

Радиолокационное квазивертикальное зондирование нефтяных загрязнений морской поверхности

А.Г.Боев¹, А.Я. Матвеев²

¹Радиоастрономический институт НАН Украины,
61002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4
E-mail: boev@ira.kharkov.ua

²Центр радиофизического зондирования Земли им. А.И. Калмыкова
НАН Украины и НКА Украины,
61085, Харьков, ул. Акад. Проскуры, 12
E-mail: matveyev@ire.kharkov.ua

В работе изучены возможности обнаружения и диагностики нефтяных загрязнений морской поверхности по результатам радиолокационного квазивертикального зондирования. Приведены теоретические зависимости радиолокационного контраста от угла зондирования, скорости приводного ветра и параметров нефтяной пленки для 3 см диапазона длин волн. Оценены параметры пленок различных типов нефти по величине экспериментально наблюдаемого радиолокационного контраста.

Введение

В настоящее время наблюдается ежегодный рост загрязнения Мирового океана. К этому приводят естественные выходы нефти на поверхность через грифоны, технологические потери нефти при шельфовой добыче, потери от разрушения действующих платформ частыми штормами и ураганами, потери при транспортировке и перекачке нефти, вынос в моря реками промышленных и бытовых отходов, что в итоге наносит непоправимый урон флоре и фауне океана [1]. Для принятия оперативных мер по обнаружению и устранению загрязнений океана в мире уже создается постоянно действующие космические системы наблюдения за Землей (GEOSS, GMES). В 2005 - 2007 гг. международным сообществом планируется вывести на орбиту 10-14 аппаратов с многоканальными системами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на борту [2]. Сейчас очевидно, что они будут играть доминирующую роль в повышении эффективности мер предупреждения возникновения чрезвычайных ситуаций экологического, техногенного и природного характера. Однако, как показывают оценки, даже такого количества систем ДЗЗ недостаточно для оперативного обнаружения аварийных разливов нефти на всей акватории Мирового океана. В качестве дополнительных средств оперативного мониторинга могут служить скаттерометры и радиолокаторы бокового обзора с реальной (РБО) и синтезированной (РСА) апертурой антенны в нестандартных режимах работы (при углах зондирования, близких к вертикальному).

Целью данной работы является построение теории радиолокационного контраста морского волнения под пленкой ПАВ конечной гидродинамической толщины и оценка возможности обнаружения и диагностики нефтяных загрязнений морской поверхности при зондировании под квазивертикальными углами.

Радиолокационный контраст морской поверхности, покрытой пленкой поверхностно-активного вещества

Основным критерием оценки степени загрязненности морской поверхности поверхностно-активными веществами (ПАВ), является радиолокационный контраст K (далее контраст), определяемый как отношение мощностей радиолокационных сигналов, принятых от синхронно облученных участков загрязненной W_S и чистой морской поверхности W_0 [3, 4]:

$$K = W_S / W_0. \quad (1)$$

К настоящему времени выполнено большое количество экспериментальных работ по обнаружению радиолокационными методами загрязнений морской поверхности различными поверхностно-активными веществами (в основном, нефтью и нефтепродуктами). Эти исследования проводились с помощью различных космических и авиационных систем в широком диапазоне частот и углов [5-13]. Они подтвердили возможность надежного обнаружения пленок ПАВ на поверхности моря и дали богатый материал для теоретического анализа явления.

Созданная теория радиолокационного контраста морского волнения при наличии пленки ПАВ для случаев тонких (мономолекулярных) пленок и пленок конечной гидродинамической толщины [14-16] в настоящее время достаточно хорошо объясняет данные экспериментов при углах падения радиоволн $\theta=20^\circ\div 70^\circ$. Данные же экспериментов для углов падения $\theta=0^\circ\div 15^\circ$, где преобладает кирхгофовский механизм рассеяния радиоволн на морском волнении, объяснены лишь для мономолекулярных пленок ПАВ [14].

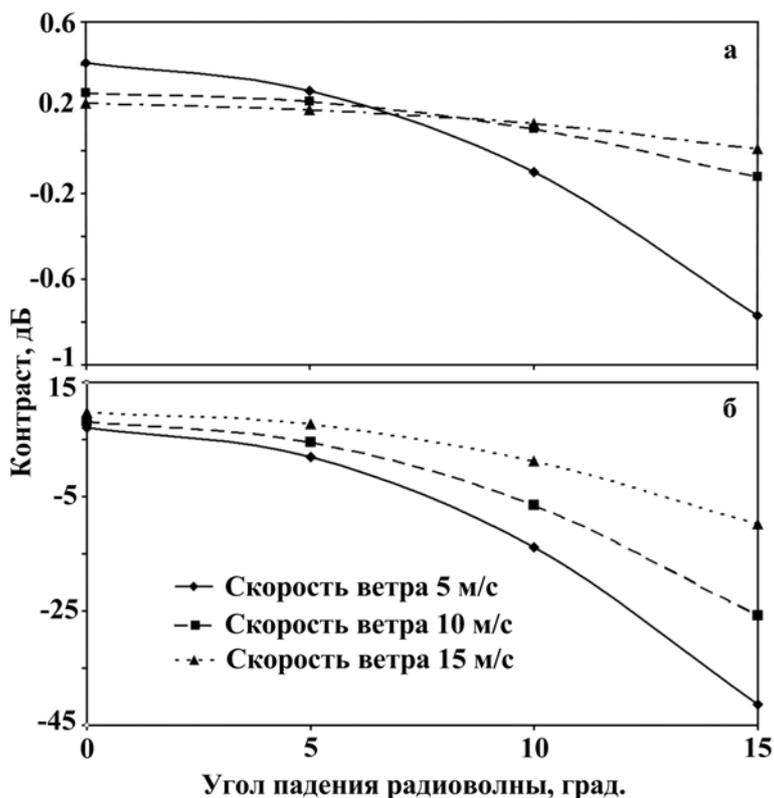


Рис. 1. Теоретические зависимости радиолокационного контраста K от угла падения θ радиоволны $\lambda=3\text{ см}$ при различных толщинах h и активности p нефтяной пленки для скоростей ветра 5-15 м/с. а – $h = 0.001\text{ см}$, $p = 0.3$; б – $h = 0.1\text{ см}$, $p = 0.724$

В данной работе, с использованием результатов, приведенных в [14-16], рассмотрен случай рассеяния радиоволн на взволнованной морской поверхности, покрытой пленкой конечной толщины (далее толстой пленкой). В предположении отсутствия влияния пленки ПАВ на электромагнитные характеристики моря и угловую структуру спектра ветрового волнения, выражение для радиолокационного контраста K морской поверхности, покрытой пленкой ПАВ, имеет следующий вид:

$$K = \beta^2 \exp \left\{ -(\beta^2 - 1) \left(\frac{\gamma_x^2}{2a_0^2} + \frac{\gamma_y^2}{2b_0^2} \right) \right\} \quad (2)$$

где:

$$\beta^2 = \frac{\int_0^{k_m} k S_0^\theta(k, V) dk}{\int_0^{k_m} k S_S^\theta(k, V) dk} = \frac{\int_0^{k_m} k S_0^\theta(k, V) dk}{\int_0^{k_m} k S_0^\theta(k, V) \frac{S_S^\theta(k, V)}{S_0^\theta(k, V)} dk}, \quad (3)$$

γ_x, γ_y и a_0, b_0 - тангенсы углов наклона чистой морской поверхности (по ортогональным направлениям x и y) и их дисперсии, $k = 2\pi/\Lambda$ - волновое число морской волны длиной Λ ; k_m - граничное волновое число, разделяющее спектр на крупномасштабную и мелкомасштабную части относительно длины зондирующей радиоволны λ ; $S_0^\theta(k, V), S_S^\theta(k, V)$ - пространственные спектры уклонов, соответственно, чистого и загрязненного участков моря (зависят от скорости приводного ветра V и параметров ПАВ [14-16]).

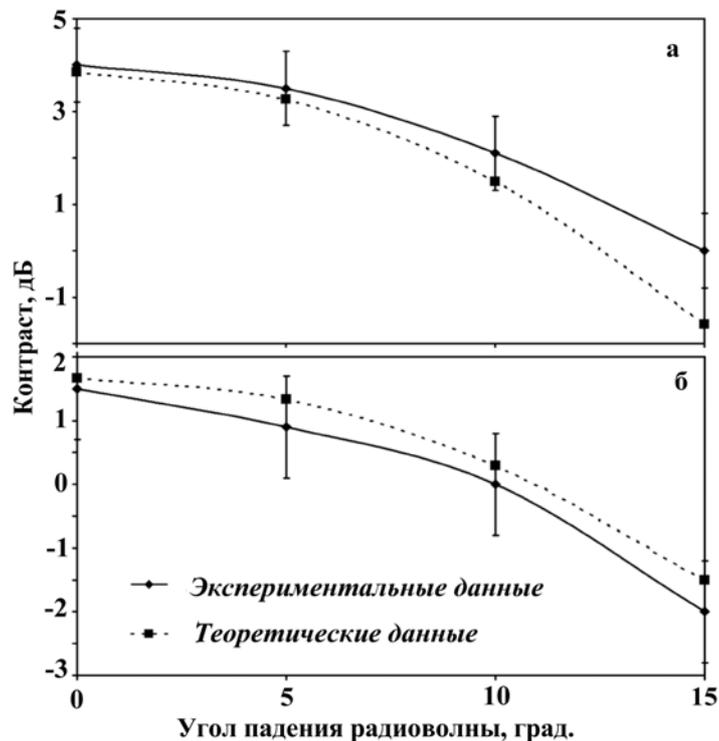


Рис.2. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей радиолокационного контраста K от угла падения θ радиоволны $\lambda = 3$ см. **а** – теоретические данные $h = 0.04$ см, $p = 0.35$, $W = 14$ м/с, экспериментальные данные (каспийская нефть [17]); **б** - теоретические данные $h = 0.001$ см, $p = 0.3$, $W = 9$ м/с, экспериментальные данные (La Rosa oil [10])

В качестве примера на рис.1 показаны полученные по формуле (2) ветровые ($V = 5-15$ м/с на высоте $H = 19$ м) и угловые ($\theta = 0^\circ \div 15^\circ$) зависимости контраста K морского волнения в присутствии нефтяной пленки при зондировании морской поверхности на длине радиоволны $\lambda = 3$ см. Видно, что вблизи $\theta = 0^\circ$ контрасты K имеют положительные значения, увеличивающиеся с ростом толщины пленки h . Тонкие пленки давно разлитой нефти (рис.1а: толщина пленки $h = 10^{-3}$ см, поверхностная активность (упругость) $p = 0.3$) обнаруживаются на поверхности с более высоким контрастом при малых скоростях приводного ветра и отличных от вертикального углах наблюдения. Толстые пленки свежевылитой нефти (рис.1б: $h = 10^{-1}$ см, $p = 0.724$) уверенно обнаруживаются в более широком диапазоне углов наблюдения и скоростей приводного ветра. Необходимо отметить различие в поведении зависимости контраста от скорости ветра для тонких и толстых пленок. Для тонких пленок увеличение скорости ветра приводит к выравниванию угловой зависимости контраста морского

волнения, в то время как для толстых пленок наблюдается увеличение контраста с ростом угла наблюдения. Такое поведение контрастов при $h \geq 10^{-1}$ см связано с тем, что в пленке возникают собственные колебания [3], создающие промежуточный слой, который демпфирует передачу колебательного движения морских волн пленке. Волны как бы проскальзывают под пленкой, испытывая меньшее ослабление.

Для подтверждения возможностей диагностики нефтяных загрязнений морской поверхности на рис. 2 приведены результаты сравнения теоретических значений контрастов и экспериментальных, полученных с помощью скаттерометров 3 см диапазона длин волн (а – для Каспийской нефти [17], б – для нефти "La Rosa" [10]). Видно, что подбором параметров нефтяных пленок (толщины пленки h , активности пленки ρ) можно добиться совпадения теоретических значений контрастов с экспериментальными с точностью до погрешности измерений.

Выводы

В работе показано, что при радиолокационном зондировании покрытой нефтью морской поверхности под углами, близкими к вертикальному, свежеразлитая нефть уверенно обнаруживается с высоким положительным (при $\theta=0^\circ$) и отрицательными (при $\theta=10^\circ \div 15^\circ$) контрастами в широком диапазоне скоростей приводного ветра. Сравнение экспериментальных и теоретических угловых зависимостей контраста загрязненной поверхности при известных параметрах морского волнения позволяет оценить основные параметры нефтяных пленок (поверхностную активность и толщину пленки).

Литература

1. Милейковский С.А. Объем загрязнения Мирового океана // Океанология, 1979. Т.19. №5. С. 829 – 834.
2. Кучейко А. Перспективный радиолокационный спутник "Аркон-2" // Новости космонавтики, 2005. Т.15. №1 (264). С. 50-53.
3. Боев А.Г., Карвицкий Г.Э., Матвеев А.Я., Цымбал В.Н. Оценка параметров нефтяной пленки на морской поверхности методом многочастотного радиолокационного зондирования // Радиопизика и Радиоастрономия, 1998. Т.3. №1. С.43-48.
4. Боев Г.А., Матвеев А.Я. Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла "Нефтяные камни" по данным многочастотного радиолокационного зондирования // Радиопизика и Радиоастрономия, 2005. Т.10. №2. С.178- 188.
5. Alvarado U.R., Tomiyasu K., Gulatsy R.L. Assessment of space sensor for ocean pollution monitoring // AIAA Sens. Syst. 80's Conf., Colorado Springs (USA), Collect. tech. pap. 1980. P. 61-64.
6. Галаев Ю.М., Калмыков А.И., Курекин А.С. и др. Радиолокационные обнаружения нефтяных загрязнений морской поверхности // Известия АН СССР. ФАО. 1977. Т.13. №4. С.406- 414.
7. Pilon R.O., Purves C.G. Radar Imagery of Oil Slicks // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1973. Vol.AES-9, No. 5. P.630-636.
8. Иванов А.Ю. Нефтяные загрязнения моря на радиолокационных изображениях КА "Космос-1870" и "Алмаз-1" // Исследования Земли из космоса, 1997. №6. С. 73-84.
9. Krishen K. Detection of Oil Spills Using a 13.3-GHz Radar Scatterometer // J. Geophys. Res., 1973. Vol.78. No12. P.1952-1963.
10. Johnson J.W., Croswell W.F. Characteristics of 13.9 GHz radar scattering from oil films on the sea surface // Radio Science, 1982. Vol.17. No3. P. 611-617.

11. *Hawkins R.K., Gray A.L., Thomson V. And Neville R.A.* Observation of two test oil spills with a microwave scatterometer and a Synthetic Aperture Radar//Proc. 1st Workshop by Working Group 1, U.S. Coast Guard, DC. - Washington (USA). 1979. P. 249-257.
12. *Singh K.P., Gray L.A. Hawkins R.K., O'neil R.A.* The Influence of Surface Oil on C- and Ku-Band Ocean Backscatter// IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1986. Vol.GE-24. No.5. P.738-743.
13. *Waggett P.W., Ward I.A.* A Combined SAR and Scatterometer System // Proc. IGARSS'87 Symposium, Ann Arbor (USA), 18-21 May. 1987. P. 1507-1509.
14. *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.
15. *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.
16. *Боев А.Г., Ясницкая Н.Н.* Гашение морского волнения пленкой поверхностной-активного вещества конечной толщины // Известия РАН, Физика атмосферы и океана, 2003. Т.39. № 1. С.132- 141.
17. *Kalmykov A.I., Pichugin A.P., Sinitsin Yu.A., Shestopalov V.P.* Some features of radar monitoring of oceanic surface from aerospace platform // Int. J. Remote Sensing, 1982. Vol.3. №3. P.311-325.