, полученного 01.08.2010 в 06:42 UTC. Площадь нефтяного загрязнения – 445 км². в) Фрагмент РЛИ Envisat ASAR, полученного 24.06.2010 в 06:36 UTC. Площадь нефтяного загрязнения – 325 км²

Карта, представленная на *рис. 8*, содержит схематические представления нефтяных загрязнений в окрестностях нефтедобывающей платформы «Нефтяные камни», выявленных на РЛИ за 2010 г. Можно видеть, что площадь акватории Каспийского моря вблизи плат-

формы с той или иной частотой подвергаясь нефтяному загрязнению, превосходит 6000 км², что является серьезным фактором, приводящим к ряду негативных экологических последствий и ухудшающим экологическую ситуацию в Каспийском море.

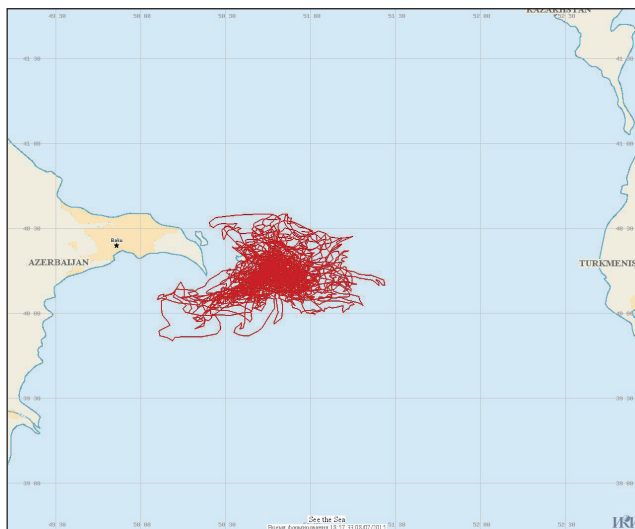


Рис. 8. Сводная карта нефтяных загрязнений в окрестности нефтедобывающей платформы «Нефтяные камни», выявленных по спутниковым радиолокационным данным за 2010 г.

Радиолокационные наблюдения загрязнений морской поверхности в районах естественных выходов углеводородов на морском дне

Юго-западная часть Каспийского моря

Как отмечалось выше, Западный борт Южно-Каспийской впадины также относится к районам наиболее интенсивного загрязнения морской поверхности Каспийского моря (рис. 6). На северо-западном борту Южно-Каспийской впадины сконцентрировано наибольшее количество подводных вулканов (более 300), притом крупных. Большинство грязевых вулканов Южно-Каспийской впадины находится в грифонной стадии развития, выделяя илистую грязь, воду, газ и нефть. Активизация подводных вулканов и грифонов в местах разгрузки углеводородов приводит к появлению на воде грязевых и нефтяных пятен. Существует множество публикаций, посвященных разносторонним исследованиям этого явления, в частности анализ их проявлений на радиолокационных снимках приводился в работах (Иванов, 2010; Иванов и др., 2013; Лаврова и др. 2011; Митягина, Лаврова, 2012).

Характерные примеры пленочных загрязнений, детектированных на РЛИ морской поверхности в юго-западной части Каспия, приведены на рис. 9. Анализ пространственной изменчивости поверхностных проявлений, подобных представленным на рис. 9, показал, что их географическое распределение соотносится с географическим распределением мест локализации подводных грязевых вулканов.

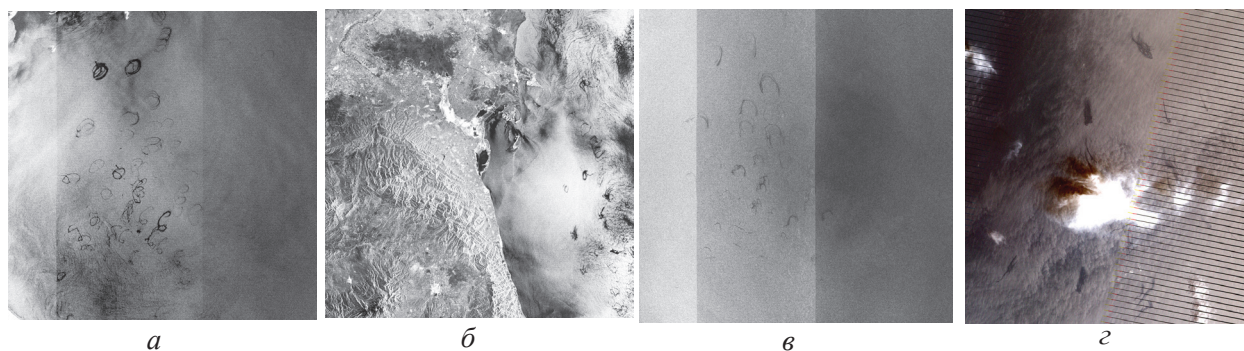


Рис. 9. Грязевулканические проявления в Южном Каспии на спутниковых изображениях:
 а) фрагмент РЛИ Envisat ASAR, полученного 19.06.11 в 18:32; б) фрагмент РЛИ Envisat ASAR, полученного 28.05.11 в 18:38 UTC; в) фрагмент РЛИ Envisat ASAR, полученного 26.05.11 в 06:59 UTC; г) фрагмент цветосинтезированного изображения (каналы 3, 2, 1) Landsat 7 ETM+, полученного 28.05.11 в 07:13 UTC

На рис. 10 представлена карта расположения грязевых вулканов Южно-Каспийского бассейна согласно (Алиев, Рахманов, 2008), на которой красные прямоугольники показывают положение фрагментов РЛИ, приведенных на рис. 9.

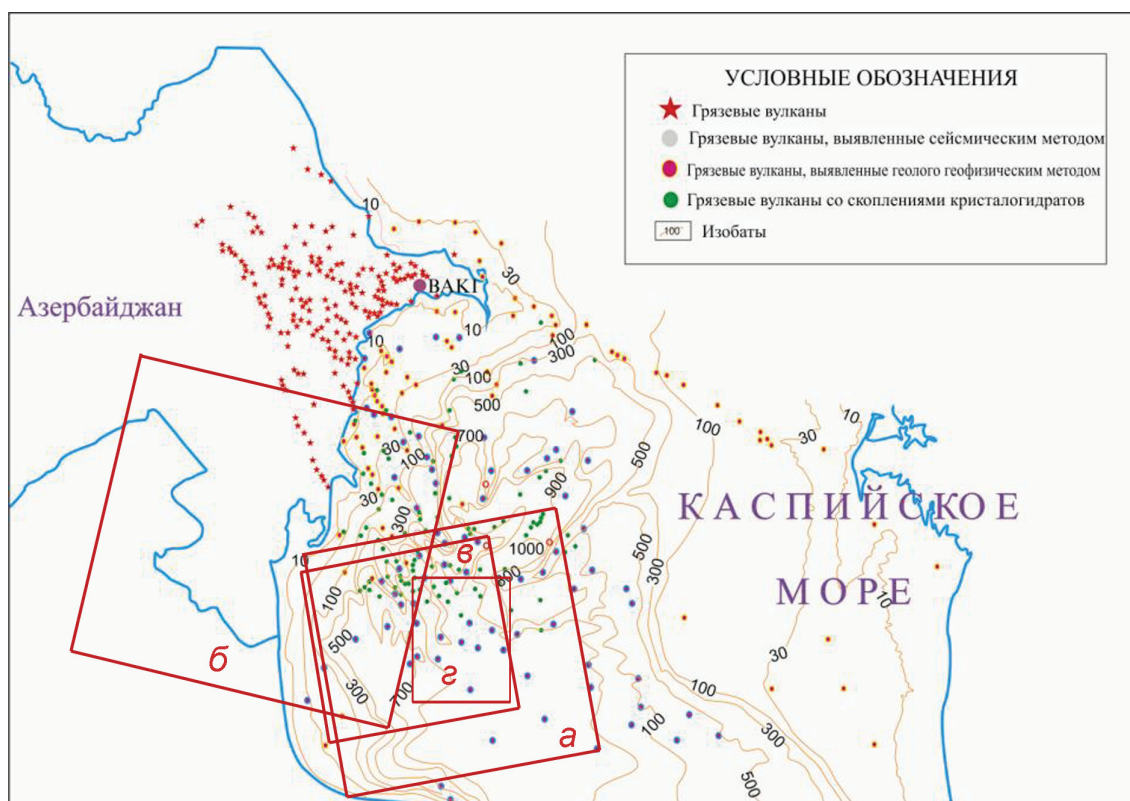


Рис. 10. Карта расположения грязевых вулканов Южно-Каспийского бассейна (Алиев Ад.А., Рахманов, 2008)

Нами были проанализированы все РЛИ акватории Каспийского моря в районе Южно-Каспийской впадины, полученные за период январь 2009 г. – апрель 2012 г. и содержащие поверхностные проявления грязевого вулканизма (так называемые естественные грифоны), и рассмотрена зависимость частоты проявляемости грифонов в радиолокационных данных

от количества и магнитуд землетрясений в Южном Каспии и прилегающих к нему районах. Выявлена достаточно высокая корреляция между проявлениями грифонов на спутниковых изображениях и землетрясениями магнитудой 3–4 балла.

Юго-восточная часть Черного моря

Своеобразной природной лабораторией стал относительно небольшой участок акватории площадью около 20 кв. км в районе грузинского континентального склона Черного моря, где на дне расположены 4 холодных метановых сипа (рис. 11). Проведенные на грузинском континентальном склоне (Егоров и др., 2011) исследования показали, что глубоководные сипы в грузинских водах представляют собой уникальный тип струйных газовыделений, в которых метан сосуществует одновременно в свободной форме и в виде газогидратов. Отличительной чертой этих сипов является присутствие следов нефти в донных газогидратах. На поверхности моря в районах обнаружения этих сипов были замечены нефтяные пятна природного происхождения.

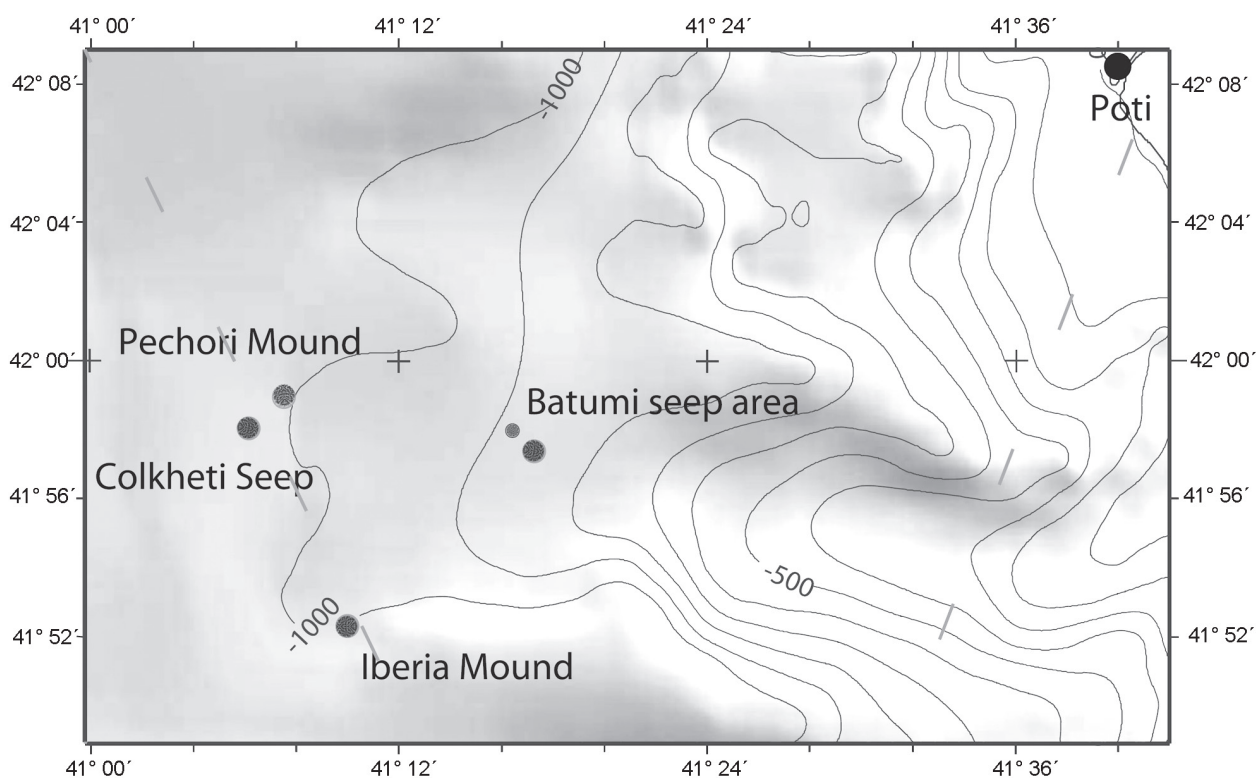


Рис. 11. Батиметрическая карта морского дна в грузинском секторе Черного моря с нанесенными на нее исследованными метановыми сипами (Reitz et al., 2011)

Нами были проанализированы все РЛИ акватории Черного моря, полученные в районе грузинского шельфа и континентального склона, с целью обнаружения на них характерных сликовых структур, которые могли быть обусловлены процессами струйных газовыделений со дна. 64% от общего числа РЛИ содержали характерные радиолокационные образы сликовых структур, локализованных в районе интереса.

На рис. 12 приведены наиболее характерные примеры пленочных загрязнений, детектированных на РЛИ морской поверхности в этом районе. В зависимости от гидрометеорологических условий форма слика изменяется: поверхностная пленка либо вытягивается вдоль направления приповерхностного ветра, либо вовлекается в вихревые движения воды.

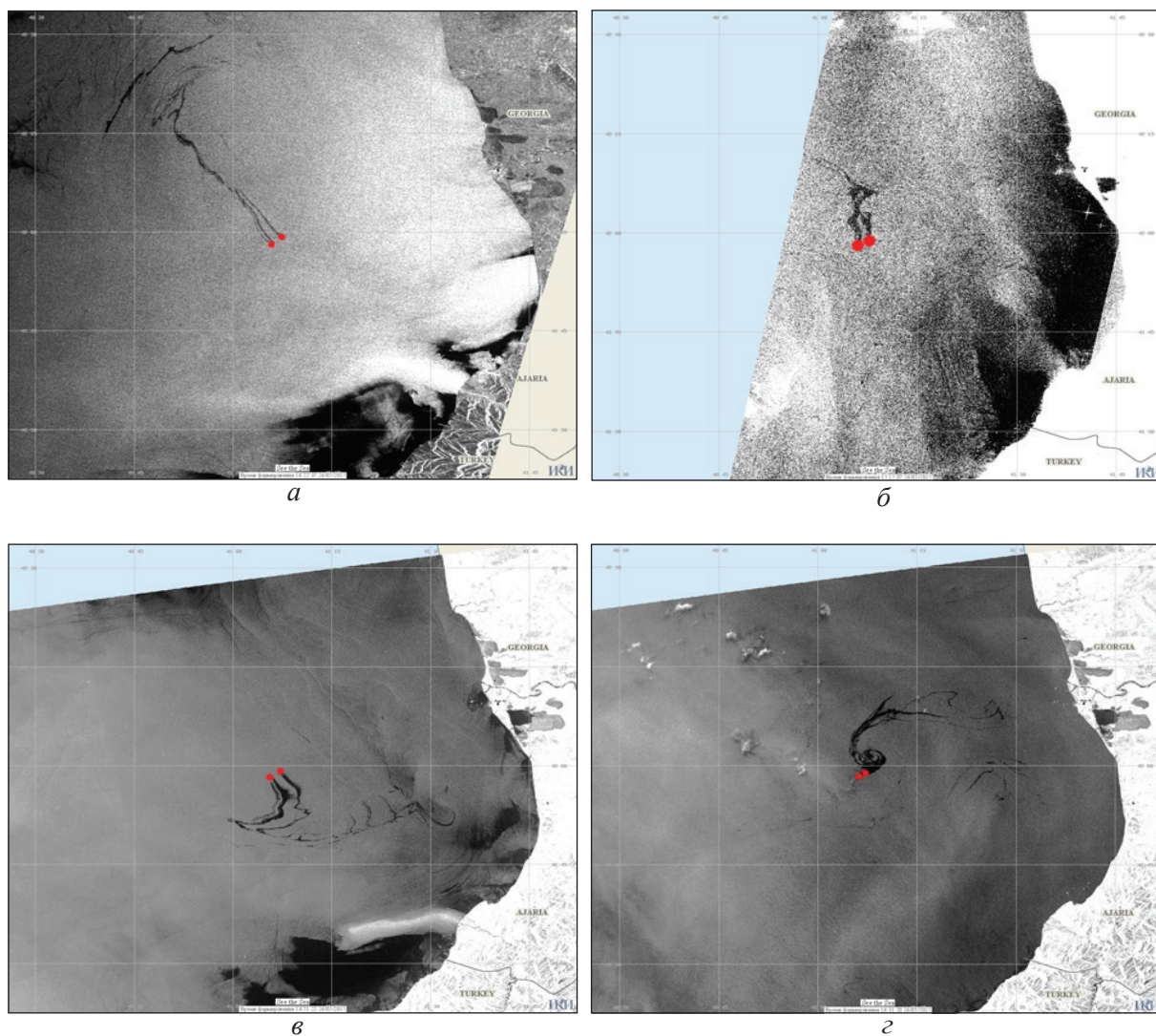


Рис. 12. Пример проявлений сликовых структур в спутниковых радиолокационных данных, полученных над акваторией грузинского континентального склона в районе метановых сипов: а) фрагмент РЛИ Envisat ASAR, полученного 27.10.2010 в 07:32 UTC; б) фрагмент РЛИ Envisat ASAR, полученного 17.09.2011 в 07:21 UTC; в) фрагмент РЛИ Sentinel-1 SAR, полученного 08.11.2014 в 15:10 UTC; г) фрагмент РЛИ Sentinel-1 SAR, полученного 15.10.2014 в 15:10 UTC

В большинстве случаев на РЛИ слики присутствуют в виде «парных» структур. Сопоставляя места локализации сликов, выявленных на РЛИ, и места локализации метановых сипов, можно прийти к заключению, что природа этой парности обусловлена тем, что сликовые структуры соответствуют естественным проявлениям углеводородов из двух близко расположенных метановых сипов, а именно, сипа «Колхети» (Colkhети Seep) и купола Печори (Pechoru Mound) на морском дне (рис. 11).

Мониторинг катастрофических разливов нефти

Одна из важнейших задач, которая стоит перед спутниковой океанологией – это определение масштаба бедствия и прогнозирование последствий в случае природных и антропогенных катастроф. Сотрудники лаборатории принимали активное участие в проведении оперативных спутниковых мониторингов при катастрофических разливах нефтепродуктов: в Керченском проливе, при аварии танкера «Волгонефть-139» (11 ноября 2007 г.); в Мексиканском заливе, вследствие разрушения нефтяной платформы Deepwater Horizon (21 апреля 2010 г.), в Гвинейском заливе, при аварии на морской нефтяной платформе Bonga (21 декабря 2011 г.). На основе всей совокупности доступных спутниковых данных проводился ежедневный мониторинг распространения нефтяной пленки, оценивались площадь загрязненной акватории, изучалась гидродинамическая обстановка в районе бедствия и делался прогноз дальнейшего распространения загрязнения (Лаврова и др., 2009; Лаврова, Костяной, 2010; Kostianoy et al., 2014).

Полученные сотрудниками лаборатории результаты мониторинга нефтяных загрязнений были опубликованы в российских и зарубежных монографиях.

Заключение

В статье приведены результаты, полученные нами в ходе многолетних спутниковых наблюдений акваторий Балтийского, Черного и Каспийского морей. Для этих морей нами накоплен большой объем как данных дистанционного зондирования, так и измерений *in situ*. Следует отметить, что эти моря существенно различаются по своим характеристикам и по гидродинамическим процессам, протекающим в них, что способствует выработке обобщенного подхода, допускающего возможность применения развитых методик спутникового мониторинга к различным акваториям Мирового океана. В частности, мы планируем в первую очередь распространить разработанные методики на акватории Баренцева и Карского морей. Эта задача отличается высокой актуальностью в связи с интенсивным освоением Арктики, прежде всего с развитием добычи углеводородов на Арктическом шельфе и интенсификацией судоходства в данном районе Мирового океана.

Ряд важных задач предстоит еще решить. Прежде всего, это надежное распознавание пленочных загрязнений различного происхождения. Назрела необходимость создания такого алгоритма автоматического распознавания именно нефтяных пленок, который с большой вероятностью отличал бы их от биогенных пленок, молодого льда или областей ветрового выглаживания. Существующие в настоящее время алгоритмы автоматического распознавания дают до 50% ошибок. Еще одна очень важная задача – это определение толщины нефтяной пленки. Появление на орбите новых высокочувствительных сенсоров и развитие методик обработки получаемых с их помощью данных позволяют надеяться на решение этой задачи в ближайшем будущем.

Работа по развитию методик оперативного спутникового мониторинга нефтяных загрязнений морской поверхности проводилась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках проектов 06-05-08072-офи и 07-07-13535-офи_ц и темы «Мониторинг» (Гос. Регистрация No 01.20.0.2.00164).

Разработка и усовершенствование информационной системы See the Sea осуществляется при финансовой поддержке грантов РФФИ 11-07-12025-офи-м-2011 и 13-07-12017-офи_м. Исследование влияния динамических и циркуляционных процессов на распространение антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности на основе комплексного использования спутниковой информации проводится при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта 14-17-00555.

Литература

1. Алиев А.А., Рахманов Р.Р. Количественная оценка грязевулканических процессов в Азербайджане // Известия НАНА. Серия Наук о Земле. 2008. № 2. С. 28–47.
2. Алиев И. Каспийская нефть Азербайджана. М.: Известия, 2003. 712 с.
3. Алиев Н. Нефть и нефтяной фактор в экономике Азербайджана в XXI веке. Баку: Letterpress, 2010. 244 с.
4. Бедрицкий А.И., Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Лаврова О.Ю., Островский А.Г. Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей в 2003–2007 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. № 11. С. 5–13.
5. Бедрицкий А.И., Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Лаврова О.Ю., Островский А.Г. Космический мониторинг загрязнения российского сектора Азово-Черноморского бассейна в 2008 г. // Метеорология и гидрология. 2009. № 3. С. 5–19.
6. Браво-Животновский Д.М., Долин Л.С., Ермаков С.А., Зуйкова Э.М., Лучинин А.Г., Титов В.И. Эффект усиления дециметровых ветровых волн в зоне нефтяного слика // Доклады АН СССР. 1984. Т. 276. № 5. С. 1243–1246.
7. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Кузьмин А.В., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Раев М.Д., Скворцов Е.И. Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне (Геленджик, 1999–2002). М.: Книжный дом «Университет», 2004. 135 с.
8. Егоров В.Н., Артемов Ю.Г., Гулин С.Б. Метановые сипы в Черном море. Средообразующая и экологическая роль. Севастополь: ННЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. 405 с.
9. Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н.Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
10. Ермаков С.А. О резонансном затухании гравитационно-капиллярных волн на воде, покрытой поверхностно-активной пленкой // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 5. С. 691–696.
11. Ермаков С.А., Зуйкова Э.М., Салашин С.Г. Трансформация спектров коротких ветровых волн в пленочных сликах // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1987. Т. 23. № 7. С. 707–715.
12. Иванов А.Ю. Слики и плёночные образования на космических радиолокационных изображениях // Исследование Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
13. Иванов А.Ю. Нефтепроявления на поверхности озера Байкал // Исследование Земли из космоса. 2010. № 2. С. 75–87.
14. Иванов А.Ю., Голубов Б.Н., Евтушенко Н.В. Активизация грифонов в северном каспии по данным космической радиолокации // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. 2013. № 16. С. 114.
15. Костяной А.Г., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю., Литовченко К.Ц., Станичный С.В., Соловьев Д.М., Лебедев С.А., Сирота А.М. Оперативный спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений юго-восточной части Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2006. Т. 3. № 1. С. 22–31.
16. Костяной А.Г., Литовченко К.Ц., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю., Лебедев С.А., Станичный С.В., Соловьев Д.М., Сирота А.М. Комплексный оперативный спутниковый мониторинг в 2004–2005 гг. // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Калининград: «Янтарный сказ», 2012. Т.2: Море. С.481–516.
17. Костяной А.Г., О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина. Комплексный спутниковый мониторинг нефтяного загрязнения морей России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Москва: ИГКЭ, 2009. Т. XXII. С. 235–266.
18. Кровотынцев В.А., О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, А.Г. Островский Космический мониторинг состояния природной среды Азово-Черноморского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2007. Т.4. № 1. С. 295–303.

19. Лаврова О.Ю., Бочарова Т.Ю., Митягина М.И., Строчков А.Я. Спутниковый мониторинг последствий катастрофического разлива нефтепродуктов в Керченском проливе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Выпуск 6. Том 1. С. 409-420.
20. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г. Катастрофический разлив нефти в Мексиканском заливе в апреле-мае 2010 г. // Исследование Земли из космоса. 2010. №6. С.67-72.
21. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 472 с.
22. Лаврова О. Ю., М. И. Митягина. Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48–65.
23. Лаврова О., Митягина М. Мониторинг российских морей. Как спутники помогают бороться с загрязнениями в прибрежной зоне // Российский космос. 2009. № 5. С. 38–43.
24. Литовченко К.Ц., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Иванов А.Ю., Юренко Ю.И. Нефтяные загрязнения восточной части Черного моря: космический мониторинг и подспутниковая верификация // Исследование Земли из космоса. 2007. №1. С. 81–94.
25. Лупян Е.А., Матвеев А.А., Уваров И.А., Бочарова Т.Ю., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Спутниковый сервис See the Sea –инструмент для изучения процессов и явлений а поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т 9. № 2. С. 251–261.
26. Мамедов Р.М. Гидрометеорологическая изменчивость и экогеографические проблемы Каспийского моря. Баку: «ЭЛМ», 2007. 436 с.
27. 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.
28. Brekke C., Solberg A. Oil spill detection by satellite remote sensing // Remote Sensing of Environment. 2005. No 5. P. 1–13.
29. Espedal H.A., Johannessen O.M. Detection of oil spills near offshore installations using synthetic aperture radar (SAR) // International Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 21. No 11. P. 2141–2144.
30. Huhnerfuss H., Garrett W.D. Experimental sea slicks: Their practical applications and utilization for basic studies of air-sea interactions // Journal of Geophysical Research. 1981. Vol. 86. P. 439–447.
31. Kostianoy A.G., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Solovyov D.M. Satellite Monitoring of the Nord Stream Gas Pipeline Construction in the Gulf of Finland. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. Vol. 27. P. 221–248.
32. Kostianoy A.G., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Solovyov D.M., Lebedev S.A. Satellite Monitoring of Oil Pollution in the Southeastern Baltic Sea // Oil pollution in the Baltic Sea. The Handbook of Environmental Chemistry. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. Vol. 27. P. 125–153.
33. Kostianoy A.G., Lavrova O.Yu., Solovyov D.M. Oil Pollution in Coastal Waters of Nigeria. in Remote Sensing of the African Seas, V. Barale and M. Gade (Eds), Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. P.149-166.
34. Lombardini P.P., Fiscella B., Trivero P., Cappa C., Garrett W.D. Modulation of the spectra of short gravity waves by sea surface films: slick detection and characterization with a microwave probe // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 1989. Vol. 6. P. 883–890.
35. Mityagina M., Churumov A. Radar backscattering at sea surface covered with oil films // Global Developments in Environmental Earth Observation from Space. (Ed. A. Marcal). Millpress. Rotterdam. Netherlands. 2006. P. 783–790.
36. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu., Satellite survey in the Black Sea coastal zone // International Water Technology Journal. 2012. Vol. 2. No. 1. P. 67–79.
37. Reitz A., Pape T., Haeckel M., Schmidt M., Berner U., Scholz F., Liebetrau V., Aloisi G., Weise S.M., Wallmann K. Sources of fluids and gases expelled at cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2011. Vol. 75. P. 3250–3268.
38. Shcherbak S.S., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Bocharova T.Yu., Krovotyntsev V.A., Ostrovskii A.G. Multisensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the northeastern coastal zone of the Black Sea // International Journal of Remote Sensing. 2008. Vol. 29. No. 21. P. 6331–6345.

Satellite monitoring of oil pollution of the sea surface

M.I. Mityagina, O.Yu. Lavrova, T.Yu. Bocharova

Space Research Institute RAS, Moscow, 117997, Russia

E-mail: mityag@iki.rssi.ru

The paper summarizes results obtained in the course of multiyear satellite monitoring of oil pollution in the sea. An integrated approach to detection and spreading forecast of oil pollution is based on joint analysis of various data of satellite remote sensing of the sea surface.

Analysis of a large databank produced consolidated and statistically reliable results on spatial and temporal manifestation variations of film pollution of different types in radar images of the sea surface. Areas worst affected by oil pollution were revealed. Satellite observations of sea surface films, including oil, were classified. The greatest part of anthropological pollution of the sea surface in the Baltic and Black Seas detected during our monitoring activities is accidental spills and deliberate discharges of liquid oil products along the main ship routes. The largest source of surface pollution in the central Caspian Sea is oil coming from production, prospecting, submarine well repair works, accidental pipeline breaks, pipeline cleaning, etc. Of particular interest in this paper are natural hydrocarbon seeps on the bottoms of the Black and Caspian Seas as manifested in satellite data.

Keywords: satellite radar images, satellite monitoring, sea surface, oil pollution, Russian seas, natural hydrocarbon seeps

References

1. Aliev A.A., Rakhmanov R.R., Kolichestvennaya otsenka gryazevulkanicheskikh protsessov v Azerbaidzhane (Qualitative estimate of mud volcano processes in Azerbaijan), *Izvestiya NANA. Seriya Nauk o Zemle*, 2008, No. 2, pp. 28–47.
2. Aliev I., *Kaspiiskaya neft' Azerbaidzhana* (Caspian oil of Azerbaijan). Moscow: Izvestiya, 2003, 712 p.
3. Aliev N., *Neft' i neftyanoi faktor v ekonomike Azerbaidzhana v XXI veke* (Oil and oil factor in Azerbaijan economics in XXI century), Baku: Letterpress, 2010, 244 p.
4. Bedritskii A.I., Asmus V.V., Krovotyntsev V.A., Lavrova O.Yu., Ostrovskii A.G., Sputnikovyi monitoring zagryazneniya rossiiskogo sektora Chernogo i Azovskogo morei v 2003-2007 gg. (Satellite monitoring of pollution of Russian sectors of the Black and Azov Seas in 2003-2007), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2007, No. 11, pp. 5–13.
5. Bedritskii A.I., Asmus V.V., V.A. Krovotyntsev, O.Yu. Lavrova, A.G. Ostrovskii, Kosmicheskii monitoring zagryazneniya rossiiskogo sektora Azovo-Chernomorskogo basseina v 2008 g. (Space monitoring of pollution of Russian sectors of the Black and Azov Seas in 2008), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2009, No. 3, pp. 5–19.
6. Bravo-Zhivotnovskii D.M., Dolin L.S., Ermakov S.A., Zuikova E.M., Luchinin A.G., Titov V.I., Effekt usileniya detsimetrovykh vetrovykh voln v zone neftyanogo slika (Decimeter wind wave amplification effect in oil slick area), *Doklady AN SSSR*, 1984, Vol. 276, No. 5, pp. 1243–1246.
7. Bulatov M.G., Kravtsov Yu.A., Kuz'min A.V., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Raev M.D., Skvortsov E.I., *Mikrovolnovye issledovaniya morskoi poverkhnosti v pribrezhnoi zone (Gelendzhik, 1999-2002)* (Microwave investigation of sea surface in coastal zone (Gelendzhik, 1999-2002)), Moscow: Knizhnyi dom "Universitet", 2004, 135 p.
8. Egorov V.N., Artemov Yu.G., Gulin S.B., *Metanovye sipy v Chernom more. Sredoobrazuyushchaya i ekologicheskaya rol'* (Methan seeps in the Black Sea. Environmental and ecological role), Sevastopol: NPTs «EKOSI-Gidrofizika», 2011, 405 p.
9. Ermakov S.A., *Vliyanie plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln* (Impact of films on the dynamics of gravity-capillary waves). N.Novgorod: IPF RAN, 2010, 164 p.
10. Ermakov S.A., O rezonansnom zatukhanii gravitatsionno-kapillyarnykh voln na vode, pokrytoi poverkhnostno-aktivnoi plenкой (On resonant attenuation of gravity-capillary waves on water surface covered by surfactant film), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2003, Vol. 39, No. 5, pp. 691–696.
11. Ermakov S.A., Zuikova E.M., Salashin S.G., Transformatsiya spektrov korotkikh vetrovykh voln v plenochnykh slikakh (Transformation of short wind wave spectra in film slicks), *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 1987, Vol. 23, No. 7, pp. 707–715.
12. Ivanov A.Yu., Sliki i plenochnye obrazovaniya na kosmicheskikh radiolokatsionnykh izobrazheniyakh (Slicks and film formations in SAR data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 3, pp. 73–96.
13. Ivanov A.Yu., Nefteproyavleniya na poverkhnosti ozera Baikal (Manifestation of oil on the surface of Lake Baikal), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 2, pp. 75–87.
14. Ivanov A.Yu., Golubov B.N., Evtushenko N.V., Aktivizatsiya grifonov v severnom Kaspii po dannym kosmicheskoi radiolokatsii (Griffon activation in the northern Caspian Sea by SAR data), *Zemlya iz kosmosa: naibolee effektivnye resheniya*, 2013, No. 16, pp. 114.
15. Kostyanoi A.G., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Bocharova T.Yu., Litovchenko K.Ts., Stanichnyi S.V., Solov'ev D.M., Lebedev S.A., Sirota A.M., Operativnyi sputnikovyi monitoring neftyanykh zagryaznenii yugo-vostochnoi

- chasti Baltiiskogo morya (Operational satellite monitoring of oil pollution of the southeastern Baltic Sea), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Vol. 3, No. 1, 2006, pp. 22–31.
16. Kostyanoi A.G., Litovchenko K.Ts., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Bocharova T.Yu., Lebedev S.A., Stanichnyi S.V., Solov'ev D.M., Sirota A.M., Kompleksnyi operativnyi sputnikovyi monitoring v 2004–2005 gg. (Integrated operational satellite monitoring in 2004–2005), In: *Neft' i okruzhayushchaya sreda Kaliningradskoi oblasti* (Oil and environment of the Kaliningrad Region), Kaliningrad: Yantarnyi skaz, 2012, Vol. 2, pp. 481–516.
 17. Kostyanoi A.G., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Kompleksnyi sputnikovyi monitoring neftyanogo zagryazneniya morei Rossii (Integrated satellite monitoring of oil pollution of Russian seas), *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2009, Vol. XXII, pp. 235–266.
 18. Krovotyntsev V.A., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Ostrovskii A.G., Kosmicheskii monitoring sostoyaniya prirodnoi sredy Azovo-Chernomorskogo basseina (Satellite monitoring of environment of the Azov and Black Seas basin), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Vol. 4, No. 1, pp. 295–303.
 19. Lavrova O.Yu., Bocharova T.Yu., Mityagina M.I., Strochkov A.Ya., Sputnikovyi monitoring posledstviy katastroficheskogo razliva nefteproduktov v Kerchenskom prolyve (Satellite monitoring of the aftereffects of a catastrophic oil spill in the Kerch Strait), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Issue 6, Vol. 1, 2009, pp. 409–420.
 20. Lavrova O.Yu., Kostyanoi A.G., Katastroficheskii razliv nefti v Meksikanskom zalive v aprele-mae 2010 g. (Catastrophic oil spill in the Gulf of Mexico in April-May 2010), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 6, pp. 67–72.
 21. Lavrova O. Yu., Kostyanoi A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex satellite monitoring of the Russian seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 472 p.
 22. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sputnikovyi monitoring plenochnykh zagryaznenii poverkhnosti Chernogo morya (Satellite monitoring of surface film pollution of the Black Sea), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 3, pp. 48–65.
 23. Lavrova O., Mityagina M., Monitoring rossiiskikh morei. Kak sputniki pomagayut borot'sya s zagryazneniyami v pribrezhnoi zone (Monitoring of the Russian seas. How satellites help fighting pollution in the coastal zone), *Rossiiskii kosmos*, 2009, No. 5, pp. 38–43.
 24. Litovchenko K.Ts., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Ivanov A.Yu., Yurenko Yu.I., Neftnyye zagryazneniya vostochnoi chasti Chernogo morya: kosmicheskii monitoring i podsputnikovaya verifikatsiya (Oil pollution in the eastern Black Sea: monitoring from space and sub-satellite verification), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 1, pp. 81–94.
 25. Lupyan E.A., Matveev A.A., Uvarov I.A., Bocharova T.Yu., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Sputnikovyi servis See the Sea – instrument dlya izucheniya protsessov i yavlenii a poverkhnosti okeana (The satellite service See the Sea – a tool for the study of oceanic phenomena and processes), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251–261.
 26. Mamedov R.M., *Gidrometeorologicheskaya izmenchivost' i ekogeograficheskie problemy Kaspiiskogo moray* (Hydrometeorological variability and ecogeographical problems of the Caspian Sea), Baku: «ELM», 2007, 436 p.
 27. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu., Mnogoletnii kompleksnyi sputnikovyi monitoring neftnykh zagryaznenii poverkhnosti Baltiiskogo i Kaspiiskogo morei (Long-term complex satellite monitoring of the surface oil pollution of the Baltic and Caspian seas), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 269–288.
 28. Brekke C., Solberg A., Oil spill detection by satellite remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, 2005, No. 95, pp. 1–13.
 29. Espedal H.A., Johannessen O.M., Detection of oil spills near offshore installations using synthetic aperture radar (SAR), *International Journal of Remote Sensing*, 2000, Vol. 21, No. 11, pp. 2141–2144.
 30. Huhnerfuss H., Garrett W.D., Experimental sea slicks: Their practical applications and utilization for basic studies of air-sea interactions, *Journal of Geophysical Research*, 1981, Vol. 86, pp. 439–447.
 31. Kostianoy A.G., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Solovyov D.M., Satellite monitoring of the Nord Stream gas pipeline construction in the Gulf of Finland, In: *Oil pollution in the Baltic Sea*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, Vol. 27, pp. 221–248.
 32. Kostianoy A.G., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Solovyov D.M., and Lebedev S.A., Satellite Monitoring of Oil Pollution in the Southeastern Baltic Sea, In: *Oil pollution in the Baltic Sea*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, Vol. 27, pp. 125–153.
 33. Kostianoy A.G., Lavrova O.Yu., and Solovyov D.M., Oil pollution in coastal waters of Nigeria, In: *Remote Sensing of the African Seas*, Eds. V. Barale and M. Gade, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, pp. 149–166.
 34. Lombardini P.P., Fiscella B., Trivero P., Cappa C., Garrett W.D., Modulation of the spectra of short gravity waves by sea surface films: slick detection and characterization with a microwave probe, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1989, Vol. 6, pp. 883–890.
 35. Mityagina M., Churumov A., Radar backscattering at sea surface covered with oil films, In: *Global Developments in Environmental Earth Observation from Space*. (Ed. A. Marcal), Rotterdam, Netherlands: Millpress, 2006, pp. 783–790.
 36. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu., Satellite survey in the Black Sea coastal zone, *International Water Technology Journal*, 2012, Vol. 2, No. 1, pp. 67–79.
 37. Reitz A., Pape T., Haeckel M., Schmidt M., Berner U., Scholz F., Liebetrau V., Aloisi G., Weise S.M., Wallmann K., Sources of fluids and gases expelled at cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, Vol. 75, pp. 3250–3268.
 38. Shcherbak S.S., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Bocharova T.Yu., Krovotyntsev V.A., Ostrovskii A.G., Multisensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the northeastern coastal zone of the Black Sea, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 21, pp. 6331–6345.