

## Квазивертикальное радиолокационное зондирование пленок поверхностно-активных веществ конечной толщины на морской поверхности

А. Г. Боев, А. Я. Матвеев<sup>1</sup>

*Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина*

*<sup>1</sup>Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАН и НКА Украины,  
ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина  
E-mail: matveyev@ire.kharkov.ua*

*Статья поступила в редакцию 23 сентября 2008 г.*

Изучены возможности обнаружения и диагностики нефтяных загрязнений морской поверхности по данным двухчастотного метода радиолокационного квазивертикального зондирования в сантиметровом диапазоне длин волн. Приведены теоретические зависимости радиолокационного контраста морского волнения под нефтяной пленкой конечной толщины от скорости приводного ветра и угла зондирования на длинах волн 3 и 5.66 см. Показана перспективность метода для диагностики свежеразлитой нефти. Оценены параметры пленок различных типов нефти по экспериментально наблюдаемым значениям радиолокационных контрастов.

### 1. Введение

В настоящее время наблюдается ежегодный рост загрязнения Мирового океана. По прогнозам секретариата ОПЕК до 2020 г. добыча нефти должна вырасти в мире с  $3.7 \div 4$  млрд т в год (в 2004 г.) до  $\sim 6$  млрд т в год. При этом треть всей нефти добывается на морском шельфе. При таком способе добычи среднестатистические технологические потери нефти, загрязняющие океан, равны  $\sim 3.1\%$ , что составляет соответственно  $\sim 38$  и  $\sim 62$  млн т в год. К этому добавляются потери при транспортировке и перекачке нефти, от разрушения действующих нефтяных платформ частыми штормами и ураганами, а также вынос 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 создаются постоянно действующие космические сис-

темы наблюдения за Землей (GEOSS, GMES). В 2005–2007 гг. международным сообществом планировалось 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 чрезвычайных ситуаций экологического, техногенного и природного характера. Радиолокационные системы ДЗЗ, особенно в условиях плохой освещенности земной поверхности и плотного облачного покрова, способны обеспечить необходимый уровень информации [3, 4].

К настоящему времени выполнено большое количество экспериментальных работ по обнаружению радиолокационными методами загрязнений морской поверхности различными поверхностно-активными веществами (ПАВ), в основном нефтью и нефтепродуктами. Эти исследования проводились с помощью различных космических систем в широ-

ком диапазоне частот и углов [5-15]. Они подтвердили возможность надежного обнаружения пленок ПАВ на поверхности моря и дали богатый материал для теоретического анализа явления.

Имеющаяся теория радиолокационного контраста морского волнения под пленками ПАВ мономолекулярной и конечной толщины [16-18] в настоящее время достаточно хорошо объясняет данные экспериментов для углов падения радиоволн  $\theta$  от 15 до 70°. Данные экспериментов при квазивертикальном зондировании моря ( $\theta = 0 \div 15^\circ$ ), когда преобладает кирхгофский механизм рассеяния радиоволн, объяснены лишь для мономолекулярных пленок ПАВ [16].

Целью настоящей работы являются изучение особенностей квазивертикального радиолокационного зондирования морской поверхности, загрязненной пленками ПАВ конечной гидродинамической толщины, и оценка возможностей обнаружения и диагностики нефтяных загрязнений морской поверхности при углах наблюдения, близких к вертикальному.

## 2. Радиолокационный контраст морской поверхности под пленкой ПАВ

Основным критерием оценки степени загрязненности морской поверхности ПАВ является радиолокационный контраст  $K$  (далее – контраст), определяемый как отношение мощностей радиолокационных сигналов  $P_d$  и  $P_0$ , принятых соответственно от синхронно облученных участков загрязненной и чистой морской поверхности [5]:

$$K = P_d / P_0.$$

Для случая почти вертикального зондирования выражение для радиолокационного контраста морской поверхности под пленкой, в предположении об изотропности волнения, имеет вид [16]:

$$K = \beta^2 \exp \left\{ -(\beta^2 - 1) \left( \frac{\Gamma_x^2}{2a_0^2} + \frac{\Gamma_y^2}{2b_0^2} \right) \right\}, \quad (1.1)$$

$$\text{где: } \beta^2 = \int_0^{k_m} k^2 S_0(k, W) dk \bigg/ \int_0^{k_m} k^2 S_d(k, W) dk,$$

где  $\Gamma_x, \Gamma_y$  – тангенсы углов наклона крупномасштабных (относительно длины радиоволны) волн;  $a_0, b_0$  – их дисперсии на чистом участке;  $k = 2\pi/\Lambda$  – волновое число морской волны длины  $\Lambda$ ;  $k_m$  – граничное волновое число, разделяющее спектр морского волнения на крупномасштабную и мелкомасштабную части;  $W$  – скорость ветра. Величина  $\beta^2$  представляет собой относительную дисперсию углов наклона и вычисляется по пространственным спектрам высот –  $S_0(k, W)$  и  $S_d(k, W)$ , соответственно на чистом и загрязненном участках моря.

Спектр высот загрязненной поверхности вычисляется по формуле [18]:

$$S_d(k, W) = S_0(k, W) \frac{\omega_0(k)^2 \gamma_0(k)^2}{\omega_+(k)^2 \gamma(k)^2}, \quad (1.2)$$

где  $\omega_0(k) = (gk + \alpha k^3 / \rho)^{1/2}$  – частота волн на чистой поверхности;  $\omega_+(k) = [gk + (\alpha + \alpha_1)k^3 / \rho]^{1/2}$  – частота поверхностных волн под пленкой;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho$  – плотность воды,  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения на границе вода – ПАВ,  $\alpha_1$  – коэффициент поверхностного натяжения на границе воздух – ПАВ;  $\gamma_0(k) = 2\nu k^2$  – коэффициент вязкого затухания поверхностной волны в воде ( $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воды). Коэффициент затухания поверхностной волны  $\gamma(k)$  под пленкой ПАВ толщиной  $h$ , определялся по формуле:

$$\gamma = -\gamma_L - \frac{kh\omega_+}{2} (S_1 + S_2 - S_3),$$

$$\gamma_L = \gamma_0 \frac{1 - \frac{\gamma_g}{\omega_+} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} + \frac{\gamma_s^2}{\omega_+^2} \left( \frac{\omega_+}{\gamma_0} \right) + \frac{1}{2} \frac{\gamma_s^2}{\omega_+^2} \left( \frac{\omega_+}{\gamma_0} \right)^{3/2}}{1 - 2 \frac{\gamma_s}{\omega_+} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} + \frac{\gamma_s^2}{\omega_+^2} \left( \frac{\omega_+}{\gamma_0} \right)}$$

где  $\gamma_g = (\rho_1/\rho)\gamma_s$ ,  $\gamma_s = p\omega_{c1}^2/\omega_0$ ,  $\omega_{c1} = \sqrt{\alpha_1 k^3/\rho}$ ,  $\rho_1$  – плотность ПАВ,  $p = (c_0/\alpha_1)d\alpha_1/dc_0$  – безразмерная поверхностная активность пленки (далее – активность),  $c_0$  – ее невозмущенная поверхностная концентрация [19]. Выражения для величин  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  приведены в работе [18].

Значение граничного волнового числа  $k_m$  в формуле для  $\beta^2$  в (1.1) определяется условием [20]:

$$(\lambda_E/(2\pi R))^{1/3} = 0.1,$$

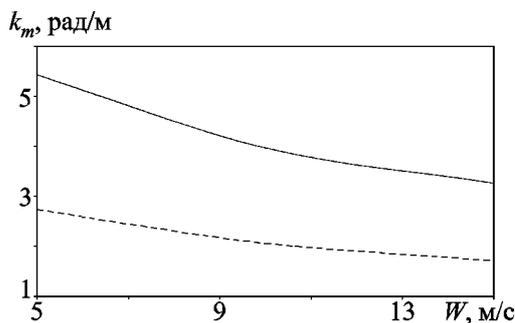
$$1/R^2 = \int_0^{k_m} k^3 S_0(k, W) dk,$$

где  $R$  – радиус кривизны морской поверхности в точке отражения зондирующей радиоволны. Оно вычислялось по спектру Китайгородского [21]:

$$S_0(k, W) = \frac{A}{2\pi} k^{-4} \exp[-0.74 g^2 k^{-2} W^{-4}],$$

где  $A = 6.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $W$  – скорость ветра на высоте 19.5 м над уровнем моря, м/с.

Зависимости  $k_m$  от скорости ветра для двух длин радиоволн, наиболее часто используемых для зондирования морской поверхности, приведены на рис. 1. Видно, что с ростом ско-



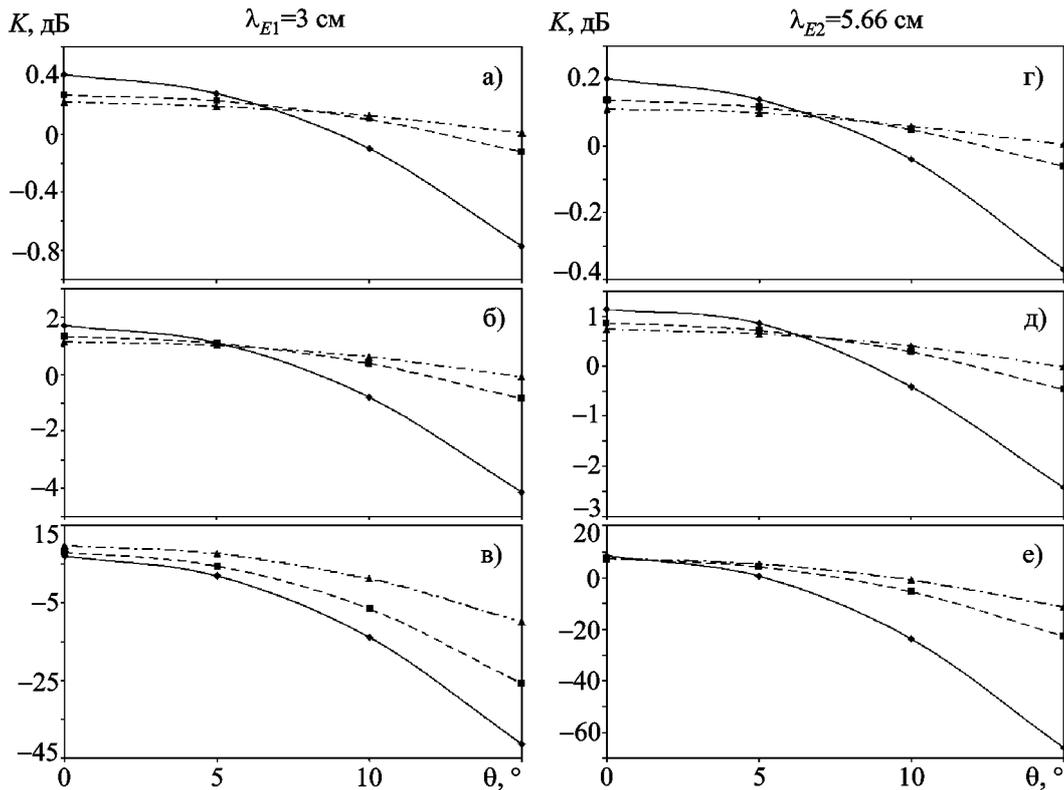
**Рис. 1.** Зависимость граничного волнового числа  $k_m$  от скорости приводного ветра  $W$  для двух длин радиоволн  $\lambda_{E1} = 3$  см (сплошная линия) и  $\lambda_{E2} = 5.6$  см (штриховая линия)

рости ветра  $k_m$  уменьшается, это говорит об увеличении наклона волн. При этом граничное волновое число для более короткой радиоволны оказывается более чувствительным к скорости ветра. Вычисление  $k_m$  по возмущенному пленкой спектру (1.2) дает практически тот же результат.

### 3. Численный анализ

Дальнейший анализ проведем для случая зондирования морской поверхности, покрытой нефтяной пленкой, радиоволнами  $\lambda_{E1} = 3$  см и  $\lambda_{E2} = 5.66$  см. При этом для расчетов примем коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела воздух – нефть равным  $\alpha_1 = 60$  дин/см, а на границе вода – нефть –  $\alpha = 13$  дин/см, коэффициенты кинематической вязкости воды и нефти –  $\nu = 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с и  $\nu_1 = 0.3$  см<sup>2</sup>/с соответственно, плотности воды и нефти –  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup> и  $\rho_1 = 0.8$  г/см<sup>3</sup> соответственно.

Анализ экспериментальных данных [5, 22, 23] показывает, что вблизи источников разлива нефти (например, нефтяных вышек) существуют довольно толстые пленки толщиной  $h = 0.1 \div 0.2$  см и поверхностной активностью  $p = 0.6 \div 0.9$ . При длительном воздействии морского волнения и ветра происходит уменьшение толщины и поверхностной активности пленки до значений  $h \approx 10^{-3} \div 10^{-2}$  см и  $p = 0.1 \div 0.4$ . Поэтому на рис. 2 представлены теоретические зависимости радиолокационных контрастов загрязненной нефтью морской поверхности от угла падения  $\theta$  для случаев “тонких” нефтяных пленок с  $h = 10^{-3}$ ,  $p = 0.3$  (рис. 2, а, г) и  $h = 10^{-2}$ ,  $p = 0.3$  (рис. 2, б, д), а также “толстых” с параметрами  $h \approx 10^{-1}$  см и  $p = 0.724$  (рис. 2, в, е). Как видно из рисунка, наличие любой пленки на морской поверхности дает положительное значение контраста при зондировании загрязненной морской поверхности под углом  $\theta = 0^\circ$ . Тонкие пленки ( $h < 0.01$  см) имеют достаточный для радиолокационного обнаружения контраст только при малых скоростях ветра (порядка 5 м/с) и углах зондирования  $\theta > 10^\circ$ .

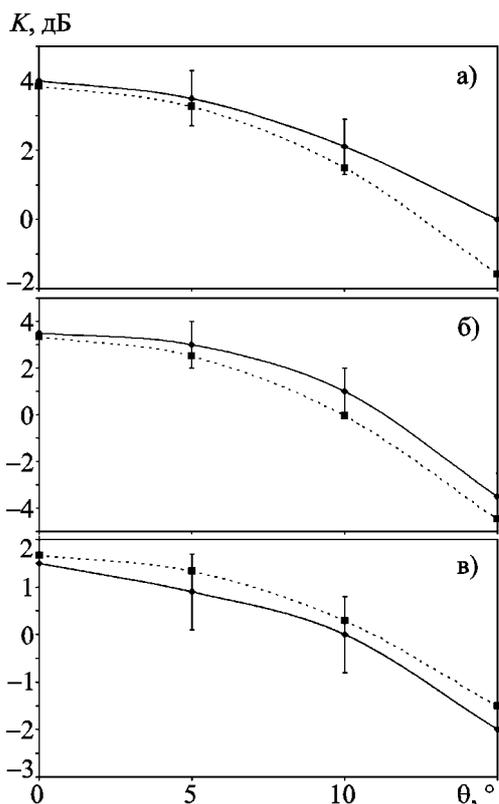


**Рис. 2.** Теоретические зависимости радиолокационного контраста  $K$  от угла падения  $\theta$  радиоволн  $\lambda_{E1} = 3$  см и  $\lambda_{E2} = 5.66$  см при различных толщинах  $h$  и активностях  $p$  нефтяной пленки для скоростей ветра  $W = 5$  м/с (—•—),  $W = 10$  м/с (---■---), и  $W = 15$  м/с (---▲---): а), г) —  $h = 0.001$  см,  $p = 0.3$ ; б), д) —  $h = 0.01$  см,  $p = 0.3$ ; в), е) —  $h = 0.1$  см,  $p = 0.724$

Наличие на морской поверхности толстых пленок,  $h \geq 0.1$  см, при нулевом угле зондирования характеризуется положительными значениями контраста  $K = 6 \div 9$  дБ и увеличивающимися с ростом угла зондирования отрицательными значениями. Такие значения контрастов превышают экспериментальные, полученные по результатам скаттерометрического зондирования [12] (см. рис. 3). Кроме того, оценки контрастно-фоновой чувствительности [24] для рассматриваемых радиолокационных систем показали, что минимальный контраст между загрязненным и чистым участками морской поверхности с 3 %-й ошибкой различения этих участков составляет  $\sim 1$  дБ, что значительно меньше ожидаемых значений. Сравнение угловых зависимостей радиолокационных контрастов морского волнения под толстой

пленкой нефти указывает также и на возможность диагностики сорта нефти (по изменению контрастов) при зондировании на различных длинах волн.

Возможность диагностики нефтяных загрязнений морской поверхности при квазивертикальном зондировании демонстрирует рис. 3. На нем приведены результаты аппроксимации экспериментальных данных, полученных на длине радиоволны  $\lambda_{E1} = 3$  см для каспийского сорта нефти (рис. 3, а) [25] и мексиканских сортов “La Rosa” и “Murban” [12] (рис. 3, б, в), теоретическими угловыми зависимостями контрастов (1.1). Отметим, что в указанных экспериментальных работах толщина пленки  $h$  и активность  $p$  не измерялись, а скорость ветра  $W$  указывалась без уточнения высоты  $H$  точки ее измерения над уровнем моря. Поэто-



**Рис. 3.** Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей радиолокационного контраста  $K$  от угла падения  $\theta$  радиоволны  $\lambda_{E1} = 3$  см: а) – теоретические данные при  $h = 0.04$  см,  $p = 0.35$ ,  $W = 14$  м/с (—•—) и экспериментальные данные [25] (·····); б) – теоретические данные при  $h = 0.015$  см,  $p = 0.5$ ,  $W = 9$  м/с (—•—) и экспериментальные данные [12] (·····); в) – теоретические данные при  $h = 0.001$  см,  $p = 0.3$ ,  $W = 9$  м/с (—•—) и экспериментальные данные [12] (·····)

му аппроксимация экспериментальных угловых зависимостей (их величины, наклона и кривизны) проводилась посредством вариации трех теоретических переменных:  $h$ ,  $p$  и  $W$ . При этом  $h$  и  $p$  выбирались из диапазона значений, известных из ранее проведенных радиолокационных [6] и радиометрических [22] измерений. Диапазон расчетных значений скорости ветра  $W$  определялся по скоростям, приведенным в анализируемых экспериментальных работах, путем их пересчета на стандартные высоты  $H = 10, 12.5, 19.5$  м [26].

Из рис. 3, а видно, что для каспийского сорта нефти теоретические контрасты хорошо описывают эксперимент при толщине пленки  $h = 0.04$  см и активности  $p = 0.35$ . При плотности нефти  $\rho = 0.8$  г/см<sup>3</sup> поверхностная плотность разлитой нефти составляет 320 т/км<sup>2</sup>. Для нефти “Murban” (рис. 3, б) экспериментальная кривая аппроксимируется теоретической зависимостью для пленки толщиной  $h = 0.015$  см и активностью  $p = 0.5$ , а для нефти “La Rosa” –  $h = 0.001$  см и  $p = 0.3$  (рис. 3, в). При этом поверхностная плотность разлитой нефти соответственно составляет 120 т/км<sup>2</sup> и 10 т/км<sup>2</sup>.

#### 4. Выводы

В работе изучены особенности квазивертикального радиолокационного зондирования морской поверхности загрязненной пленками ПАВ конечной гидродинамической толщины. Показано, что этот метод зондирования позволяет уверенно обнаруживать свежеразлитые “толстые” нефтяные пленки, что может быть использовано для обнаружения и диагностики аварийных разливов нефти.

#### 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. Радиолокационные методы исследования Земли / Ю. А. Мельник, С. Г. Зубкович, В. Д. Степаненко и др. / Под ред. Ю. А. Мельника. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
4. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Пичугин А. П., Назиров М., Спиридонов Ю. Г. и др. / Под ред. Л. М. Митника, С.В. Викторова. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 200 с.
5. 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.
6. 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.
7. Alvarado U. R., Tomiyasu K., Gulatsy R. L. Assessment of space sensor for ocean pollution monitoring // Collect. tech. pap. AIAA Sens. Syst. 80's Conf. – Colorado Springs (USA). – 1980. – P. 61-64.
8. 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.
9. Pilon R. O., Purves C. G. Radar Imagery of Oil Slicks // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. – 1973. – Vol. AES-9, No. 5. – P. 630-636.
10. Иванов А. Ю. Нефтяные загрязнения моря на радиолокационных изображениях КА “Космос-1870” и “Алмаз-1” // Исследования Земли из космоса. – 1997. – №6. – С. 73-84.
11. Krishen K. Detection of Oil Spills Using a 13.3-GHz Radar Scatterometer // J. Geophys. Res. – 1973. – Vol. 78, No. 12. – P. 1952-1963.
12. Johnson J. W., Crosswell W. F. Characteristics of 13.9 GHz radar scattering from oil films on the sea surface // Radio Sci. – 1982. – Vol. 17, No. 3. – P. 611-617.
13. 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.
14. 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 Trans. Geoscience Rem. Sens. – 1986. – Vol. GE-24, No. 5. – P. 738-743.
15. Waggett P. W., Ward I. A. A Combined SAR and Scatterometer System // Proc. IGARSS'87 Symposium. – Ann Arbor (USA). – 1987. – P. 1507-1509.
16. 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.
17. 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.
18. Боев А. Г., Ясницкая Н. Н. Гашение морского волнения пленкой поверхностно-активного вещества конечной толщины // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 39, №1. – С. 132-141.
19. Добрянский А. Ф. Химия нефти. – М.: Гостехиздат, 1961. – 211 с.
20. Караев В. Ю., Баландина Г. Н., Ангелов М. К. Об особенностях описания волнения применительно к решению задач дистанционного зондирования морской поверхности: Препр. / Российская АН. Ин-т прикладной физики; №470. – Нижний Новгород: 1998. – 30 с.
21. Переслегин С. В. Связь СВЧ-рассеяния от морской поверхности с пространственно-временными характеристиками развитого волнения // Физика атмосферы и океана. – 1975. – Т. 11, №5. – С. 481-490.
22. Sharkov E. A. Passive Microwave Remote Sensing. Physical Foundations. – Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd, 2003. – 611 p.
23. Cox C., Munk W. Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter // J. Opt. Soc. Am. – 1954. – Vol. 44, No. 11. – P. 838-850.
24. Лобыцын В. В., Ломоносов Ю. И., Переслегин С. В. Контрастно-фоновая чувствительность панорамных радио- и гидролокационных систем // Океанология. – 1986. – Т. XXVI, вып. 3. – С. 521-527.
25. 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. Rem. Sens. – 1982. – Vol. 3, No. 3. – P. 311-325.
26. Ламли Д. Л., Пановский Г. А. Структура атмосферной турбулентности: Пер. с англ. – М.: МИР, 1986. – 264 с.

**Квazівертикальне радіолокаційне зондування плівок поверхнево-активних речовин кінцевої товщини на морській поверхні**

**А. Г. Боев, О. Я. Матвеев**

Досліджено можливості виявлення та діагностики нафтових забруднень морської поверхні за даними двочастотного методу радіолокаційного квazівертикального зондування у сантиметровому діапазоні довжин хвиль. Наведено теоретичні залежності радіолокаційного контрасту морського хвилювання під нафтовою плівкою кінцевої товщини від швидкості приповерхневого вітру і кута зондування на довжинах хвиль 3 та 5.66 см. Показано перспективність методу для діагностики свіжорозлитої нафти. Оцінено параметри плівок різних типів нафти за величиною експериментально спостережуваними значеннями радіолокаційних контрастів.

## **Quasi-Vertical Radar Sensing of Finitely Thick Surfactant Films on the Sea Surface**

**A. G. Boev and O. Ya. Matvyeyev**

The possibilities to detect and diagnose sea surface oil pollution using a two-frequency radar method of quasi-vertical sensing at the X-band range are studied. Theoretical relations of sea roughness radar contrast at the 3 and 5.66 cm wavelengths under the finitely thick oil film are obtained vs. the sea surface wind speed and the incidence angle. Promising features of the technique for diagnosing freshly spilt oil are shown. The film parameters of different oil types are evaluated from the experimental radar contrasts.