

Спутниковая радиолокационная многоугловая диагностика нефтяных загрязнений морской поверхности

А.Г. Боев¹, Д.М. Бычков², А.Я. Матвеев², В.Н. Цымбал²

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков, Украина

² Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,
Харьков, Украина
E-mail: matweev@list.ru

В работе описан метод спутниковой радиолокационной многоугловой диагностики нефтяных загрязнений морской поверхности. Рассмотрены особенности применения метода при аварийном разливе нефти и в случае непрерывного ее вытекания из стационарных источников (грифонов, терминалов и др.). С учетом реальных возможностей космических РСА спутников ERS-1/2, Envisat-1 выполнены оценки времен задержки между съемками под разными углами. Путем сопоставления с оценками толщины нефтяной пленки, полученными с помощью одночастотного радиолокационного метода при разных углах зондирования, проведена проверка точности измерения толщины пленки многоугловым методом.

Ключевые слова: радиолокационная многоугловая диагностика, аварийные разливы нефти, толщина нефтяной пленки, радиолокационное одночастотное зондирование.

Введение

Важность получения оперативной и достоверной информации об аварийных разливах нефти на поверхности морей и океанов является мощным стимулом разработки новых, более эффективных методов дистанционного зондирования, среди которых радиолокационные являются наиболее перспективными.

Использование результатов спутниковой радиолокационной съемки для диагностики нефтяных загрязнений морской поверхности является сложной многопараметрической задачей, при решении которой необходимо учитывать физико-химические параметры нефти, состояние морской поверхности, метеоусловия, стабильность работы измерительной аппаратуры, особенности движения носителя и мн. др. Одним из путей решения такой задачи является обоснованное уменьшение количества определяемых параметров за счет использования в качестве измерительной величины радиолокационного контраста загрязненной поверхности, определяемого как отношение мощностей сигналов, принимаемых радиолокатором от загрязненных нефтью и чистых участков морской поверхности. Такой подход за счет короткого времени съемки позволяет исключить из рассмотрения стабильность работы аппаратуры и движения носителя и считать состояние атмосферы и моря в пределах исследуемой акватории стабильными.

В настоящее время в мире известны три метода дистанционного определения толщины нефтяной пленки по радиолокационным данным. Все методы основаны на сравнении теоретических значений контрастов и экспериментальных, измеренных при одном угле зондирования морской поверхности на двух частотах – многочастотный (Boyle et al., 1997; Боев и др., 1998; Боев, Матвеев, 2005; Боев и др., 2007; Боев, Матвеев, 2008),

при одном угле зондирования на одной частоте – одночастотный (monruk.nerc.no/publications/publications-pdf/DEMOSS_SEASAR.pdf; www.rshu.ru/files/2008_ivanova.pdf; Кудрявцев и др., 2008) и при разных углах зондирования на одной частоте – многоугловой (Боев и др., 2011). Два первых метода уже прошли апробацию. Валидация многочастотного метода проводилась сравнением с данными радиометрических измерений (Sharkov, 2003), а одночастотного – с контактными данными (monruk.nerc.no/publications/publications-pdf/DEMOSS_SEASAR.pdf). В данной работе рассмотрены принцип и особенности применения нового спутникового радиолокационного многоуглового метода диагностики нефтяных загрязнений морской поверхности.

Описание метода

Многоугловой, как и многочастотный, методы базируются на теории рассеяния радиоволн морской поверхностью в присутствии пленок ПАВ конечной толщины (Боев, Карвицкий, 1997; Боев, Ясницкая, 2002). В данной теории теоретический радиолокационный контраст $D_{\text{твор.}}$ в общем случае является функцией пяти параметров, характеризующих пленку: активности (упругости) p , толщины h , поверхностного натяжения α , вязкости ν и плотности ρ . При наличии достаточно большого массива экспериментальных значений радиоконтрастов $D_{\text{эксп.}}$ принципиально возможно составить пять независимых уравнений – равенств ($D_{\text{твор.}}(p, h, \alpha, \nu, \rho) = D_{\text{эксп.}}(p, h, \alpha, \nu, \rho)$) и решить их относительно всех этих параметров. В случае зондирования акватории, на которой параметры разлитой по поверхности нефти (вязкость, поверхностное натяжение и плотность) заранее известны, для определения остальных двух неизвестных параметров (активности p и толщины h) достаточно составить два уравнения. Например, с использованием данных зондирования на сантиметровых и дециметровых радиоволнах (многочастотный метод) или с использованием данных сантиметрового диапазона при зондировании под углами θ_1 и θ_2 (многоугловой):

$$\begin{aligned} D_{\text{meop.}}(k_C, p, h) &= D_{\text{эксп.}}(k_C, p, h) & D_{\text{meop.}}(k_C(\theta_1), p, h) &= D_{\text{эксп.}}(k_C(\theta_1), p, h) \\ D_{\text{meop.}}(k_d, p, h) &= D_{\text{эксп.}}(k_d, p, h) & D_{\text{meop.}}(k_C(\theta_2), p, h) &= D_{\text{эксп.}}(k_C(\theta_2), p, h) \end{aligned} \cdot k = 2k_E \sin \theta, \quad (1)$$

где k_C и k_d – волновые числа, соответственно, сантиметровых и дециметровых поверхностных волн, k – волновые числа морской и радиоволн.

Из (1) видно, что оба метода для оценок толщины и активности нефтяной пленки используют значения радиоконтрастов, полученных на одном и том же участке морской поверхности для двух различных длин поверхностных волн.

К сожалению, сопоставление этих методов по результатам оценок толщины нефтяной пленки невозможно потому, что в настоящий момент радиолокационную съемку земной поверхности с орбиты выполняют только одночастотные радиолокаторы с синтезированием апертуры (РСА). При этом наиболее доступными для анализа являются архивные радиолокационные изображения (РЛИ) С-диапазона РСА спутников ERS-1/2 и Envisat-2 (http://directory.eoportal.org/missions_all_list.php?&view_all). Поэтому реальной возможностью апробации многоуглового метода является сравнение с данными, полученными

одночастотным. Несмотря на то что с помощью одночастотного метода зачастую трудно отличить на морской поверхности нефтяное пятно от ветрового слива, выбором акватории, в которой постоянно присутствует разлитая нефть, можно одновременно устранить этот недостаток и удовлетворить условию (1). Такой акваторией может быть, например, район добычи нефти Нефтяные Камни в Каспийском море, в котором, как правило, добыча нефти всегда сопровождается технологическими утечками.

Анализ многолетних радиолокационных данных Европейского космического агентства (ESA) по этому району, предоставляемых ESA через сервер-каталог EOLI-SA (<http://earth.esa.int/EOLI/> EOLI.html), показал, что наиболее контрастно нефтяные загрязнения наблюдаются в РЛИ спутников ERS-1,2 и полосах IS1 – IS4 ($\theta=15,0^{\circ}\div36,3^{\circ}$) РЛИ Envisat-1 в режимах съемки Image Mode (IM) и Wide Swath Mode (WSM). Геометрия спутниковой съемки показана на *рис. 1*.

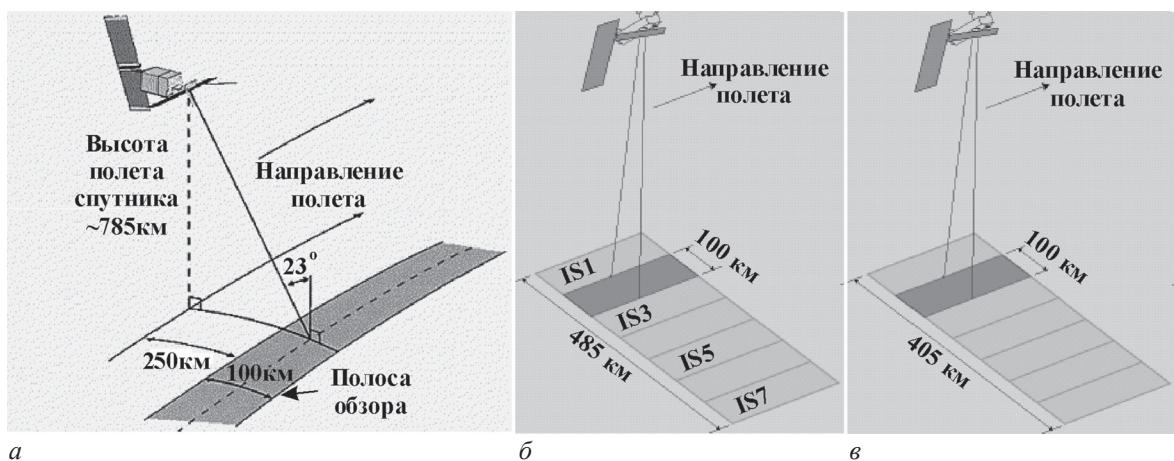


Рис. 1. Геометрия съемки PCA со спутников ERS-1/2 (а) и Envisat-1 в режимах IM (б) и WSM (в)

Наиболее пригодными для многоугловой диагностики нефтяных загрязнений являются РЛИ, полученные при регулярных съемках исследуемого района. Такие съемки проводились PCA спутников ERS-1 и ERS-2 в 1996–97 гг. и PCA спутников ERS-2 и Envisat-1 в 2008–2009 гг. (Tandem Mission) в режиме синхронной съемки с задержкой между съемками $t \sim 30$ мин. (<http://events.eoportal.org/presentations/182/4630.html>). На протяжении последних лет регулярные съемки района Нефтяные Камни проводятся с помощью PCA спутника Envisat-1. Поскольку съемки проводятся на восходящих и нисходящих витках, задержка между съемками может варьироваться от 12 часов до нескольких суток. Пример геометрии регулярных съемок и РЛИ, полученных с помощью PCA спутника Envisat-1, представлен на *рис. 2*, на котором также приведены значения углов наблюдения θ и время пролета точки условного центра наблюдаемого нефтяного пятна с координатами координатами $40,334^{\circ}$ с. ш., $50,75^{\circ}$ в. д..

Точность измерений толщины нефтяной пленки многоугловым методом зависит от корректности учета изменения толщины пленки на морской поверхности за время между проведением съемок. Эти изменения могут быть учтены путем моделирования процесса растекания пленки с учетом количества вытекающей из источника нефти, скоростей течения и приводного ветра.

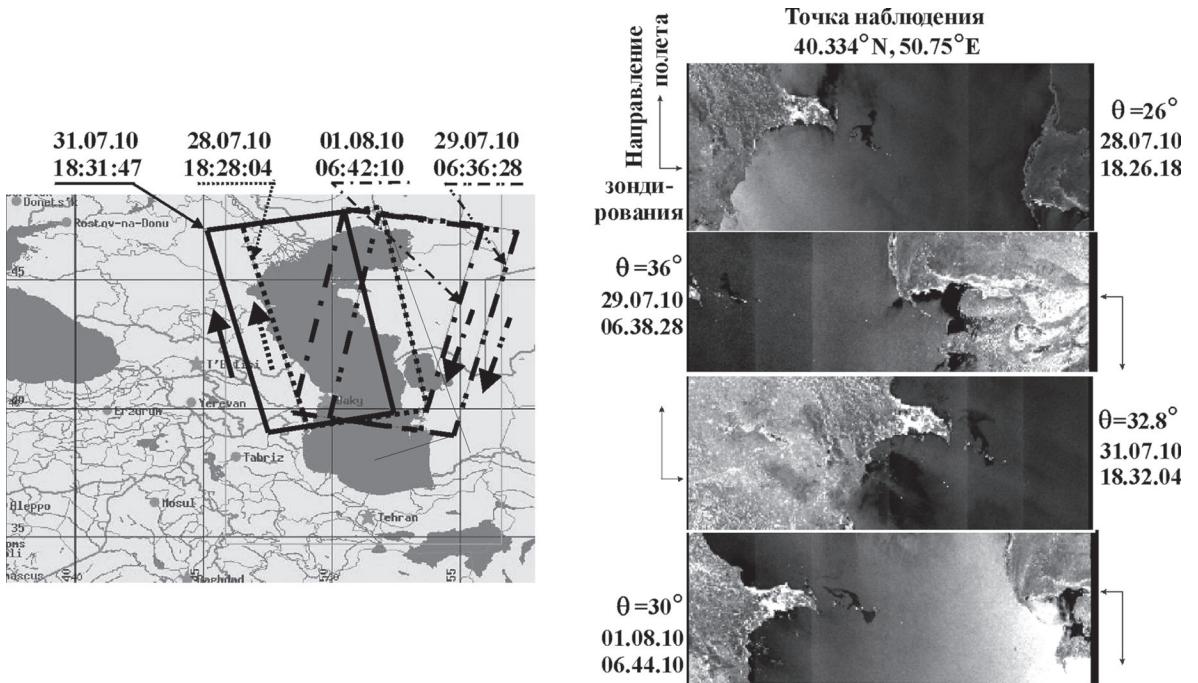


Рис. 2. Полосы съемки ASAR Envisat-1 в режиме WSM (слева) и фрагменты РЛИ (квик-луки) ASAR/WSM, поляризация HH (©ESA) (справа)

В начале моделирования по анализу пространственного распределения радиоконтрастов на нескольких последовательно снятых РЛИ проводится оценка динамики развития нефтяного пятна. Как показали эксперименты с контролируемыми разливами нефти (Митник, 1977), вокруг источника загрязнения длительное время существует пятно нефти, в котором находится около 90% всей разлитой нефти. Толщина пятна составляет $\sim 2,4$ мм, а площадь пятна растет как $t^{1/5}$ с момента разлия нефти. Оценка изменения площади пятна на последовательных РЛИ позволяет разделить случаи разового аварийного разлива нефти и непрерывного вытекания из стационарных источников (или длительной разгерметизации нефтедобывающих скважин).

В случае аварийного разлива нефти по морской поверхности вначале восстанавливается картина полной поверхностной циркуляции в исследуемой акватории. Для этого по данным спутниковой альtimетрии рассчитывается геострофическая скорость, а по данным о поле приводного ветра – дрейфовая скорость (Kubryakov, Stanichny, 2011). Затем, с учетом массы и физических параметров разлитой нефти (вязкости, упругости, плотности и др.), а также временных интервалов и изменения в них скоростей растекания нефти (Hoult, 1972; Монин, Красицкий, 1985) моделируется поле толщин нефтяной пленки.

При непрерывном вытекании нефти достаточно оценить площадь пятна вблизи источника загрязнения и определить в пятне, с учетом (Митник, 1977), толщину пленки разлитой нефти с помощью одночастотного метода, а при прекращении вытекания моделирование ведется как в случае аварийного разлива.

По результатам моделирования, зная время задержки между съемками, можно рассчитать уменьшение толщины пленки Δh . При этом система уравнений (1) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} D_{meop.}(k_C(\theta_1), p, h) &= D_{\text{эксп.}}(k_C(\theta_1), p, h), \\ D_{meop.}(k_C(\theta_2), p, (h_1 + \Delta h)) &= D_{\text{эксп.}}(k_C(\theta_2), p, (h_1 + \Delta h)), \quad h = (h_1 + \Delta h). \end{aligned} \quad (2)$$

Как видно из (2) при уменьшении времени между съемками $\Delta h \rightarrow 0$, $h_1 \rightarrow h$.

Перед определением толщины пленки h по формуле (2) необходимо отметить, что доступные для дальнейшей обработки «квик-луки» РЛИ, предоставляемые в режиме открытого доступа сервером-каталогом EOLI-SA, имеют низкое разрешение, сжаты по специальному закону и непригодны для количественных оценок.

Поэтому в рамках данной работы для проверки многоуглового метода были использованы значения экспериментальных радиоконтрастов, полученные с помощью одночастотного метода для одной толщины нефтяной пленки при различных углах падения θ и прошедшие апробацию в экспериментах на Черном, Каспийском, Баренцевом и Карском морях. В табл. 1 приведены из работы (monruk.nersc.no/publications/publications-pdf/DEMOSS_SEASAR.pdf) значения радиоконтрастов $D_{\text{эксп.}}(k_C(\theta), p, h)$ морской поверхности, покрытой нефтяной пленки толщиной $h = 1 \text{ мм}$, при скорости приводного ветра 5 м/с для углов зондирования, характерных при наблюдении нефтяных загрязнений PCA спутников ERS-1/2 и Envisat-1.

Таблица 1. Зависимость радиоконтрастов $D_{\text{эксп.}}(k_C(\theta), p, h)$ от угла зондирования θ для морской поверхности, покрытой нефтяной пленкой $h = 1 \text{ мм}$

<i>Толщина пленки нефти $h = 1 \text{ мм}$, скорость приводного ветра 5 м/с</i>				
Угол зондирования θ , град.	20	22	26	30
Радиоконтраст, дБ	5,6	7,0	11,6	16,0

Различные комбинации пар экспериментальных контрастов из были использованы для расчетов по формуле (1) значений толщины нефтяных пленок. Теоретические значения радиоконтрастов $D_{\text{теор.}}(k_C(\theta), p, h)$ рассчитывались для известных значений параметров Каспийской нефти: коэффициенты поверхностного натяжения на границе раздела вода – нефть $\alpha = 13 \text{ дин/см}$, на границе раздела воздух – нефть $\alpha_1 = 60 \text{ дин/см}$; коэффициенты кинематической вязкости: воды – $\nu = 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$, нефти – $\nu_1 = 0,3 \text{ см}^2/\text{с}$; плотность воды $\rho = 1 \text{ г/см}^3$, плотность нефти – $\rho_1 = 0,8 \text{ г/см}^3$. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты таких расчетов.

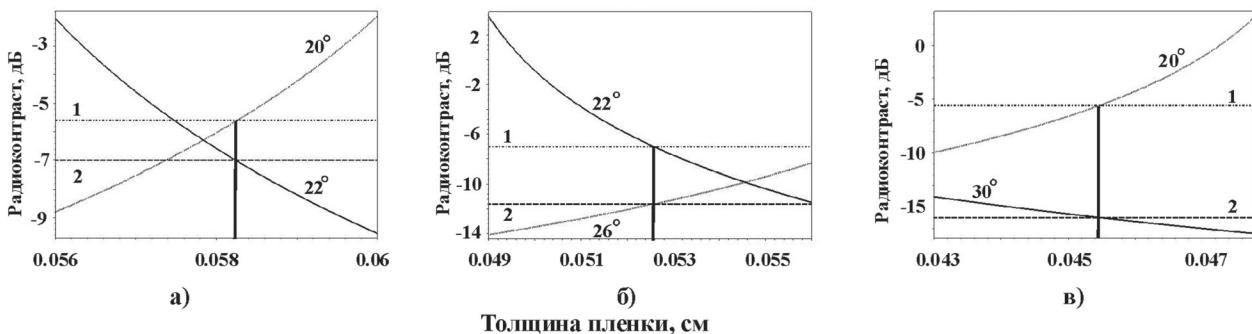


Рис. 3. Зависимость теоретических радиоконтрастов $D_{\text{теор.}}(k_C(\theta), p, h)$ (кривые) от толщины пленки h . Штриховыми линиями показаны экспериментальные значения радиоконтрастов $D_{\text{эксп.}}(k_C(\theta), p, h)$. а – для пары углов зондирования $\theta = 20^\circ, 22^\circ$; б – для пары углов зондирования $\theta = 20^\circ, 26^\circ$; в – для пары углов зондирования $\theta = 20^\circ, 30^\circ$. Жирная линия указывает на исковую толщину нефтяной пленки

Как видно из *рис. 3*, при вариации пар углов зондирования θ_1, θ_2 искомая толщина нефтяной пленки составляет $h = 0,45\text{--}0,6\text{ мм}$. При подстановке в (1) значений параметров нефтяной пленки из (www.iki.rssi.ru/earth/articles06/vol2-086-098.pdf), использованных в расчетах толщины пленки по одночастотному методу, значения толщины нефтяной пленки $h = 0,6\text{--}0,8\text{ мм}$.

Полученные оценки толщины нефтяной пленки по порядку величины совпадают с данными, полученными с помощью одночастотного метода (см. *табл. 1*), и подтверждают измерительные возможности радиолокационного многоуглового метода.

Выводы

В современных условиях, когда регулярное ДЗЗ осуществляется одночастотными космическими РСА, создание адекватных радиолокационных методов, позволяющих оперативно по этим данным проводить диагностику нефтяных разливов, является необходимым для экологического мониторинга Мирового океана. Проведенные оценки точности многоуглового метода подтверждают возможность его использования для измерения толщин нефтяной пленки.

В настоящее время на орбите растет число радиолокационных спутников (http://directory.eoportal.org/missions_all_list.php?&view_all, http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_missions/list_of_satellites/tand_general.html), проводящих съемку земной поверхности с синхронных орбит при определенном расстоянии между ними (стереосъемка). Это открывает перспективы использования предложенного многоуглового метода диагностики нефтяных загрязнений морской поверхности.

Литература

1. *Боев А.Г., Карвицкий Г.Э.* К теории радиолокационного контраста морского волнения при наличии пленки поверхностно-активного вещества // Радиофизика и радиоастрономия. 1997. Т. 2. № 3. С. 281–291.
2. *Боев А.Г., Карвицкий Г.Э., Матвеев А.Я., Цымбал В.Н.* Оценка параметров нефтяной пленки на морской поверхности методом многочастотного радиолокационного зондирования // Радиофизика и радиоастрономия. 1998. Т. 3. № 1. С. 43–48.
3. *Боев А.Г., Ясницкая Н.Н.* Коэффициент затухания поверхностных волн под пленкой поверхностно – активного вещества конечной гидродинамической толщины // Прикладна гідромеханіка. 2002. Т. 4. № 4. С. 14–22.
4. *Боев А.Г., Ясницкая Н.Н.* Гашение морского волнения пленкой поверхностно-активного вещества конечной толщины // Известия РАН. ФАО. 2003. Т. 39. № 1. С. 132–141.
5. *Боев А.Г., Матвеев А.Я.* Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла «Нефтяные камни» по данным многочастотного радиолокационного зондирования // Радиофизика и радиоастрономия. 2005. Т. 10. № 2. С. 178–188.

6. *Боев А.Г., Ефимов В.Б., Цымбал В.Н. и др.* / Под ред. С.Н. Конюхова, В.И. Драновского, В.Н. Цымбала. Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей. К.: НАН Украины, 2007. 439 с.
7. *Боев А.Г., Матвеев А.Я.* Радиолокационный метод оценки параметров нефтяных загрязнений морской поверхности // Исследования Земли из космоса. 2008. № 5. С. 29–36.
8. *Боев А.Г., Матвеев А.Я., Бычков Д.М., Цымбал В.Н.* Спутниковая радиолокационная многоугловая диагностика нефтяных загрязнений морской поверхности // Девятая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН. 14–18 ноября 2011 г. С. 244.
9. *Кудрявцев В.Н., Иванова Н.А., Гуцин Л.А., Ермаков С.А.* Оценка контрастов спектра ветровых волн в сликах, вызванных биогенными и нефтяными пленками: Препринт № 765. Н.-Новгород: ИПФ РАН, 2008.
10. *Митник Л.М.* Физические основы дистанционного зондирования окружающей среды: Учебное пособие. Л.: ЛПИ, 1977. 57 с.
11. *Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 376 с.
12. *Boyev A.G., Karvitsky G.E., Matveyev A.Ya., Tsymbal V.N.* Evaluation of Oil Film Parameters on the Sea Surface Using Multifrequency Radar Date // Telecommunications and Radio Engineering. 1997. Vol. 51. No. 8. P. 4–12.
13. *Hoult D.P.* Oil spreading on the sea // Ann Rev. Fluid Mech. 1972. Vol. 4. P. 341–368.
14. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Mean Dynamic Topography of the Black Sea, computed from altimetry, drifter measurements and hydrology data // Ocean Sci. 2011. 7. P. 745–753, doi:10.5194/os-7-745-2011.
15. *Sharkov E.A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth. Physical Foundations // Chichester. UK: Praxis Publishing Ltd. 2003. 611 p.

Radar satellite multi-angle diagnostics of sea surface oil pollution

A.G. Boev¹, D.M. Bychkov², A.Ya. Matveyev², V.N. Tsymbal²

¹Radioastronomical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine

²Usikov Institute of Radiophysics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine

E-mail: matweev@list.ru

The multi-angle satellite radar diagnosis method of sea surface oil pollutions is described in this paper. In both case of emergency oil spill and of a continuous outflow from stationary sources (griffins, terminals, etc.) the method features of are examined. Taking into account the real possibilities of space SAR satellites ERS-1/2, Envisat-1 the time delay between looks from different incidence angles are estimated. By comparison with the data of oil film thickness, obtained using a single-frequency sensing at different incidence angles radar method, the accuracy of the measurement of film thickness multi-angle method is checked.

Keywords: multi-angle radar diagnostics, oil spills, oil film thickness, single-frequency radar sensing.