

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Виктория Владимировна Затыгалова, научный сотрудник

E-mail: z-victoria@yandex.ru

*ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»»
<http://planet.iitp.ru>*

В статье рассмотрены вопросы применения методов геоинформатики и дистанционного зондирования Земли при мониторинге загрязнения моря. В частности решается задача определения загрязнения морской поверхности конкретными судами. Раскрывается специфика геоинформационного подхода применительно к мониторингу загрязнений моря. В качестве основы мониторинга применяются радиолокационные изображения (РЛИ) Приведены примеры использования метода. Доказана эффективность предложенной технологии при решении практических задач.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мониторинг, геоинформационный подход, экология.

Целью статьи является описание нового метода обнаружения загрязнений, оставляемых судами на поверхности моря. В качестве основы предлагается использовать данные дистанционного зондирования и методы геоинформатики. Описаны результаты экспериментальной проверки метода.



В.В. Затыгалова

Введение. Согласно [1], наибольшее количество нефтяных загрязнений поступает в морскую воду при эксплуатации танкерного флота (примерно 2 млн т в год). Мониторинг и идентификация нефтяных загрязнений на морской поверхности сложный и неоднозначный процесс [2]. Для этой цели часто используют радиолокационные изображения (РЛИ). Сложность выявления загрязнений на РЛИ заключается в необходимости анализа комплекса сликообразующих явлений, которые существенно затрудняют идентификацию загрязнений, оставляемых судами на по-

верхности моря.

Слик (англ. *slick* – гладкий, блестящий, пятно) – общепринятый в настоящее время в русскоязычной научной литературе термин, обозначающий область выглаживания ряби на поверхности моря. Это зеркально гладкие полосы или пятна на поверхности океанов, морей или внутренних водоемов; они чаще всего имеют вытянутую форму.

Размер, форма, геометрия и происхождение сликов может быть самой разнообразной. Слики, связанные с атмосферными процессами, имеют самые разнообразные геометрические формы. Однако чаще всего их размеры определяются масштабами изменчивости ветра, характерными для того или иного явления в атмосфере [3].

Нефтяные пленки также создают слики. Гашение мелкомасштабных волн нефтяной пленкой приводит к резкому уменьшению рассеяния радиоволн в сторону антенны, что и создает области выглаживания на морской поверхности и темные пятна на РЛИ.

Поэтому проблема идентификации загрязнений сводится к трем задачам: анализ сликообразующих явлений по РЛИ; идентификация загрязнения (естественное или антропогенное); соотнесение загрязнения (если оно антропогенное) с определенным судном.

Методика решения поставленных задач. Для анализа сликообразующих явлений и интерпретации РЛИ применялись методы глобального геоинформационного мониторинга [4] и инкрементный метод [5, 6]. На концептуальном уровне использовался геоинформационный подход [7]. Он включает выделение трех групп данных «место», «время», «тема». Это позволяет: координировать загрязнение, оценивать время его происхождения, выявлять причину загрязнения.

В геоинформационном мониторинге можно проводить интегрированную обработку

цифровых снимков, цифровых моделей и цифровых карт [8]. Это дает возможность объединять разнородные информационные ресурсы и проводить комплексный анализ загрязнений.

Исследования. Анализ сликообразующих явлений показал, что их совокупность может быть рассмотрена как суперпозиция. Это означает возможность стратификации такой совокупности. Геоинформационный подход реализует стратификацию данных с включением отношений иерархии [9]. Это дает возможность создания иерархической геоинформационной модели, визуально представляемой как совокупность слоев с общей тематикой и разными признаками.

Выявление пространственных отношений [10, 11] дает возможность находить слабые и сильные, явные и неявные связи между объектами, находящимися в разных точках пространства. Это дает возможность привязки слика, обусловленного загрязнением, с судном, которое произвело загрязнение.

К геоданным [12], применяемым при мониторинге загрязнений на основе РЛИ, относятся данные о потенциальных источниках и зонах потенциального загрязнения (судоходные трассы, нефтегазоносные структуры и подводные геологические объекты, порты и терминалы, буровые платформы и т.д.), данные о гидрометеорологических условиях (ветер, волнение, течения). Полный набор этих данных был описан автором статьи в 2007–2008 гг. в ряде публикации, одна из которых опубликована в известном научном журнале «International Journal of Remote Sensing» [3].

Был проведен ряд пилотных проектов, которые подтвердили необходимость интеграции дополнительной информации и их совместный анализ с РЛИ. В основном дополнительная информация могла быть получена с навигационных цифровых карт, геолого-геофизических данных, прогнозных гидрометеорологических данных и т.д. Со временем стало очевидно, что часть дополнительной информации может быть получена с радиолокационного изображения (ветер, волнение). Ветер и волнение создают сликообразующие явления на поверхности моря и на снимке.

Кроме того, временная привязка загрязнения к объекту еще не является доказательством того, что именно этот объект является источником загрязнения. Поэтому возникла первичная задача устранения сликообразующих явлений на снимке, которые не связаны с загрязнением.

Особенность анализа данного явления состояла в том, что одни сликообразующие явления, связанные с загрязнением, являются устойчивыми. Другие сликообразующие явления носят не стационарный характер. Задача выделения сликообразующих явлений, связанных с загрязнением, по-разному решается при оперативном и тактическом мониторинге.

Геоинформационный мониторинг разделяют на тактический и оперативный [4]. В тактическом геоинформационном мониторинге имеется достаточно большое количество РЛИ. В нем имеет место накопление информации, получаемой в разное время на разных снимках. Поэтому задача устранения сликообразующих явлений на снимке при тактическом мониторинге решается по разновременным РЛИ. Они позволяют исключить случайные факторы и выделить источник загрязнения.

В оперативном мониторинге по минимальному числу снимков (полученных в одно время, или по одному снимку) необходимо также решать задачи выделения сликообразующих явлений, связанных с загрязнением. В нашем случае при оперативном мониторинге требуется по текущему радиолокационному изображению установить источник и оперативно информировать потребителя. Поэтому требуется надежная методика анализа РЛИ.

Проанализировав современные методы, автор пришел к выводу, что существующие методы не позволяют различать нефтяные пленки по типу происхождения, проблемой также является их отличие от сликообразующих явлений. Для решения этих проблем автором разработан набор классификационных признаков загрязнений и инкрементальный метод выделения сликообразующих явлений.

Основные принципы инкрементного метода, описаны в [5, 6]. Автор использовал

методику, изложенную в [5], но для анализа сликообразующих явлений. Следует напомнить, что инкрементальный метод применяется при решении задач второго рода [9], когда для решения нельзя построить сквозной алгоритм и, по существу, необходим эвристический анализ.

Кроме того, автором была использована идея информационных единиц [13, 14] как индикаторов и информационных характеристик загрязнений. Были разработаны базисные и казуальные признаки. Казуальные признаки выявлялись на основе коррелятивного анализа [15].

К базисным признакам относят признаки, идентифицирующие загрязнение. К казуальным признакам относят причинно-следственные [16] признаки, которые делятся на предшествующие и последующие. Были обоснованы три группы казуальных классификационных признаков.

Первая группа связана с многочисленностью типов источников загрязнения морской среды. Нефть и нефтепродукты могут попадать в морскую среду от различных источников, наиболее распространенными из которых являются следующие:

- *аварийные разливы*, образованные при утечках, связанных с бурением на морском шельфе, утечках из заброшенных скважин, повреждении подводных трубопроводов, крушениях танкеров и судов;

- *судовые разливы* – балластные, льяльные или промывочные воды, отходы машинного отделения, отходы рыбопереработки и др.;

- *береговой сток* – сток промышленных, канализационных и бытовых вод, стоки с сельскохозяйственных угодий, подъем вод с содержанием поверхностно-активных веществ при дноуглубительных работах и др.;

- *речной сток* как частный случай берегового стока – хозяйственно-бытовые и промышленные стоки переносимые речными водами;

- *естественные источники* – выходы углеводорода из глубинных недр.

Вторая группа признаков связана с условиями существования нефтяных загрязнений на морской поверхности. Нефть и нефтепродукты, попавшие в морскую среду, могут наблюдаться на морской поверхности продолжительное время (от 0,5–2 суток) в виде пленок различной толщины. Возможность обнаружения нефтяных пленок в микроволновом диапазоне на морской поверхности определяется эффектом сглаживания пленками высокочастотной составляющей морского волнения.

Присутствие пленок на взволнованной морской поверхности приводит к уменьшению интенсивности радиолокационного рассеяния по сравнению с чистой водой и резкому уменьшению яркости на радиолокационных изображениях. Продолжительность существования нефти или нефтепродуктов в виде сплошной пленки на морской поверхности, и, следовательно, возможность ее обнаружения зависят как от типа и состава нефти и нефтепродукта, так и от состояния морской поверхности.

Результаты. На радиолокационных изображениях нефтяные пленки обнаруживаются на взволнованной поверхности моря при скоростях приводного ветра от 2–3 до 9–12 м/с. При меньших скоростях ветра они неразличимы на фоне гладкой морской поверхности. При скоростях ветра больше 9 м/с нефтяные пленки начинают разрушаться, превращаясь в нефтяную эмульсию и постепенно становясь невидимыми на радиолокационных изображениях, и только крупные нефтяные разливы можно наблюдать при скорости ветра до 12 м/с.

Третья группа признаков связана с выбором параметров радиолокационной съемки. В настоящее время функционирует 9 космических аппаратов, оборудованных радиолокаторами с синтезированной апертурой (ENVISAT, RADARSAT -1, -2, TERRA-SAR-X, TanDEM-X, CosmoSky-Med-1, -2, -3, -4), которые имеют высокое пространственное разрешение и широкую полосу обзора, работают вне зависимости от времени суток и погодных условий.

Радиолокационный образ нефтяной пленки на морской поверхности зависит от параметров проведения радиолокационной съемки (длины волны, поляризации излучаемого и принимаемого сигналов, угла зондирования, пространственного разрешения и ширины обзора радиолокационной съемки). Углы зондирования радиолокационного сигнала выбираются из допустимых с учетом механизма брэгговского рассеяния радиоволн, которые находятся в пределах от 20° до 43–45°. Среди диапазонов длин радиоволн широко используются С- и Х-диапазоны, так как они обладают высокой чувствительностью к шероховатости морской поверхности и их длины волн находятся в пределах гравитационно-капиллярной области спектра волн.

При выборе поляризации сигнала преимущество отдается вертикальной поляризации, при которой отраженный от взволнованной морской поверхности радиолокационный сигнал имеет более высокую интенсивность и обеспечивает лучший контраст на РЛИ между нефтяным пятном и морской поверхностью. Кроме того, для отличия на РЛИ пятен нефти от других сликообразующих явлений может быть полезна комбинация вертикальной и горизонтальной поляризации.

Выбор режимов съемки зависит от требований к поставленной задаче. С увеличением пространственного разрешения повышается возможность выявления разливов малых площадей, а также повышается точность определения положения загрязнения и оценка его масштабов, но при этом, как правило, уменьшается ширина полосы обзора.

Поэтому принимается компромиссное решение: для наблюдения значительных областей акваторий используется широкообзорная съемка, для наблюдения за стационарными объектами в пределах акватории – высокодетальная съемка. Эффективным решением при организации спутникового радиолокационного мониторинга является привлечение нескольких радиолокационных спутников для обеспечения высокой частоты наблюдений (от 1 до нескольких раз в сутки), а также чередование обзорного и детального режимов съемки.

Для проведения коррелятивного анализа [15] и импакт-анализа [16] «причина – следствие» автором разработана реляционная таблица отношений между источниками загрязнений и сопутствующим им казуальным характеристикам [9].

В аспекте импакт-анализа ситуации «судно–загрязнение» был применен ситуационный [17] (сценарный) подход. Автором предложено 4 информационные ситуации [18] расположения судна. На радиолокационном изображении можно определить координаты судов, однако невозможно определить название судна и его принадлежность к стране и порту приписки. Кроме того, если судно находится на удалении от нефтяного разлива и тем более на значительном удалении (за пределами спутникового радиолокационного изображения) от нефтяного пятна, доказать, что оно совершило нефтяной разлив, имея на руках только РЛИ, практически невозможно.

Решить эту задачу оказалось возможным на основе свойств интегрированности геоинформационного подхода в результате сопоставления спутникового радиолокационного изображения с данными системы автоматической идентификации судов (АИС). Система АИС позволяет получить информацию о пространственном положении судна в акватории в отдельный момент времени, восстановить по времени и координатам маршрут судна, содержит информацию об идентификационном номере, типе судна и принадлежности к определенной стране.

В России нет законодательной базы об использовании спутниковых радиолокационных данных в качестве доказательств загрязнения акватории, несмотря на то, что результаты комплексного анализа РЛИ и АИС указывают на принадлежность нефтяного разлива к определенному судну. Прямыми доказательствами нефтяного разлива являются только пробы с места сброса или регистрация спектральной характеристики пленки на морской поверхности с помощью аэрофотосъемки. Поэтому данная технология включает оперативное доведение (с использованием WEB-картографических сервисов, связанных с ГИС) факта установления судна – виновника нефтяного загрязнения до портовых служб с целью после-

дующих проверок судна в порту прибытия.

Вся процедура проведения такого комплексного анализа с применением целевой проверки показана на рисунке 1:

а) спутниковое радиолокационное изображение RADARSAT-1 от 20 августа 2008 г. на пользовательском интерфейсе веб-картографического геопортала (красным цветом выделен шлейф загрязнений, желтым – суда) © MDA, CSA, СКАНЭКС;

б) положение судна на момент радиолокационной съемки по данным АИС © ЗАО «Транзас», ФГУ «АМП Новороссийск»;

в) в результате досмотра судна службами порта выявлена неисправность водоочистного оборудования. © ФГУ «АМП Новороссийск»;

г) судно-виновник сброса нефтепродуктов – «Расим Акар», © ФГУ «АМП Новороссийск».

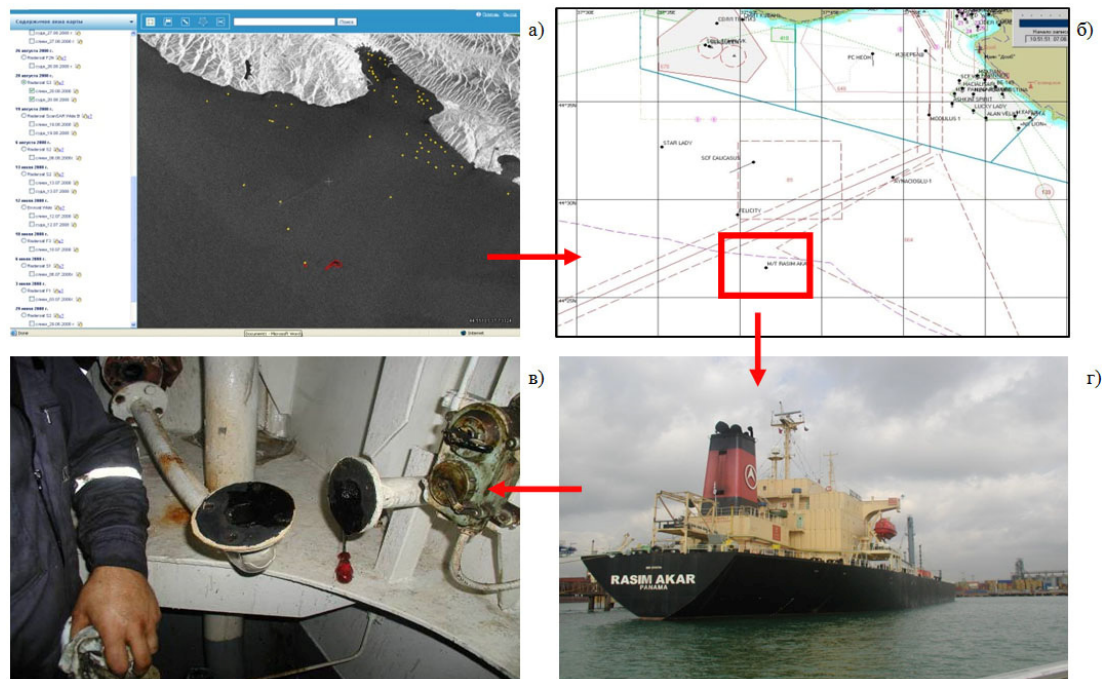


Рисунок 1 – Мониторинг загрязнения моря по данным дистанционного зондирования Земли из космоса

Заключение. Геоинформационный подход, инкрементный анализ РЛИ и информационные единицы как характеристики загрязнения могут быть применены для решения задачи идентификации загрязнений, оставляемых судами на поверхности моря.

Данная технология была апробирована в ходе проекта «Обнаружение нефтяных загрязнений с судов в Азово-Черноморской зоне ответственности Российской Федерации», выполненного в 2008–2009 гг. при совместной работе ИТЦ «СКАНЭКС» и ФГУ «АМП Новороссийск», а также в 2011 г. при совместной работе ФГБУ «НИЦ «Планета» и ФГУ «АМП Новороссийск».

В результате реализации данной технологии в 2008–2009 и 2011 гг. было установлено 13 судов, причастных к разливам нефтепродуктов; из них 4 судна были задержаны службами порта, 8 судов записаны в список подозреваемых и установлено 1 нелегальное судно.

Таким образом, опыт разработки и использования данной технологии показал ее эффективность и уникальность при мониторинге загрязнения моря по данным дистанционного зондирования Земли из космоса. Однако отсутствие законодательной базы является сдерживающим фактором при использовании данной технологии.

Литература:

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

2. Иванов А.Ю., Затыгалова В.В. Картографирование пленочных загрязнений моря с использованием космической радиолокации и географических информационных систем // Исследование Земли из космоса. 2007. № 6. С. 46–63.
3. Ivanov A.Yu., Zatyagalova V.V. A GIS approach to mapping of oil spills in the marine environment // International Journal of Remote Sensing. 2008. Vol. 29. No. 21. P. 6297–6313.
4. Tsvetkov V. Ya. Global Monitoring // European Researcher. 2012. Vol. (33). No. 11–1. P. 1843–1851.
5. Цветков В.Я., Железняков В.А. Инкрементальный метод проектирования электронных карт. // Инженерные изыскания. 2011. № 1. янв. С. 66–68.
6. Куркчи В.А., Гомозов О.В., Ладыженский Ю.В. Исследование инкрементных методов решения СЛАУ // Донецк, ДонНТУ: Всеукраинская научно-техническая конференция КМиТ. 2009. С. 190–193.
7. Майоров А.А., Матерухин А.В. Геоинформационный подход к задаче разработки инструментальных средств массовой оценки недвижимости // Геодезия и аэрофотосъемка. 2011. № 5. С. 92–98.
8. Новаковский Б. А., Прасолова А. И., Прасолов С. В. Цифровая картография: цифровые модели и электронные карты. М.: Изд-во МГУ, 2000.
9. Цветков В.Я. Логика в науке и методы доказательств. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Germany, 2012. – 86 с.
10. Freeman J. The modelling of spatial relations // Computer graphics and image processing. 1975. Т. 4. №. 2. С. 156–171.
11. Майоров А.А., Цветков В.Я. Геореференция как применение пространственных отношений в геоинформатике // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 3. С. 87-89.
12. Савиных В.П., Цветков В.Я. Геоданные как системный информационный ресурс // Вестник Российской Академии наук. 2014. Т. 84. № 9. С. 826–829.
13. Tsvetkov V.Ya. Information Units as the Elements of Complex Models // Nanotechnology Research and Practice. 2014. Vol.(1). No. 1. P. 57–64.
14. Li X. et al. Using micro information units for internet search // Proceedings of the eleventh international conference on Information and knowledge management. ACM, 2002. P. 566–573.
15. Tsvetkov V.Ya. Framework of Correlative Analysis // European Researcher. 2012. Vol. (23). No. 6-1. P. 839–844.
16. Ozhereleva T. Impact Analysis of Education Quality Factors // European Journal of Economic Studies. 2013. Vol.(5). No. 3. P. 172–176.
17. Цветков В.Я., Маркелов В.М. Пространственный ситуационный анализ // Вестник МГТУ МИРЭА «MSTU MIREA HERALD». 2013. № 1(1). С. 103–116.
18. Соловьев И.В. Применение модели информационной ситуации в геоинформатике // Науки о Земле. 2012. № 1. С. 54–58.

Geoinformational approach for monitoring of pollution of the sea according to remote sensing of the earth from space

Viktoriya Vladimirovna Zatyagalova, Researcher FGBU «Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”» Russia

The paper deals with application of geoinformatics and remote sensing in monitoring marine pollution. In particular, solved the problem of determining the specific surface of marine vessels. Reveals the specificity of geo-information approach for monitoring pollution of the sea. As a basis for monitoring use radar images (SAR images) are shown and disclosed in the basic problems that arise in the recognition slikoobrazuyuschih phenomena. To solve the problematic issues of basis sets developed by the author (direct) and casual (causal) evidence of contamination. In the aspect of a situation analysis “vessel-pollution” scenario approach was used. Examples of the use of the method. The efficiency of the proposed technology to solve practical problems.

Key words: remote sensing, monitoring, geo-information approach, the environment.