

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ПЛЕНОЧНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2012 г. О. Ю. Лаврова*, М. И. Митягина

Институт космических исследований Российской академии наук, Москва

**E-mail: olavrova@iki.rssi.ru*

Поступила в редакцию 20.07.2011 г.

В работе обобщаются результаты многолетнего комплексного спутникового мониторинга Черного моря, проводимого с целью выявления загрязнений морской поверхности нефтью и нефтепродуктами, а также проявлений биогенных и антропогенных пленок поверхностно-активных веществ. Проведен совместный анализ разнородных данных, полученных методами дистанционного зондирования (ДЗ) морской поверхности из космоса. Большой объем данных позволил провести обобщения и получить статистически достоверные результаты о пространственных и временных изменениях проявлений пленочных загрязнений различных типов на радиолокационных изображениях морской поверхности. Выявлены районы, подверженные наиболее частому загрязнению нефтепродуктами. Выдвинута гипотеза о наличии связи между поверхностными проявлениями определенного типа пленочных загрязнений и естественными газо- и нефтепроявлениями, грязевым вулканизмом в Черном море. Обсуждаются вопросы повышения надежности интерпретации спутниковых данных.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, спутниковая радиолокация, нефтяное загрязнение морской поверхности, биогенные и антропогенные пленочные загрязнения морской поверхности, метановые сипы, естественные газо- и нефтепроявления

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе исследование океана невозможно представить без использования информации, полученной с помощью приборов дистанционной диагностики, установленных на различных спутниках, специализированных на дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ). В последнее время во всем мире запущено большое количество спутников с научной аппаратурой на борту, работающей в разных диапазонах электромагнитного спектра. Огромное количество поступающей со спутников информации используется не только в чисто научных целях, но и для решения многих хозяйственных и природоохранных задач.

Непрерывно возрастает загрязнение нефтепродуктами акваторий российских морей. Это вызвано, прежде всего, увеличением объемов перевозок морским транспортом, в частности, перевозки экспортируемой нефти водным путем, вводом в эксплуатацию новых нефтяных терминалов и морских буровых установок, выносом реками загрязненных вод. Нефтяные загрязнения наносят практически невосполнимый ущерб окружающей среде (Бондур, 2010; Бондур и др., 2006). Они не только оказывают пагубное воздействие на флору и фауну, прежде всего прибрежных районов, нарушая процессы физико-хими-

ко-биологического обмена в системе океан–атмосфера, но и влияют на социальные процессы, нанося непоправимый урон сельскому хозяйству и индустрии туризма, которые несут огромные материальные потери. Своевременное обнаружение и принятие экстренных мер по ликвидации загрязнения может если не предотвратить, то снизить ущерб в десятки раз. Таким образом, назрела жизненно важная необходимость оперативного мониторинга всех российских морей. Вследствие больших размеров акваторий, а зачастую и географической удаленности эта задача может быть решена только методами дистанционного зондирования из космоса.

На заседании Комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики России 27 июня 2011 г., на котором обсуждались экологические аспекты модернизации экономики, Президент РФ Дмитрий Медведев назвал несколько перспективных проектов. Первый из них – создание системы мониторинга экологической обстановки из космоса. Он отметил: “... принят в первом чтении законопроект о создании системы экологического мониторинга, в Государственную Думу внесен законопроект о защите морей от нефтяных загрязнений”.

В России примерами хорошо организованных ежедневных оперативных спутниковых монито-

рингов морских акваторий могут служить: оперативный спутниковый мониторинг юго-восточной части Балтийского моря, который проводился с июня 2004 по ноябрь 2005 г. силами специалистов из шести организаций: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (г. Москва), Институт космических исследований РАН (ИКИ) (г. Москва), Геофизический центр РАН (г. Москва), Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения (г. Москва), Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (г. Калининград), Морской гидрофизический институт (г. Севастополь) (Костяной и др., 2006, 2009; Kostianou et al., 2006), – и оперативный мониторинг состояния и загрязнения морской среды российского сектора Черного и Азовского морей, который проводится с 2003 г. ежегодно с апреля по октябрь под руководством НИЦ “Планета” Росгидромета (Бедрицкий и др., 2007, 2009; Shcherbak et al., 2008). Авторы статьи, работающие в лаборатории Аэрокосмической радиолокации ИКИ РАН, принимали активное участие в проведении обоих мониторингов, обеспечивая получение, обработку, анализ и интерпретацию спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ). Накопленные опыт и основные наработки используются в настоящее время при проведении круглогодичного ежедневного оперативного спутникового мониторинга акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей, который осуществляется коллективом лаборатории с начала 2009 г. по сегодняшний день (Лаврова и др., 2010).

В ходе работ по проведению мониторинга накоплен большой объем спутниковой информации. В частности, с февраля 2009 г. по июнь 2011 г. получено, обработано и проанализировано 2760 РЛИ морской поверхности высокого разрешения сенсоров ASAR Envisat и SAR ERS-2. Практически ко всем из них была подобрана сопутствующая информация: данные спутниковых сенсоров видимого и ИК-диапазонов, данные метеостанций. Огромный массив данных потребовал тщательной совместной обработки и осмысления. Большой объем накопленного экспериментального материала обеспечил статистическую достоверность результатов.

Следует отметить, что задачи выявления загрязнения морской среды и исследования динамических процессов, происходящих в этой среде, необходимо решать в тесной взаимосвязи, поскольку попадая в морскую среду, загрязнения становятся частью этой среды и развиваются по тем же законам, по которым развивается и сама морская среда.

В частности, при проведении мониторинга нами выявлены и подвергнуты исследованию внутренние волны в морях без приливов: выявлены

сезонная, межгодовая и пространственная изменчивости их проявлений, сформулированы предположения об источниках их генерации (Лаврова и др., 2008, 2009, 2010).

Еще одной важной задачей, решаемой на основе данных спутникового мониторинга, является исследование мелкомасштабных вихревых структур и их тонкой пространственной структуры за счет сликового механизма проявления на РЛИ (Митягина, Лаврова, 2009; Mityagina et al., 2010). Однако основная задача – задача спутникового контроля состояния и загрязнения морской поверхности. Результатам спутникового мониторинга акватории Черного моря и проблемам, возникающим при решении этой задачи, посвящена настоящая статья.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И СРЕДСТВА ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

В ходе выполнения мониторинга состояния и загрязнения морской поверхности Черного моря 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 ИК-диапазонах электромагнитного спектра, полученных с помощью различных приборов дистанционной диагностики, установленных на различных спутниках, специализированных на ДЗЗ.

Основным средством спутникового контроля состояния морской поверхности и оценки степени загрязненности являются радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), установленные на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) ERS-2 и Envisat Европейского космического агентства (ЕКА). Это обусловлено следующими физическими и техническими особенностями РСА:

- возможностью круглосуточной работы благодаря использованию активного зондирования,

причем характеристики изображения от времени суток не зависят;

- возможностью всепогодной съемки, 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;

- высоким пространственным разрешением современных космических РСА, позволяющим с необходимой точностью детектировать нефтяные загрязнения даже относительно небольшого размера и оценивать их параметры.

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

Спутниковые данные подвергались следующей обработке:

- координатной привязке РЛИ по навигационным данным, содержащимся в служебной информации к каждому кадру, в результате изображение представляется в координатах долготы-широты;

- подбору гистограммы с целью наилучшего визуального восприятия основных информативных сигнатур на морской поверхности;

- нанесению координатной сетки;

- географической привязке и приведению данных различных приборов дистанционной диагностики, полученных в разных диапазонах зондирования и обладающих различным пространственным разрешением к виду, позволяющему проведение их совместного анализа;

- комплексной обработке и совместному анализу разнородных спутниковых изображений и интеграции результатов обработки спутниковых данных с информацией, полученной из других источников;

- тематической обработке спутниковых данных, включающей в себя интерактивное дешифрирование многозональных спутниковых изображений.

Все полученные РЛ-данные сведены в альбомы, содержащие как сами изображения, так и результаты их дешифровки. Обработанные спутниковые РЛ-данные, полученные над акваторией Черного моря, представлены в Европейской системе океанологических данных SeaDataNet

(<http://www.seadatanet.org>). Подготовка и представление данных осуществляется в рамках международного проекта Upgrade Black Sea Scene (<http://www.blackseascene.net>), участниками которого являются авторы статьи.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Основой метода спутникового мониторинга загрязнения морской поверхности является возможность выявления областей морской поверхности, 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), проявляющиеся на РЛИ как области пониженного рассеяния, которые могут служить индикаторами загрязнения поверхности (Булатов и др., 2003а; Митягина, Чурюмов, 2006; Mityagina, Churumov 2006).

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).

В ходе ряда радиолокационных (РЛ) экспериментов (Булатов и др., 2003б) была экспериментально исследована зависимость РЛ-контрастов при наличии на морской поверхности нефтяной пленки от параметров волнения, скорости и направления ветра и состояния приподнятого слоя атмосферы. Определены условия, оптимальные для РЛ-наблюдений загрязнений: скорость ветра – 3–9 м/с, волнение – до 4 баллов, устойчивая стратификация приподнятого слоя атмосферы.

Важнейшим фактором, определяющим возможность достоверного детектирования нефтяных загрязнений морской поверхности на РЛИ, является приповерхностный ветер (Gade, 1996). 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 РЛ-контрастов. На РЛИ морской поверхности, полученных в условиях слабого приповерхностного ветра, присутствует

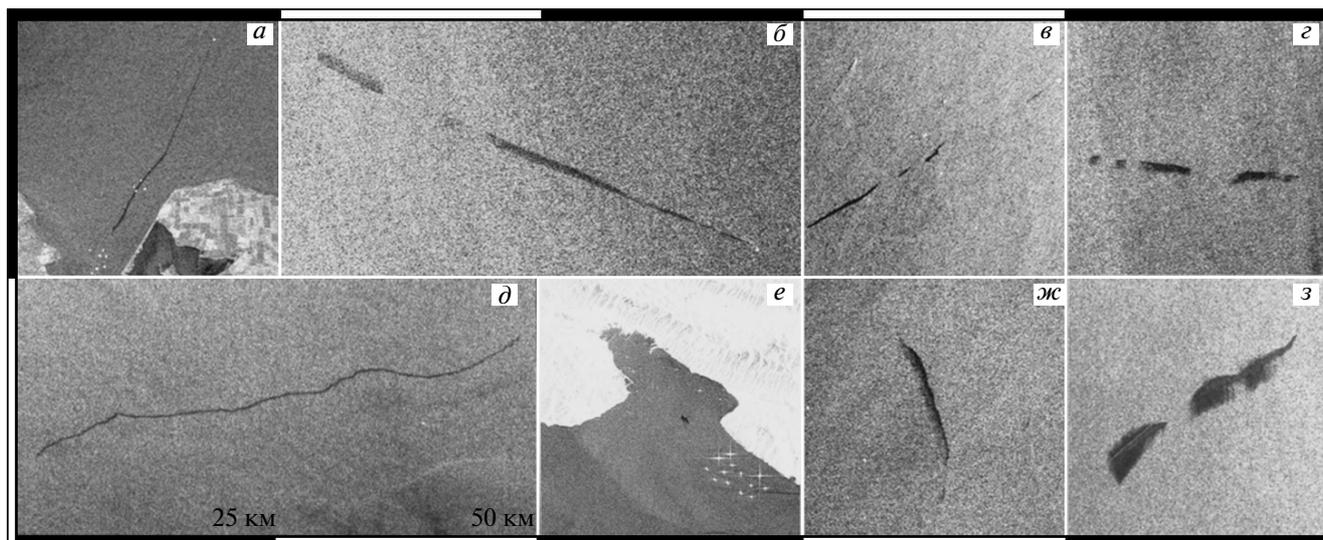


Рис. 1. Нефтяные загрязнения на спутниковых РЛИ акватории Черного моря (© ESA): *а* – ASAR Envisat 10.06.2008, 19:18 UTC; *б* – ASAR Envisat 10.06.2008, 19:18 UTC; *в* – SAR ERS-2 29.08.2009, 08:42 UTC; *г* – ASAR Envisat 13.02.2009, 19:23 UTC; *д* – ASAR Envisat 12.07.2009, 08:22 UTC; *е* – ASAR Envisat 01.08.2007, 07:29 UTC; *ж* – ASAR Envisat 08.04.2009, 08:07 UTC; *з* – ASAR Envisat 12.06.2010, 07:53 UTC.

большое количество областей ослабления рассеяния, не относящихся к пленочным загрязнениям, что повышает вероятность “ложной тревоги” при детектировании пятен нефтяных загрязнений по РЛ-данным.

РЛ-образы разливов углеводородов 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 разлитой нефти. Форма разлива оказывается разной в случаях выброса нефти из стационарного и движущегося объекта.

ПРОЯВЛЕНИЕ НА РЛИ СБРОСОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ С СУДОВ

подавляющее большинство антропогенных загрязнений морской поверхности, выявленных в ходе спутникового мониторинга Черного моря, представляют собой утечки и сбросы с судов вод, содержащих нефтепродукты. Катастрофические разливы нефтепродуктов, прежде всего, при авариях танкеров, происходят довольно редко, и, как правило, не остаются без внимания прессы и общественности. Гораздо чаще загрязнение поверхности моря происходит при рутинных операциях на судах. В открытом море причинами сбросов являются эксплуатационные сливы, утечки, повреждения судового оборудования, аварии и др. В ожидании загрузки танкеры зачастую промывают свои танки. Таким образом, основными источниками загрязнений, поступающих с судов, являют-

ся промывочные, балластные, а также льяльные воды из помещений грузовых насосов.

Одним из главных характерных признаков, помогающих выявить нефтяное пятно на РЛИ, является его геометрическая форма. С этой точки зрения, сбросы с кораблей можно условно разделить на два класса – сбросы с судов во время их движения и сбросы с неподвижных судов. В обоих случаях на РЛИ пятна выглядят “инородными телами” на фоне общей структуры изображения.

При сбросе с судна в движении пятно нефтепродуктов, в отсутствие сильного ветра и волнения, проявляется на РЛИ в виде узкой полосы понижения сигнала, повторяющей маршрут движения корабля. Чаще всего это узкая прямая полоса или полоса с изломом. Если сброс происходил во время РЛ-съемки или непосредственно перед ней, то полоса сужается в сторону более свежей ее части, и, как правило, удается идентифицировать и судно-виновника сброса. Суда могут сбрасывать воды, содержащие нефтепродукты, на протяжении нескольких десятков километров своего пути. На рис. 1*а, б* приведены примеры РЛ-образов “идеальных” свежих сбросов. Изображение, приведенное на рис. 1*а*, получено районе Керченского пролива в условиях слабого ветра и небольшого волнения, а изображение, приведенное на рис. 1*б* – в центральной части Черного моря в условиях умеренного ветра и развитого волнения. Сужение полос к северо-востоку (СВ) и юго-востоку (ЮВ) соответственно, свидетельствует о том, что суда, сбрасывающие нефтепродукты, движутся в этих направлениях. Яркие точки на СВ и ЮВ концах полос показывают текущее по-

ложение судов. В первом случае полоса загрязнений тянется на 21 км, во втором — на 45 км.

Нередко суда производят многократные сбросы загрязненных вод в движении. Два таких примера представлены на рис. 1*в, г*. На рис. 1*в* выделяется четкий прерывистый след протяженностью около 30 км. Заканчивается он яркой точкой, отмечающей положение движущегося судна. Разлив происходил незадолго до момента РЛ-съемки, растекание пленки еще в самом начале — полоса сужена по направлению к судну и имеет высокий контраст по отношению к окружающей поверхности. Гораздо большей степенью растекания пленки и более слабым контрастом отличается прерывистая полоса протяженностью 21.5 км, представленная на рис. 1*г*. Этот разлив произошел за несколько часов до съемки, и судно-виновника выявить невозможно. Очевидно, сброс осуществлялся в несколько этапов, общая площадь загрязнений на момент РЛ-съемки составляет порядка 8.2 км².

Усложнение гидрометеорологических условий — усиление приводного ветра, развитие волнения — затрудняет распознавание нефтяных пленок. На примере, показанном на рис. 1*д*, виден достаточно свежий разлив, длиной около 70 км с движущегося судна в западной части Черного моря недалеко от м. Калиакра. Форма полосы исказилась вследствие воздействия локальных течений и приповерхностного ветра, сужение в сторону более свежей части разлива определить не так легко. Выявить судно, с которого произошел сброс, не представляется возможным, а, кроме того, нельзя однозначно указать на судно-виновника разлива. Осложняющим фактором в данном случае является неустойчивая стратификация пограничного слоя море—атмосфера, дающая неровный, ячеистый фон на изображении.

При сбросе с неподвижного судна, в отсутствие ветра и волнения, растекание нефти происходит более или менее равномерно во все стороны, поэтому пятно принимает округлую форму. Однако наличие ветра и волнения может оказать существенное влияние на структуру пятна (пример приведен на рис. 1*е* — зафиксирован сброс с неподвижного судна в Цемесской бухте, общая площадь загрязнения 0.6 км²). В некоторых случаях пятно может вытянуться в линию так, как будто сброс произошел с движущегося судна.

Ветер существенно влияет на внутреннюю структуру нефтяного разлива как напрямую, так и опосредованно. Под непосредственным воздействием ветра пленка нефти перемещается, а нефть аккумулируется на подветренной стороне пятна. Кроме того, приповерхностный ветер возбуждает динамические процессы в верхнем слое воды.

Наиболее распространенный из таких процессов — циркуляция Ленгмюра, представляющая собой вытянутые по ветру вихри перемежающихся направлений. Движение воды в вихрях происходит в плоскости, перпендикулярной направлению скорости ветра. Тем самым на поверхности моря возникают перемежающиеся зоны дивергенции и конвергенции. В последних и концентрируется нефть. Пятно приобретает характерный вид “гребенки”. Примеры такой трансформации полосы сброса с движущегося судна приведены на рис. 1*ж, з*. Общая площадь загрязнения составила 8 и 28 км² соответственно.

Наши многолетние наблюдения показали, что незаконные сбросы с судов настолько распространены, что в совокупности могут нанести сложившимся экосистемам морей даже больший ущерб, чем отдельные катастрофические разливы нефти.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА

Авторы статьи имеют более чем десятилетний опыт работ по спутниковому мониторингу Черного моря, включающий в себя три этапа:

— с 1999 по 2005 гг. (в летний период) проводились спутниковые РЛ-наблюдения прибрежной зоны Черного моря в районе Новороссийск—Геленджик (Булатов и др., 2003а; Литовченко и др., 2006);

— 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. В ходе выполнения этих работ применялась технология спутникового мониторинга состояния и загрязнения водной среды по данным микроволнового, видимого и ИК-диапазонов (Lavrova et al., 2006; Бедрицкий и др., 2007, 2009);

— с начала 2009 г. по сей день проводится круглогодичный спутниковый многосенсорный мониторинг всей акватории Черного моря.

Систематизация спутниковых данных по загрязнению СВ части Черного моря нефтепродуктами, сброшенными с проходящих судов, позволила выявить районы наиболее частого сброса вдоль судоходных трасс в п. Новороссийск и п. Туапсе, а также на подходе к нефтяному терминалу м. Железный Рог и в районе Керченского пролива.

На рис. 2 представлена обобщенная карта-схема значительных нефтяных загрязнений СВ части Черного моря (российский сектор), составленная на основе дешифрирования данных спутниковой радиолокации высокого разрешения, получен-

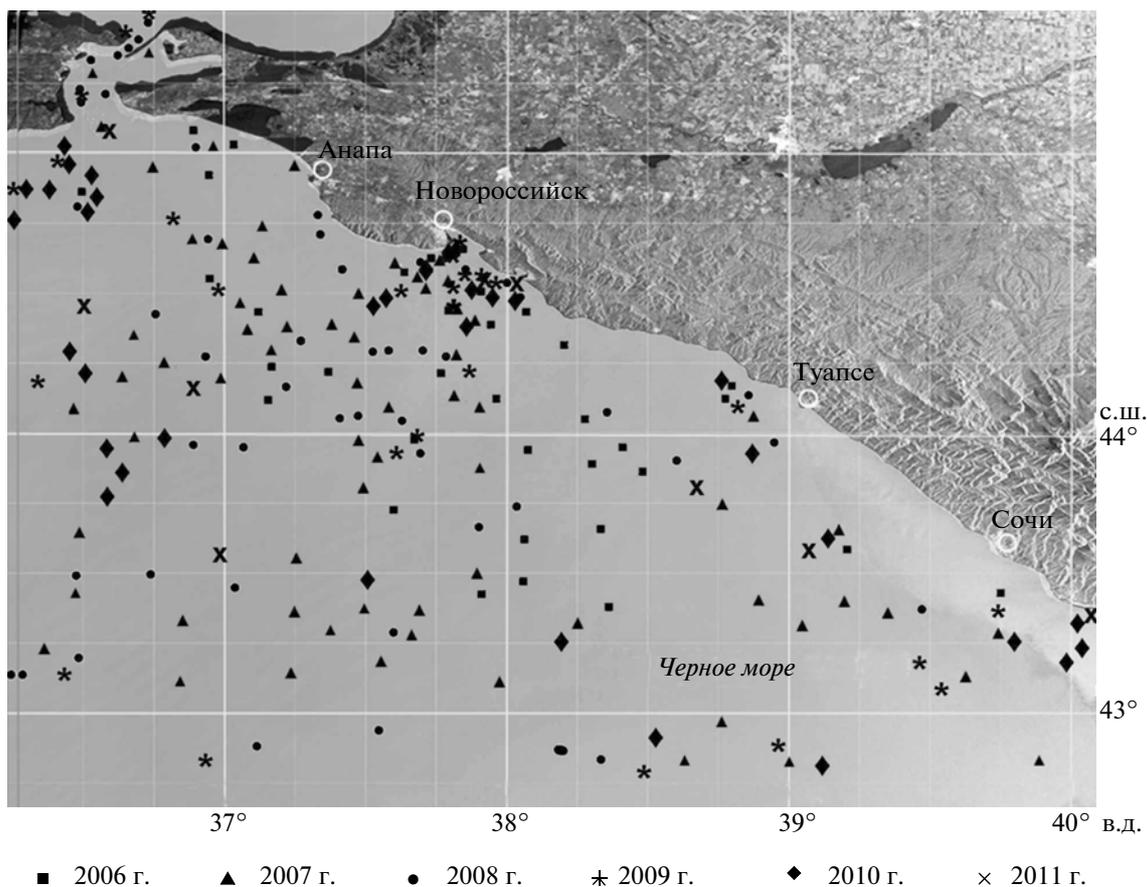


Рис. 2. Обобщенная карта-схема значительных нефтяных загрязнений российского сектора Черного моря, составленная на основе дешифрирования данных спутниковой радиолокации высокого разрешения, полученных в период с 2006 г. по июнь 2011 г.

ных в период с 2006 г. по июнь 2011 г. За пять лет спутниковых наблюдений в российском секторе Черноморского бассейна выявлено более 300 случаев загрязнений морской поверхности нефтепродуктами в результате судовых сбросов. Индивидуальная площадь пятен варьировалась в пределах от 0,1 до 30 км². Совокупная площадь загрязнений, содержащих нефтепродукты, составила более 800 км².

Обобщение результатов круглогодичного спутникового мониторинга всей акватории Черного моря позволила сделать следующие заключения. Как и следовало ожидать, сбросы с судов концентрируются вдоль основных судоходных трасс Стамбул–Новоросийск, 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 Новоросийск и Черноморское предпроливье Керченского пролива.

К сожалению, география выявленных загрязнений не ограничивается отмеченными выше зонами повышенной концентрации, а охватывает практически всю акваторию моря.

Обобщенная карта-схема нефтяных загрязнений всей акватории Черного моря, составленная на основе дешифрирования данных спутниковой радиолокации за 2009 г., представлена на рис. 3.

Всего за 2009 г. на спутниковых РЛИ акватории Черного моря было выявлено 293 загрязнения морской поверхности, связанных с нелегальными сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты. Из них 224 пятна зарегистрировано в западной и центральной частях моря. В восточной части – 69 пятен. Такая большая разница в количестве выявленных загрязнений обусловлена следующими причинами: во-первых, наличием большего количества РЛИ, полученных над западной и центральной частями Черного моря, и, во-вторых, более активным судоходством в этих районах.

На картах, представленных на рис. 2 и 3, обозначены только те пятна, которые, безусловно,

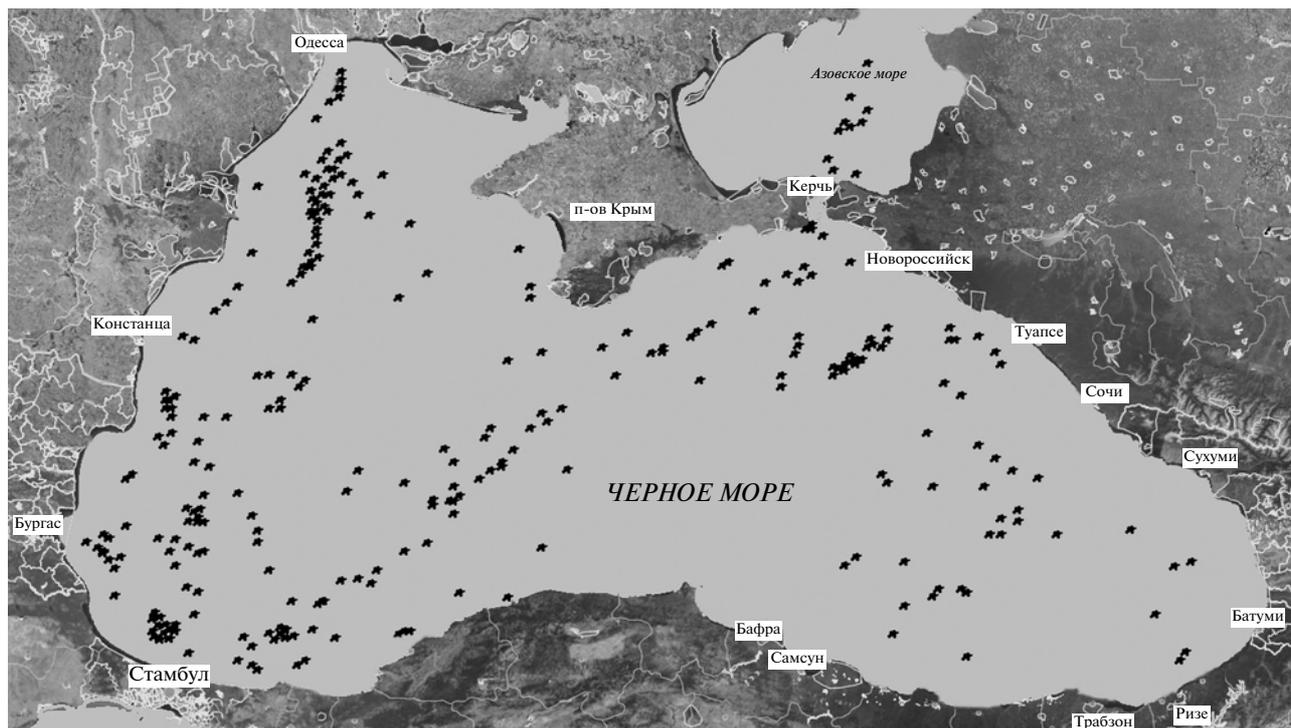


Рис. 3. Обобщенная карта-схема нефтяных загрязнений поверхности Черного моря, составленная на основе дешифрирования спутниковых данных в 2009 г.

могут быть отнесены к загрязнениям морской поверхности углеводородами, содержащимися в судовых сбросах.

Необходимо подчеркнуть, что при проведении мониторинга антропогенных загрязнений, особенно при выявлении несанкционированных сбросов с судов вод, содержащих нефтепродукты, возникает сложность дискриминации РЛ-образов антропогенных и естественных биогенных пленок. Зачастую, если длинный темный след наблюдается на РЛИ практически сразу за кораблем, которому на РЛ-снимках соответствует яркая белая точка, то не обладающий достаточным опытом интерпретатор, как правило, однозначно идентифицирует этот темный след как сброс с судна загрязненных вод. Однако следует отметить, что при активном цветении фитопланктона темный след может быть никак не связан с антропогенным загрязнением. Этому можно дать следующее объяснение. Образованию на морской поверхности органической пленки, состоящей из микроводорослей фитопланктона, способствует известный механизм извлечения из воды различных веществ с помощью мелких пузырьков воздуха – флотация (Скворцов и др., 2010). При движении судов и при обрушении волн образуется большое число воздушных пузырьков различных размеров. Крупные пузырьки всплывают быстро, а основная масса, с размерами менее 1 мм, всплы-

вает со скоростью 1–10 см/с. Для крупнотоннажных судов с осадкой 10–15 м время всплытия может составлять 20–25 и более минут. Поэтому, как показывают примеры, приведенные в работе (Скворцов и др., 2010), пленочный след за кораблем проявляется на поверхности моря примерно через 25 мин после прохождения судна и восстановления поверхностного ветрового волнения.

При соприкосновении воздушного пузырька с гидрофобной частью клетки фитопланктона пленка воды стягивается силами поверхностного натяжения, и происходит присоединение клетки фитопланктона к пузырьку. Далее клетка всплывает вместе с пузырьком, и после разрушения последнего остается в пограничном слое воды. Такой процесс увеличения концентрации клеток фитопланктона должен приводить к изменению электрофизических параметров приповерхностного слоя, что в свою очередь должно изменять характеристики отраженных сигналов в микроволновом диапазоне. При большом количестве мелких (менее 1 мм) медленно всплывающих пузырьков на морской поверхности будет образовываться пленка из планктона и продуктов его жизнедеятельности, достаточная для заметного гашения гравитационно-капиллярных волн и образования выглаженных полос – сликов. Пример подобного проявления на РЛ-снимках темных длинных следов за кораблями, не связанных со сбросом содер-

жащих нефтепродукты вод, приведен на рис. 4а. РЛИ получено над западной частью Черного моря вблизи дельты Дуная, где воды отличаются повышенным содержанием хлорофилла и взвесей.

Еще одним примером следов за кораблями, не связанных со сбросом содержащих нефтепродукты вод, которые часто детектируются на РЛИ, являются так называемые кильватерные следы за движущимися надводными судами. Кильватерные следы отличаются хорошо узнаваемой структурой, которая подчиняется закону расширения и включает в себя центральную часть, и V-образные “усы”. Область пониженного рассеяния в кильватерном следе, присутствующая на РЛИ, соответствует зоне турбулентной струи, в которой воздействие турбулентности, порожденной винтами судна, приводит к “выглаживанию” ветрового волнения и образованию сликов, различимых на РЛИ. V-образные структуры обусловлены волнами Кельвина, их отображение на РЛИ зависит от условий съемки, в частности, от взаимного расположения азимутального угла съемки и направления движения корабля, его размера, формы и скорости (Reed, Milgram, 2002).

Примеры хорошо различимых кильватерных следов за движущимися наземными судами на РЛ- и оптическом изображениях приведены на рис. 4б, в.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Задача распознавания нефтяных пятен на РЛИ существенно усложняется тем, что эти пятна, особенно при слабом ветре, нелегко отличить от проявлений других явлений и объектов, которые принято называть “подобиями” пятен (Espedal, Johannessen, 2000).

Среди РЛ-подобий нефтяных пятен можно назвать органические пленки, некоторые типы льда (“сало”), области затененные сушей (ветровая тень), области локального ослабления приповерхностного ветра, гидрологические фронты, поверхностные проявления океанических внутренних гравитационных волн, дождевые ячейки, зоны апвеллинга. Все перечисленные выше процессы и явления приводят к перестройке спектра поверхностного волнения, ослабляя резонансную рябь, и проявляются на РЛИ в виде областей пониженного рассеяния, которые могут быть ошибочно интерпретированы как нефтяные загрязнения. Более подробно этот вопрос освещен в работах (Иванов, 2007; Brekke, Solberg, 2005). При проведении мониторинга загрязнения морской поверхности одной из наиболее сложных задач является задача дискриминации поверхностных пленок антропогенного и естественного

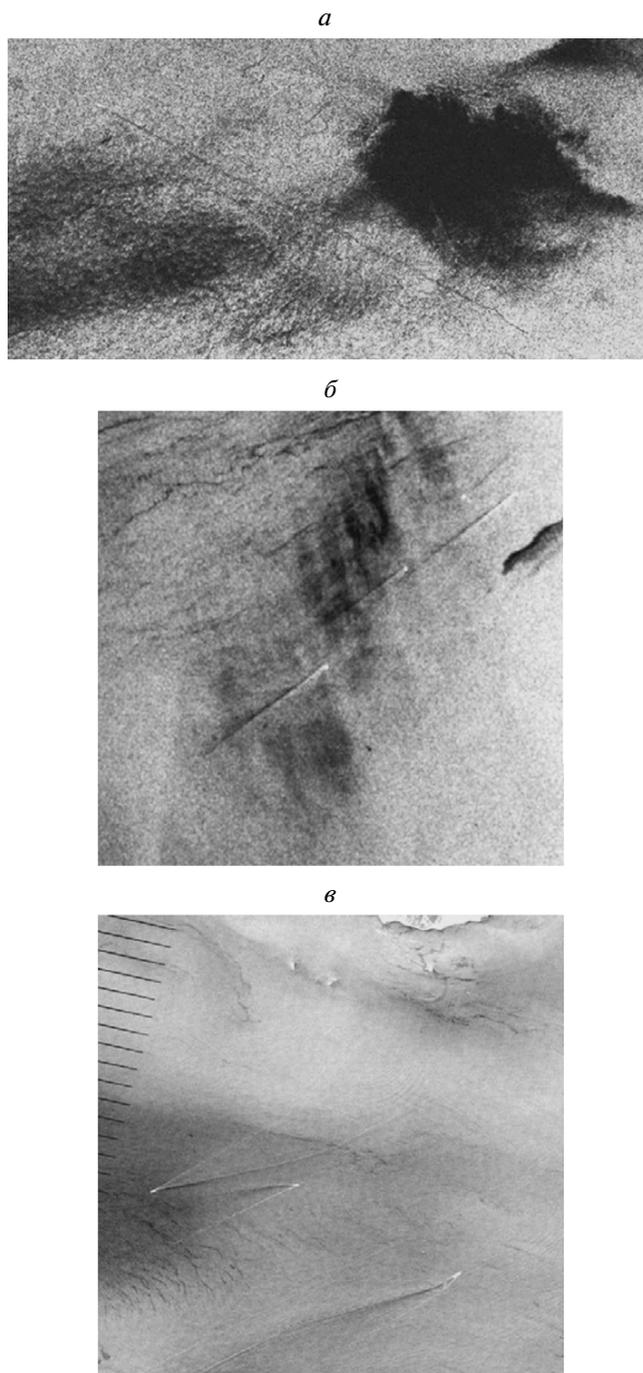


Рис. 4. Примеры следов за кораблями: *а* – фрагмент (5 × 25 км) Envisat ASAR изображения пленочных следов за кораблями, 17.08.2010, 19:34 UTC. Длина следа достигает 50 км; *б* – фрагмент (25 × 25 км) Envisat ASAR изображения кильватерных следов, 23.05.2009, 07:54 UTC. Длина следов 8–10 км; *в* – фрагмент цветосинтезированного изображения (каналы 3, 2, 1) сенсора ETM+ ИСЗ Landsat 7, 06.06.2009, 08:04 UTC. Отчетливо выделяются кильватерные следы длиной 9–10 км.

(биогенного и минерального) происхождения (Митягина, Лаврова, 2007).

На основании опыта проведения спутникового мониторинга различных морей (Костяной и др.

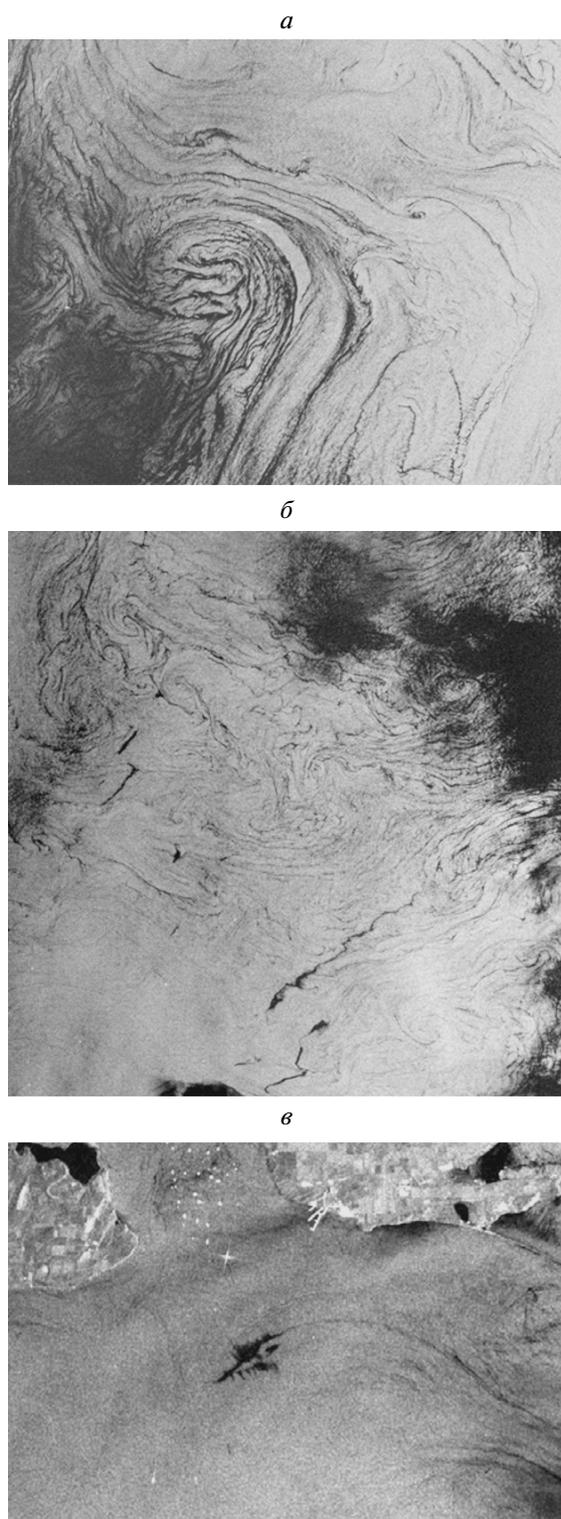


Рис. 5. Примеры сликовых образований, связанных с активным цветением фитопланктона: *a* – фрагмент ASAR Envisat изображения (46×38 км), 30.08.2009, 07:43 UTC с разрешением в точке 12.5 м в северо-восточной части Черного моря; *б* – фрагмент ASAR Envisat изображения (102×104 км), 24.04.2011, 08:11 UTC с разрешением в точке 75 м в южной части Черного моря; *в* – фрагмент ASAR Envisat изображения (55×38 км), 08.06.2009, 07:50 UTC с разрешением в точке 75 м в северо-восточной части Черного моря.

2009; Лаврова и др., 2010) можно утверждать, что для акватории Черного моря задача дискриминации пленочных загрязнений морской поверхности существенно осложняется не только присутствием интенсивного цветения фитопланктона, отличающегося сложной пространственно-временной изменчивостью, но и наличием активного грязевого вулканизма и естественных выходов углеводородов (метановые сипы), которые обнаруживаются в Черном море практически повсеместно (Иванов и др., 1989; Круглякова и др., 2009; Егоров и др., 2011).

Обобщение результатов многолетних спутниковых наблюдений показало, что на поверхности Черного моря регулярно наблюдается большое количество сликовых образований, внешне схожих со сбросами вод, содержащих нефтепродукты, с судов, но имеющих ряд отличительных особенностей. К числу этих особенностей следует отнести большие размеры, своеобразную геометрическую форму, а также наличие сезонной и пространственной изменчивостей их проявления. На рис. 5 приводятся примеры РЛ-образов подобных структур, идентифицированных в различных районах Черного моря, обусловленных биогенными пленками. Биогенные пленки – результат жизнедеятельности морских организмов и растений, главным образом фито- и зоопланктона, а также бактерий. Они образуются в море при сложных биохимических реакциях в процессе жизнедеятельности и разложения морских организмов, и не могут считаться загрязнениями в прямом смысле слова. Подобные биогенные пленки чувствительны к воздействию с поверхностными течениями и принимают геометрическую форму, отвечающую локальной структуре циркуляции. Органические пленки сохраняются в море при слабых ветрах в течение продолжительного времени и начинают разрушаться, когда скорость ветра превышает $6\text{--}7$ м/с. После прекращения действия сильного ветра органические вещества снова выносятся на поверхность и образуют слики. Крупные скопления фитопланктона в Черном море наблюдаются в периоды его “цветения”; в конце весны начала лета – первый пик и осенью – второй пик, при этом на поверхности моря образуются органические пленки, зачастую покрывающие большую площадь морской поверхности. Проблема дискриминации нефтяных загрязнений и биогенных пленок на морской поверхности является темой отдельного исследования, выходящего за рамки данной публикации (Gade et al., 1996; Gade, 2006; Митягина, Лаврова, 2007).

Что касается множественных темных пятен, различимых на рис. 6, то не исключена вероятность, что они имеют иное происхождение. Подобные сликовые образования с определенной

регулярностью проявляются в одних и тех же районах, в частности, на Керченско-Таманском шельфе, на Болгарском шельфе, в глубоководной части к ЮВ от Крымского полуострова и на грузинском континентальном склоне. Согласно опубликованным результатам серий натурных экспериментов, проводившихся с 1993 г. по настоящее время, в Черном море обнаружены струйные газовыделения и холодные метановые сипы по периметру свала глубин и в глубоководной части (Круглякова и др., 2009), а также районы локализации глубоководных грязевых вулканов (Иванов и др., 1989). На рис. 7 приведена обобщенная карта-схема различных видов газопроявлений (газовые выходы, грязевые вулканы), составленная по литературным данным (Круглякова и др., 2009; Егоров и др., 2011).

Районами наиболее интенсивных проявлений разгрузки углеводородных газов из недр в толщу воды являются:

- шельф Болгарии;
- шельф Украины в северной и СЗ частях Черного моря;
- Керченско-Таманский шельф;
- шельф России по всей площади Сочи-Адлерской депрессии;
- грузинский шельф и континентальный склон;
- турецкий шельф в прибрежной зоне восточных Понтид в районе Ризе;
- глубоководная часть. Свыше 60-ти грязевых вулканов задокументировано к настоящему времени в центральной части Черного моря и в прогубе Сорокина на глубинах свыше 1500 м (Шнюков, Клещенко, 2001).

Географическое распределение пленочных загрязнений, подобных представленным на рис. 6, отличающихся постоянством места их проявления, соотносится с географическим распределением мест локализации естественных проявлений углеводородов в Черном море. Понятие естественных проявлений углеводородов в данном случае включает в себя грязевый вулканизм, естественные газо- и нефтепроявления, газогидраты.

В связи с возросшим в последние годы интересом к исследованиям струйных газовыделений, экспедиционные работы в грузинском секторе Черного моря ведутся с 1993 г., начиная с 42-го рейса научно-исследовательского судна (НИС) “Профессор Водяницкий” (июнь 1993 г.). Впоследствии в этом районе экспедиционные работы выполнялись регулярно, в том числе: рейс 46 НИС “Профессор Водяницкий” (август 1994 г.); рейсы германских судов “Посейдон” (рейс 317, октябрь–ноябрь 2004 г.) и “Метеор” (рейс 72, март–апрель 2007 г., рейс 84, март 2011 г.); рейс 26 российского НИС “Профессор Логачев” (июнь

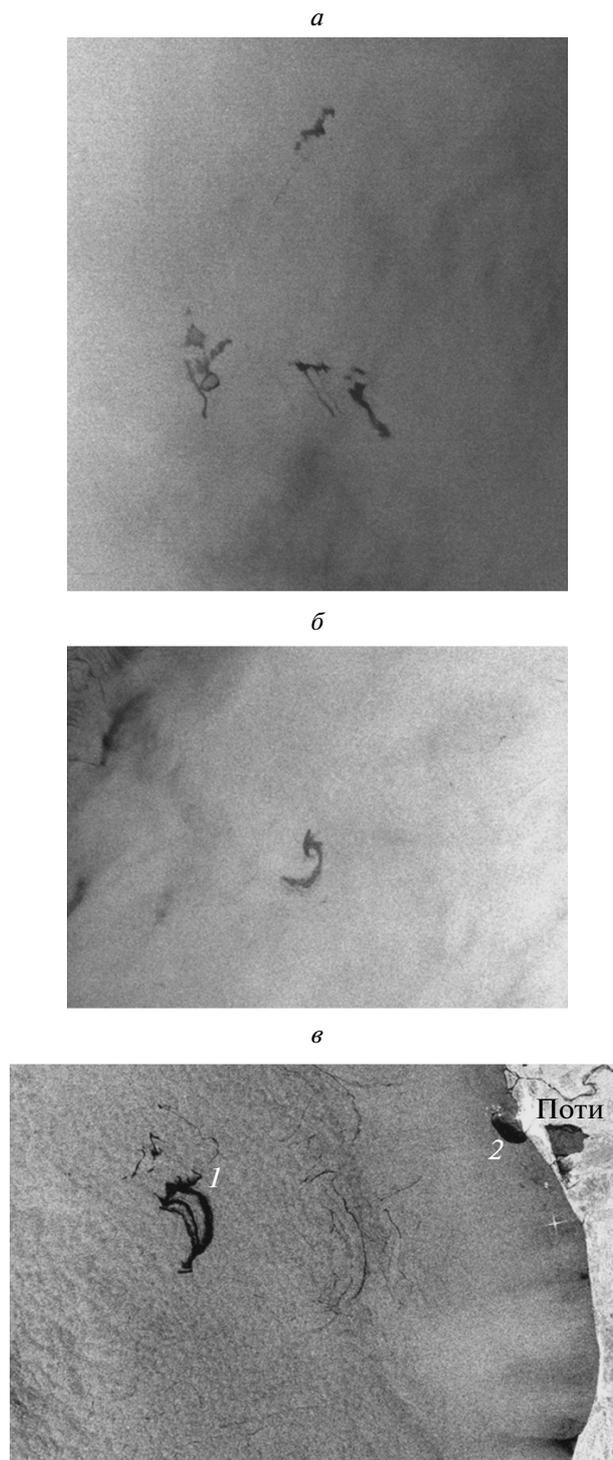


Рис. 6. Примеры сликовых образований, связанных с естественными выходами углеводородов: *а* – фрагмент ASAR Envisat изображения (79 × 88 км), 09.06.11 в 19:43 UTC в западной части Черного моря; *б* – фрагмент ASAR Envisat изображения (70 × 50 км), 07.02.2009, 07:54 UTC в глубоководной части Черного моря южнее Крыма; *в* – фрагмент ASAR Envisat изображения (83 × 55 км), 11.01.2011, 19:02 UTC в восточной части Черного моря. *1* – пленочные загрязнения, связанные с естественными выходами углеводородов; *2* – антропогенные загрязнения. Все представленные на рисунке РЛИ получены с разрешением в точке 75 м.

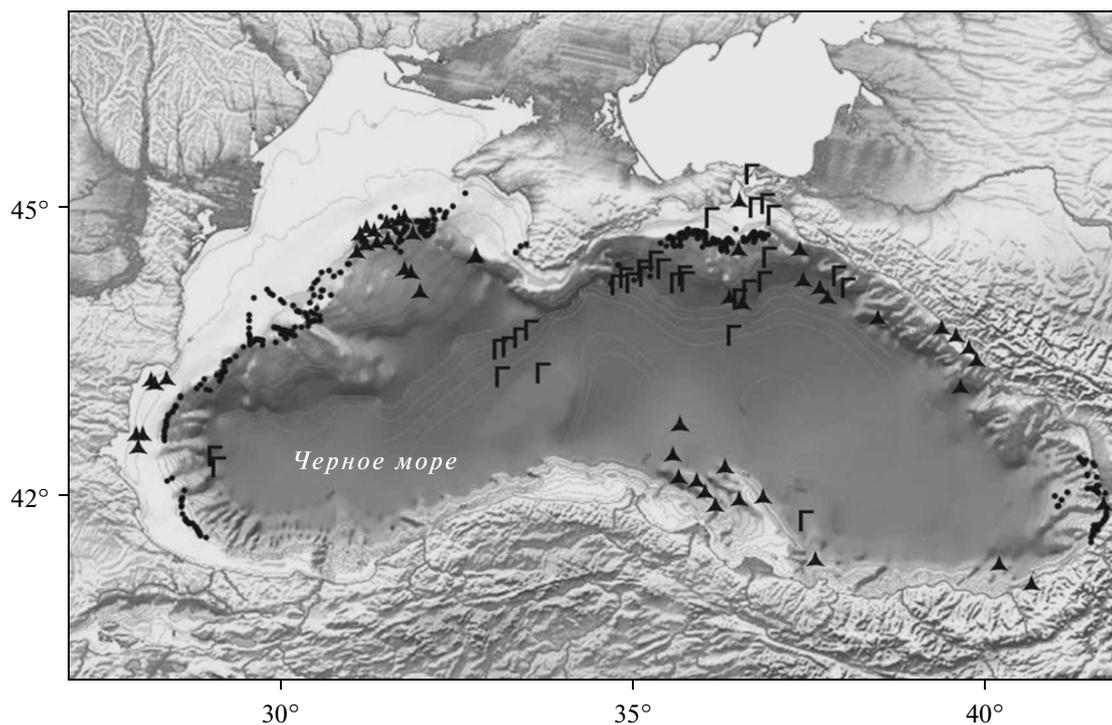


Рис. 7. Карта-схема распределения газовыделений в Черном море. Точки — задокументированные метановые выделения. Черные треугольники — выходы нефти и газа на поверхность. Г — грязевые вулканы.

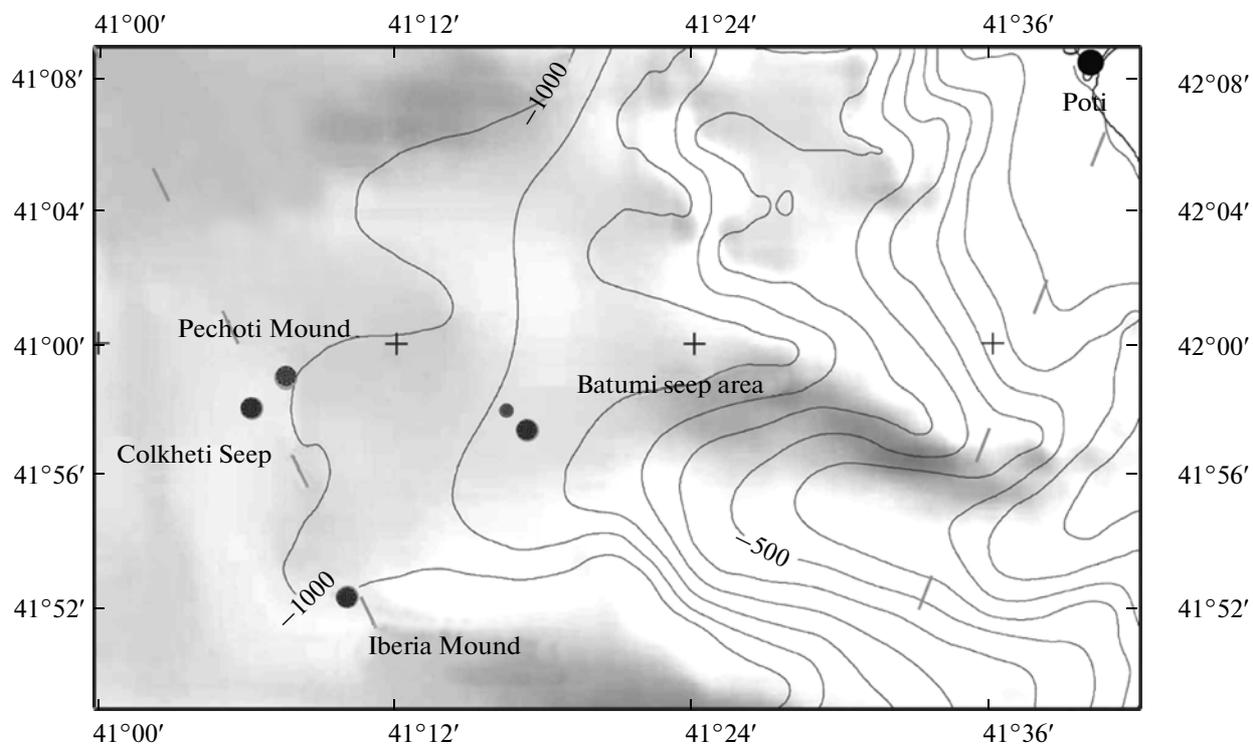


Рис. 8. Батиметрическая карта морского дна в грузинском секторе Черного моря с нанесенными на нее исследованными метановыми сипами (Reitz et al., 2011).

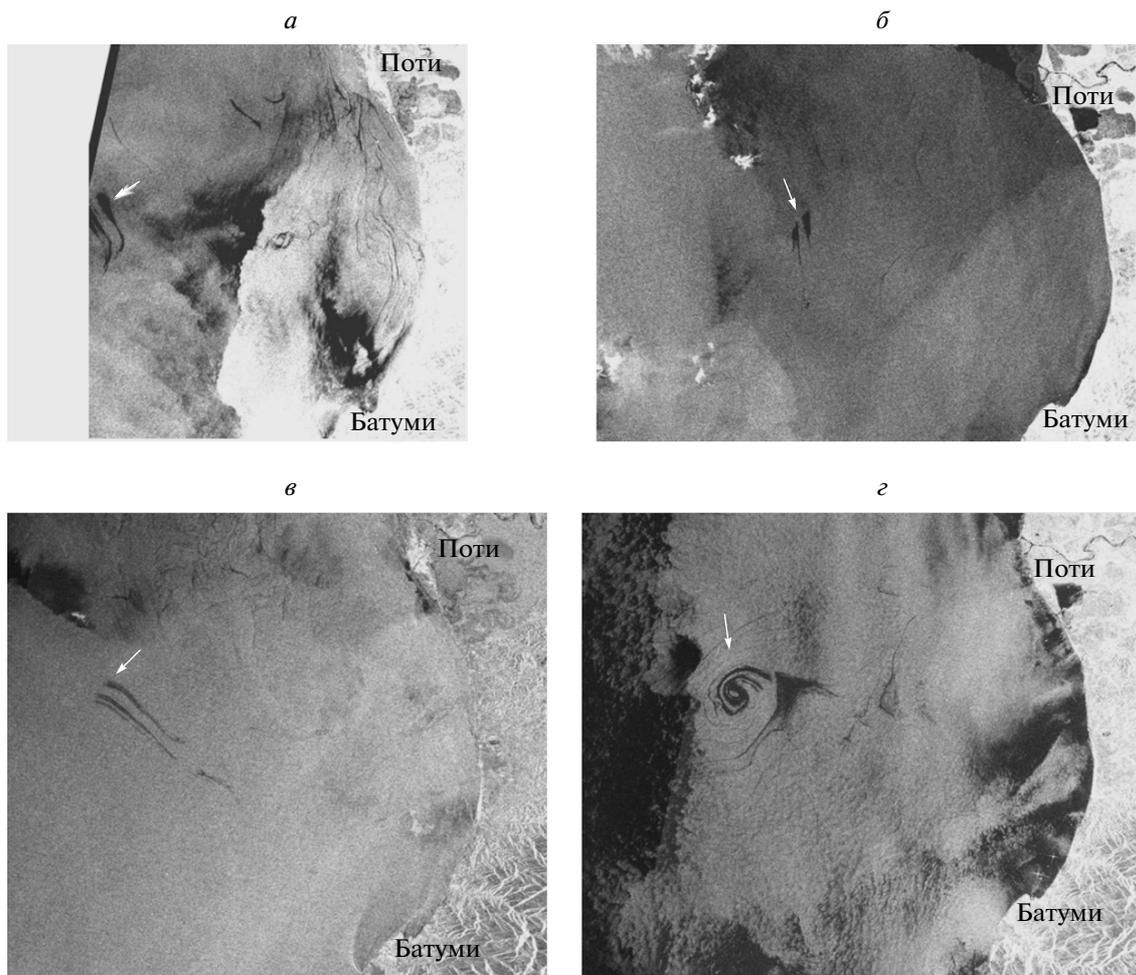


Рис. 9. Пример проявлений сликовых структур в районе метановых сипов над акваторией грузинского континентального склона (отмечены стрелочкой). Фрагменты ASAR Envisat изображений, полученных на VV-поляризации с разрешением в точке 75 м: *а* – 16.06.2010, 07:28 UTC; *б* – 14.07.2010, 19:03 UTC; *в* – 05.06.2011, 07:34 UTC; *г* – 06.01.2011, 07:32 UTC.

2005 г.). (Егоров и др., 2011; Wagner-Friedrich, 2007). Детектирование газовых факелов производилось преимущественно акустическими методами.

Согласно опубликованным данным, в грузинском секторе Черного моря было выявлено 565 выходов струйного газа, расположенных на глубинах 14–1120 м. При этом наибольшая частота встречаемости сипов наблюдалась в приустьевых участках шельфа рек Чорохи, Кинтриши, Натанеби, Супса, Риони и Ингури. Кроме того, значительное количество выходов газовых струй было обнаружено на глубинах 850–1200 м (рис. 7).

Своеобразной природной лабораторией стал относительно небольшой участок акватории площадью около 20 км² в районе грузинского континентального склона, где на дне расположены четыре холодных метановых сипа (рис. 8). Акустические исследования, сопровождаемые детальными геохимическими анализами, заборами проб грун-

та, определением состава газогидратов и выделяющихся газов, проводились здесь в июне 2005 г. как часть учебной и исследовательской программы ЮНЕСКО, в марте–апреле 2007 г. и в марте 2011 г. в рамках германского проекта METRO (Methane and methane hydrates within the Black Sea). Проведенные во время экспедиционных работ на грузинском континентальном склоне (Егоров и др., 2011; Wagner-Friedrich, 2007) исследования показали, что глубоководные сипы в грузинских водах представляют собой весьма уникальный для Черного моря 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. Наиболее вероятной причиной возникновения

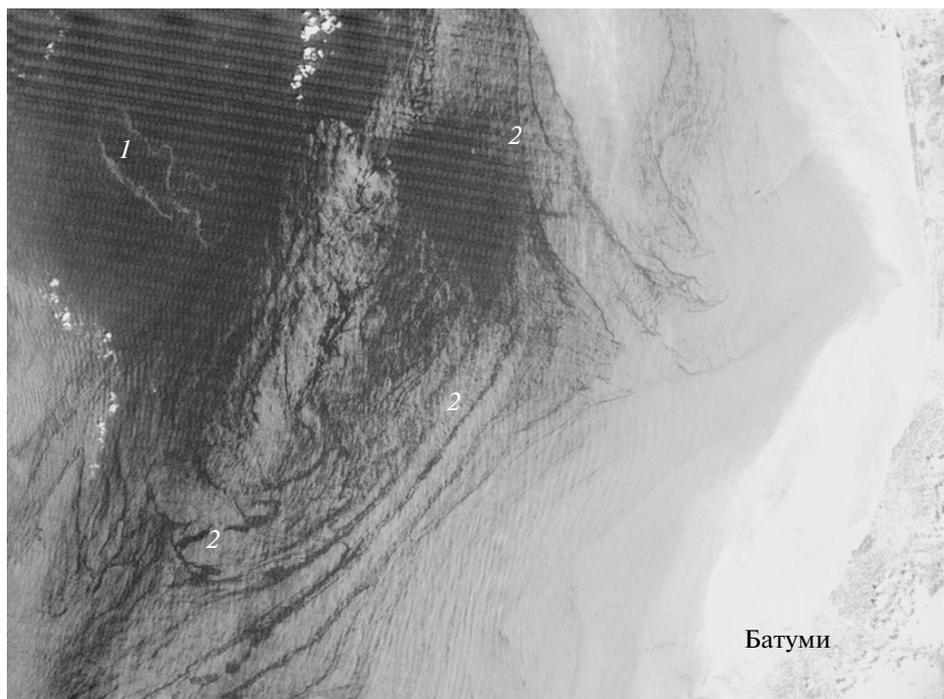


Рис. 10. Фрагмент цветосинтезированного изображения (каналы 3, 2, 1) сенсора ТМ ИСЗ Landsat 5, 01.07.2011. 1 – слики в районе метановых сипов, обусловленные нефтесодержащими поверхностными пленками, 2 – слики, обусловленные биогенными поверхностными пленками.

этих сипов является своеобразие геологического строения ЮВ окраины Черного моря, характеризующейся наличием диапировых складок с ядрами протыкания, в которых образуются пути миграции веществ, в том числе углеводородов, из геологических структур глубокого залегания к разрывам верхних слоев донных осадков (Туголесов и др., 1985; Klauske et al., 2005).

Обладая большим объемом исходных спутниковых данных, авторы статьи проанализировали все РЛИ акватории Черного моря в районе грузинского шельфа и континентального склона, полученные за период январь 2009 г. – июль 2011 г., с целью обнаружения на них характерных сликовых структур, которые могли быть обусловлены процессами струйных газовыделений со дна. Всего за этот период было получено 73 РЛИ района интереса. На 46 изображениях были идентифицированы сликовые структуры, локализованные в данном районе (рис. 8).

На рис. 9 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 (см. рис. 9а–9в), либо вовлекается в вихревые движения воды (рис. 9г). В большинстве случаев пленочные загрязнения в

этом районе проявляются в виде нитевидных сликов, схожих по своей структуре с проявлениями биогенных пленок. Для решения вопроса о принадлежности детектированных в этом районе пленочных загрязнений морской поверхности к нефтесодержащим или биогенным пленкам были проанализированы спутниковые изображения в различных диапазонах электромагнитного спектра. В частности, был проведен совместный анализ РЛ-данных ASAR Envisat и данных оптического диапазона сенсоров ТМ Landsat 5 и ЕТМ+ Landsat 7. В данных оптического диапазона нефтесодержащие слики и слики, обусловленные биогенными пленками, проявляются различным образом, поскольку различные типы пленок, присутствующие на морской поверхности, по-разному изменяют ее отражательные свойства (Мироненко, Станичный, 1999; Ермаков, 2010). На цветосинтезированных изображениях (композиция каналов 3, 2 и 1) ТМ Landsat 5 и ЕТМ+ Landsat 7 нефтесодержащие слики имеют большую яркость по сравнению с биогенными пленками и проявляются как светлые образования (см. рис. 10).

В большинстве случаев и на РЛ-, и на оптических изображениях слики присутствуют в виде “парных” структур (см. рис. 9, 10). Сопоставляя места локализации сликов, выявленных на спутниковых изображениях, и места локализации метановых сипов, можно прийти к заключению, что природа этой парности обусловлена тем, что сли-

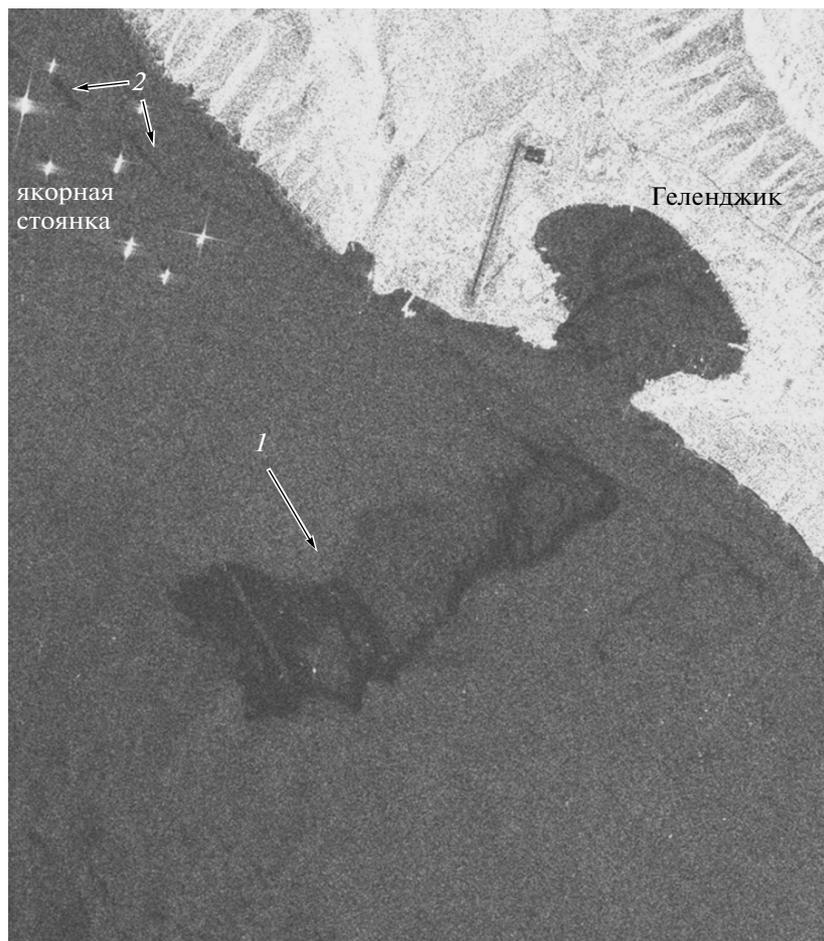


Рис. 11. Утечка сточных вод из глубоководного выпуска г. Геленджик у Толстого мыса (1) и сброс технологических вод с судов, находящихся на якорной стоянке Дооб (2). Фрагмент ASAR Envisat изображения (16 × 18 км), 29.09.2010, 07:29 UTC с разрешением в точке 12.5 м (© ESA).

ковые структуры соответствуют естественным проявлениям углеводородов из двух близко расположенных метановых сипов, а именно, сипа “Колхети” (Colkheti Seep) и купола Печори (Pechoru Mound) на морском дне (см. рис. 8).

В этом районе традиционно детектируется большое количество пленочных загрязнений морской поверхности, как антропогенных, обусловленных активным судоходством и промышленной деятельностью в районе, так и биогенных. Велика вероятность того, что естественные проявления углеводородов на РЛИ могут быть интерпретированы как судовые сбросы. Поэтому, при проведении рутинного мониторинга для понижения вероятности “ложной тревоги” рекомендуется сопоставлять спутниковые изображения с картой возможных источников регулярных загрязнений (глубоководный сброс сточных вод, нефтяные терминалы, устья рек, подводные грязевые вулканы и т.д.).

В последние годы во всем мире возник большой интерес к возможности дистанционного об-

наружения нефтяных и газовых месторождений по их проявлениям на морской поверхности, и опубликовано значительное количество статей, посвященных этой проблеме. Независимые исследования различных авторов подтверждают, что объем и постоянство просачивания не имеют никакого отношения к размеру месторождений, из которых они протекают. Кроме того, поскольку нормы утечек из нефтенасыщенных пород, по крайней мере, на несколько порядков меньше, чем утечки из ловушек, очень маловероятно, что пленки, размер которых разрешим на спутниковых РЛИ, могут происходить из нефтематеринских пластов (Williams, Lawtence, 2002; Subhobroto, Kalyan, 2006).

Таким образом, можно утверждать, что упомянутые выше сликовые структуры, детектированные на спутниковых изображениях морской поверхности, являются поверхностными проявлениями естественных выходов углеводородов, но не могут служить индикаторами наличия в этом районе нефтематеринских пластов. В связи со всем сказанным

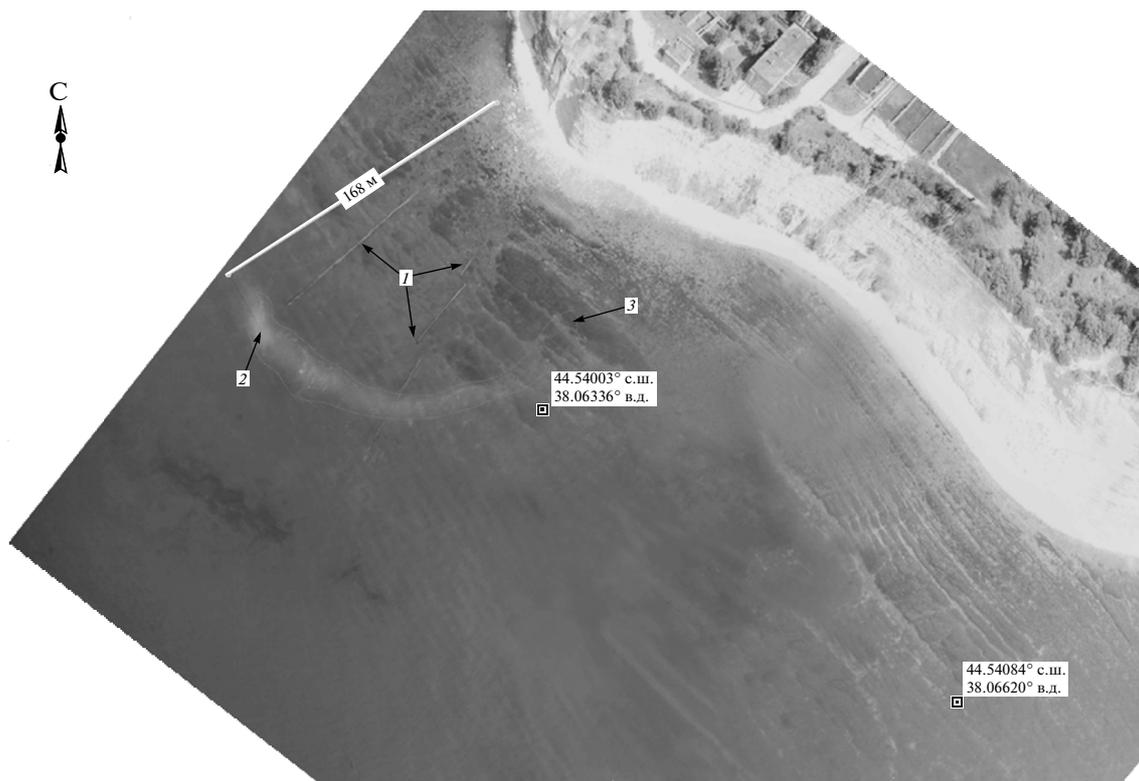


Рис. 12. Утечка сточных вод из трубопроводов глубоководного выпуска в районе г. Геленджик: 1 – трассы глубоководных выпусков; 2 – место утечки; 3 – зона загрязнения (3360 м²). Снимок сделан с борта вертолета СЦГМС ЧАМ 24.08.2003 г. © СЦГМС ЧАМ.

выше вызывают некоторое недоумение появившиеся в сети Internet (http://www.scanex.ru/ru/news/News_Preview.asp?id=n95225234) оценки объемов истечения нефти со дна моря в этом районе, которые представляются, в лучшем случае, многократно завышенными, а, возможно, и просто недостоверными.

АНТРОПОГЕННЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ

От всех описанных выше загрязнений следует отличать еще один вид загрязнения. Большой вклад в загрязнение прибрежной зоны вносят отслужившие свой срок очистные сооружения, построенные на Черноморском побережье. Во всем мире мониторингу экологической ситуации вокруг глубоководных стоков уделяется очень большое внимание (Бондур, Гребенюк, 2001). В российской части Черного моря основными зонами риска являются районы, прилегающие к городам Новороссийск, Геленджик, Туапсе и Сочи, а также места якорных стоянок, где сбрасываются в море технологические воды и фекально-бытовые отходы.

Давно вызывает серьезное беспокойство система очистки сточных вод и трубопровод глубо-

ководного выпуска в районе г. Геленджик. В настоящее время Геленджик является крупнейшим в России после Сочи рекреационным центром на берегу Черного моря, но городские очистные коммуникации не рассчитаны на все возрастающий наплыв туристов. Уже сегодня, по некоторым данным, объем сброса с очистных сооружений почти вдвое превышает их проектную мощность. По проекту сброс сточных вод с городских очистных сооружений в море должен производиться 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 глубоководный выпуск имеет серьезные повреждения, и часть очищенных сточных вод сбрасывается в прибрежной полосе. Проверкой, проведенной сотрудниками Азово-Черноморской межрайонной природоохранной прокуратуры и Росприроднадзора в мае 2010 г., было установлено, что один из глубоководных выпусков сточных вод в районе Толстого мыса Геленджикской бухты разорвался в 300 м от берега, из-за чего фекальные и хозяйственные стоки под огромным давлением хлестали во все стороны, заливая береговую линию и пляжи. К сожалению, такая ситуация повторяется регулярно. В частности на РЛИ от

29.09.2010 (рис. 11) хорошо видна обширная темная область, отмеченная цифрой 1, подвергшаяся загрязнению. Для примера на рис. 12 приведен снимок, сделанный с вертолета специалистами ГУ “Специализированный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей” (СЦГМС ЧАМ) Росгидромета в г. Сочи (Отчет о результатах..., 2005), на котором отчетливо виден как сам разрушенный глубоководный выпуск, так и область загрязнений. Подобная ситуация, к сожалению, характерна не только для района г. Геледжик, но наблюдается и на всем побережье Черного моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложен практический опыт проведения комплексного спутникового мониторинга Черного моря. Этим морем мы занимались больше и дольше всего и получили ряд важных результатов как в научном плане, так и в плане организации и проведении спутникового мониторинга.

Как показал проведенный мониторинг, остро назрела необходимость внедрения систем оперативного спутникового контроля загрязнения акваторий, которые позволят устанавливать источники загрязнения, производить количественную оценку объемов загрязнений и создавать прогноз их распространения. После принятия соответствующих законодательных актов, результаты космических измерений могут быть признаны в качестве доказательств экологической экспертизы. В связи с этим важное значение имеет степень достоверности интерпретации спутниковых данных в целях извлечения информации об антропогенном загрязнении морской поверхности. Одной из целей нашей статьи является привлечение внимания специалистов в области ДЗЗ из космоса к этому вопросу.

Следует отметить, что задача дискриминации поверхностных пленок естественного и антропогенного происхождения еще далека от окончательного решения. На основании накопленного нами опыта, можно утверждать, что для повышения надежности извлечения необходимой информации из данных РЛ-зондирования рекомендуется:

- привлекать для совместного анализа данные, получаемые разными сенсорами с разных спутников в оптическом и ИК-диапазонах;
- в целях помощи оператору в дешифровке РЛИ создать каталог наиболее часто встречающихся в районе интереса явлений и соответствующих им РЛ-образов;
- составить “паспорт” местности, включающий описание характерных процессов и явлений в прибрежной зоне в зависимости от времени года, гидрометеорологических условий, времени

суток, направлений течений для понижения вероятности ложной тревоги. Сопоставлять спутниковые изображения с картой возможных источников регулярных загрязнений (глубоководный сброс сточных вод, нефтяные терминалы, устья рек, подводные грязевые вулканы и т.д.).

Работа выполняется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 10-05-00428-а, 11-07-12025-офи-м-2011, 11-05-12047-офи-м-2011). Спутниковые РЛ-данные предоставлены ЕКА в рамках проектов С1Р.6342, С1Р.5004, АОВЕ 2775 и С1Р.1027. Авторы благодарят сотрудников ИКИ РАН Т.Ю. Бочарову и С.С. Каримову за помощь в обработке спутниковых РЛ-данных. Отдельную благодарность авторы статьи выражают академику НАНУ директору МГИ НАНУ (г. Севастополь) В.А. Иванову и сотруднику ИО РАН им. П.П. Ширшова к.ф.-м.н. А.Ю. Иванову за привлечение нашего внимания к задаче спутникового наблюдения естественных проявлений углеводородов в Черном море.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авилов В.И., Авилова С.Л.* Проявление флюидных потоков со дна в глубоководной части Черного моря // Докл. РАН. 2001. Т. 378. № 4. С. 522–525.
- Авилов В.И., Авилова С.Д.* Оценка генезиса углеводородов подводных вулканов, газогидратов, газовых факелов Черного моря по газобиогеохимическим показателям // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2007. № 2. С. 67–85.
- 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.
- 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.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В.* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67.
- Бондур В.Г., Килер Р.Н., Старченков С.А., Рыбакова Н.И.* Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий океана с использованием многоспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 6. С. 42–49.
- 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 сликса // ДАН СССР. 1984. Т. 276. № 5. С. 1243–1246.

- 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. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // УФН. 2003а. Т. 173. № 1. С. 69–87.
- 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.: КДУ, 2003б. 143 с.
- Егоров В.Н., Артемов Ю.Г., Гулин С.Б. Метановые сипы в Черном море. Средообразующая и экологическая роль // Под ред. Поликарпова Г.Г. Севастополь: НПП “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2011. 405 с.
- Ермаков С.А., Зуйкова Э.М., Салашин С.Г. Трансформация спектров коротких ветровых волн в пленочных сликах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1987. Т. 23. № 7. С. 707–715.
- Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
- Иванов А.Ю. Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
- Иванов М.К., Конюхов А.И., Кульницкий Л.М. и др. Грязевые вулканы в глубоководной части Черного моря // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 1989. № 3. С. 48–54.
- 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. Т. 3. № 1. 2006. С. 22–31.
- Костяной А.Г., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Комплексный спутниковый мониторинг нефтяного загрязнения морей России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XXII. М.: ИГКЭ, 2009. С. 235–266.
- Круглякова Р.П., Круглякова М.В., Шевцова Н.Т. Геолого-геохимическая характеристика естественных проявлений углеводородов в Черном море // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 1. С. 37–51.
- Лаврова О.Ю., Каримова С.С., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю. Оперативный спутниковый мониторинг акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей в 2009–2010 годах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Т. 7. № 3. М.: Азбука-2000, 2010. С. 168–185.
- Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д. Возможные механизмы генерации внутренних волн в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Лупяна Е.А., Лавровой О.Ю. Т. 5. № 2. М.: Азбука-2000, 2008. С. 128–136.
- Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д. Проявление внутренних волн на морской поверхности в северо-восточной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 6. С. 49–55.
- Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д. Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // Докл. РАН. 2011. Т. 436. № 3. С. 407–411.
- 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 // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 81–94.
- Мироненко В.А., Станичный С.В. Возможности экологического мониторинга шельфа спутниковыми и полигонными средствами. Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАН Украины, 1999. 303 с.
- Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Радиолокационные наблюдения поверхностных пленочных загрязнений в прибрежной зоне Черного и Азовского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Т. 4. № 1. М.: Азбука-2000, 2007. С. 317–324.
- Митягина М.И., Чурюмов А.Н. Механизмы формирования радиолокационного сигнала в области нефтяного загрязнения на морской поверхности. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Т. 3. № 2. М.: Азбука-2000, 2006. С. 135–139.
- Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72–79.
- Отчет о результатах работ по аэровизуальному мониторингу загрязнения прибрежной зоны Черного и Азовского морей за 2004 год. Росгидромет. СПб.: ДЕАН, 2005. 130 с.
- Скворцов Е.И., Раев М.Д., Булатов М.Г., Шарков Е.А., Лаврова О.Ю., Силкин В.А. Радиофизические микроволновые исследования образования скоплений фитопланктона на морской поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С. 35–40.
- Туголесов Д.А., Горшков А.С., Мейснер Л.Б. и др. Тектоника мезо-кайнозойских отложений Черноморской впадины. М.: Недра, 1985. 215 с.
- Шнюков Е.Ф., Клещенко С.А. Грязевой вулканизм западного суббассейна Черного моря // Геологические проблемы Черного моря. Киев, 2001. С. 121–144.
- Brekke C., Solberg A. Oil spill detection by satellite remote sensing // Rem. Sens. Environ. 2005. № 95. P. 1–13.
- Espedal H.A., Johannessen O.M. Detection of oil spills near offshore installations using synthetic aperture radar (SAR) // Int. J. Rem. Sens. 2000. V. 21. № 11. P. 2141–2144.
- Gade M. On the imaging of biogenic and anthropogenic surface films on the sea by radar sensors. In Marine Surface Films: Chemical Characteristics, Influence on Air-Sea In-

- teractions, and Remote Sensing / Eds. Gade M., Hühnerfuss H., Korenowski G.M. Heidelberg: Springer, 2006. P. 189–204.
- Gade M., Alpers W., Bao M. Measurements of the radar backscattering over different oceanic surface films during the SIR-C/XSAR campaigns // Proc. Int. Geosci. Rem. Sens. Symp. (IGARSS'96). 1996. V. 2. P. 860–862.
- Gade M., Alpers W., Hühnerfuss H., Masuko H., Kobayashi T. The imaging of biogenic and anthropogenic surface films by a multi-frequency multi-polarization synthetic aperture radar measured during the SIR-C/X-SAR missions // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № C9. P. 18851–18866.
- Kostianoy A., Litovchenko K., Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Lebedev S., Stanichny S., Soloviev D., Sirota A., Pichuzhkina O. Operational Satellite Monitoring of Oil Spill Pollution in the Southeastern Baltic Sea: 18 Months Experience // Environ. Res., Engine. Manag. 2006. V. 4. № 38. P. 70–77.
- Klaucke I., Sahling H., Bürk D., Weinrebe W., Bohrmann G. Mapping deep-water gas emissions with sidescan sonar // EOS (AGU Trans.). 2005. V. 86. №. 38. P. 341–346.
- Lavrova O., Bocharova T., Kosianoy A. Satellite Radar Imagery of the coastal zone: Slicks and Oil Spills. Global Developments in Environmental Earth Observation from Space / Ed. Marcal A. Millpress. Rotterdam. Netherlands, 2006. P. 763–772.
- Mityagina M., Churumov A. Radar backscattering at sea surface covered with oil films. Global Developments in Environmental Earth Observation from Space / Ed. Marcal A. Millpress. Rotterdam. Netherlands, 2006. P. 783–790.
- Mityagina M.I., Lavrova O.Y., Karimova S.S. Multi-Sensor Survey of Seasonal Variability in Coastal Eddy and Internal Wave Signatures in the North-Eastern Black Sea // Int. J. Rem. Sens. 2010. V. 17. P. 4779–4790.
- Reed A., Milgram J. Ship wakes and their radar images // Annual Review of Fluid Mechanics. 2002. V. 34. P. 469–502.
- Reitz A., Pape T., Haeckel M., et al. Sources of fluids and gases expelled at cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2011. V. 75. P. 3250–3268.
- Shcherbak S.S., Lavrova O.Y., Mityagina M.I., Bocharova T.Y., Krovotyntsev V.A., Ostrovskii A.G. Multisensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the northeastern coastal zone of the Black Sea // Int. J. Rem. Sens. 2008. V. 29. № 21. P. 6331–6345.
- Subhobroto M., Kalyan K. Detection of Oil Seepages in Oceans by Remote Sensing // Proc. 6-th Int. Conf. & Expos. Petroleum Geophysics “Kolkata 2006”. 2006. P. 1172–1178.
- Wagner-Friedrichs M. Seafloor seepage in the Black Sea: Mud volcanoes, seeps and diapiric structures imaged by acoustic methods. Dissertation thesis. Bremen: University Bremen. 154 p. <http://elib.suub.uni-bremen.de/diss/docs/00010674.pdf>
- Williams A., Lawrence G. The role of satellite seep detection in exploring the South Atlantic's ultra deep water // AAPG Studies in Geology. №. 48/SEG. Geophys. Refer. Ser. 2002. № 11. P. 327–344.

Satellite Monitoring of Surface Film Pollution of the Black Sea

O. Yu. Lavrova, M. I. Mityagina

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

The paper summarizes results of many-year combined satellite monitoring of the Black Sea conducted in order to detect sea surface oil and oil product pollution as well as biogenic and anthropogenic surfactant films. A joint analysis of various satellites remotely sensed data has been performed. The large amount of the available data has allowed us to make some generalizations and obtain statistically reliable results on spatial and temporal variability of different films manifestations in SAR images of the sea surface. Regions most severely affected by oil pollution are determined. A hypothesis is suggested linking surface manifestations of certain film pollution types and natural gas and oil seeps and mud volcanism in the Black Sea. Some problems of the interpretation reliability of satellite data are discussed.

Keywords: satellite monitoring, satellite radar imagery, oil pollution of the sea surface, biogenic and anthropogenic films on the sea surface, natural gas seepage areas