

**А.Я. Матвеев, С.А. Величко,  
Д.М. Бычков, В.К. Иванов, В.Н. Цымбал,  
В.Б. Ефимов, А.С. Гавриленко**

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [ayamatweev2017@gmail.com](mailto:ayamatweev2017@gmail.com)

## **Особенности применения многочастотного и многоуглового радиолокационных методов для оценки параметров разливов нефти на морской поверхности**

*Предмет и цель работы* – сравнительный анализ измерительных возможностей многочастотного (МЧМ) и многоуглового (МУМ) радиолокационных методов дистанционного зондирования Земли для диагностики параметров морских аварийных разливов нефти. Исследуется применение методов к возможной реализации в космических и авиационных системах радиолокационного мониторинга океана.

*Методы и методология работы.* Использованы средства численного моделирования параметров уравнений модифицированной теории радиолокационного контраста морского волнения при наличии пленки поверхностно-активного вещества с учетом характеристик выбранной радиолокационной системы (частоты радиозондирования, диапазона рабочих углов зондирования), параметров нефтяной пленки и динамического диапазона измерения эффективной поверхности рассеяния. Выполнен анализ основных требований к параметрам аэрокосмических радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли.

*Результаты работы.* Получены величины ожидаемых радиолокационных контрастов загрязненной нефтью морской поверхности при оценках методами МУМ и МЧМ. Показано, что для количественного исследования динамики растекания нефтяного пятна по морю необходимо применение МУМ, а для получения оперативных данных о параметрах разлитой нефти может быть использован МЧМ. Приведены примеры измерительных возможностей методов и перечень действующих и перспективных аэрокосмических радиолокационных комплексов, данные которых пригодны для оценок параметров разливов нефти методами МЧМ и МУМ.

*Заключение.* Предлагаемые методы могут быть применены для действующих аэрокосмических систем, потенциальных многочастотных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой и их группировок. Сочетание МЧМ и МУМ позволит проводить обработку и анализ спутниковых данных мониторинга динамики разливов нефти. Ил. 6. Табл. 2. Библиогр.: 36 назв.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, многочастотный радиолокационный метод, многоугловой радиолокационный метод, диагностика морских аварийных разливов нефти.

Несмотря на повышенное внимание международной общественности к экологии окружающей среды, на поверхности океанов и морей все чаще наблюдаются случаи аварийных разливов нефти и нефтепродуктов из-за увеличения объемов добычи нефти на морских шельфах, аварий при ее морских перевозках и перекачке в береговые терминалы. Для своевременного об-

наружения, мониторинга и устранения результатов таких аварий в настоящее время наиболее часто используются всепогодные и независимые от освещенности морской поверхности одночастотный [1–4], многочастотный (МЧМ) [5–9] и многоугловой (МУМ) [10–16] методы аэрокосмического радиолокационного дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Повышение достоверности методов может быть достигнуто путем их комплексирования с оптическими, радиометрическими методами [1, 2], погодными данными и данными о состоянии морской поверхности [17–19].

В настоящее время создано и разрабатывается большое количество аэрокосмических комплексов, работающих в  $X$ -,  $C$ - и  $L$ -диапазонах длин радиоволн, но данные не всех из них могут быть использованы для оценок параметров нефтяных разливов с помощью методов МЧМ и МУМ.

В данной работе проведено исследование возможностей использования данных таких комплексов с целью получения достоверных оценок параметров разливов нефти многочастотным и многоугловым радиолокационными методами. Задачей этого исследования является моделирование на основании модифицированной теории радиолокационного контраста морского волнения при наличии пленки поверхностно-активного вещества (ПАВ) [20–22].

Напомним о сути МЧМ и МУМ методов аэрокосмического ДЗЗ.

**1. Описание методов.** Идея методов, предложенная в рамках модифицированной теории [20–22], заключается в определении толщины нефтяной пленки по результатам сравнения экспериментальных радиолокационных логарифмических контрастов (радиоконтрастов)  $D_{exp}$  с теоретическими радиоконтрастами  $D_{theor}$ :

$$D_{exp} = D_{theor},$$

$$D_{exp} = 10 \lg(W_{oil} / W_{sea}),$$

$$D_{theor}(k, h) = -10 \lg \frac{\omega_0(k)^2 \gamma_0(k)^2}{\omega_+(k)^2 \gamma(k)^2}, \quad (1)$$

$$\gamma = \gamma_L + \frac{kh}{2} Q(k),$$

$$Q(k) = S_1 + S_2 - S_3, \quad k = 2k_E \sin \theta.$$

Здесь  $W_{oil}$  и  $W_{sea}$  – мощности принятых радиосигналов от загрязненной нефтью и чистой морской поверхности);  $\omega_0 = \sqrt{gk + \alpha k^3 / \rho}$ ,  $\omega_+ = \sqrt{gk + (\alpha + \alpha_1)k^3 / \rho}$  – частоты поверхностных волн на чистой и покрытой пленкой морской поверхности;  $k, k_E$  – волновые числа морской и радиоволны;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\alpha$  и  $\alpha_1$  – коэффициенты поверх-

ностного натяжения на границах «вода–пленка» и «пленка–воздух»;  $\rho$  – плотность воды;  $\theta$  – угол падения радиоволны на морскую поверхность;  $\gamma_L$  – коэффициент затухания Левича [23]:

$$\gamma_L = \gamma_0 \times \left[ \frac{1 - \frac{\gamma_g}{\omega_+} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} + \frac{\gamma_S^2}{\omega_+^2} \left( \frac{\omega_+}{\gamma_0} \right) + \frac{1}{2} \frac{\gamma_S^2}{\omega_+^2} \left( \frac{\omega_+}{\gamma_0} \right)^{3/2}}{1 - 2 \frac{\gamma_S}{\omega_+} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} + \frac{\gamma_S^2}{\omega_+^2} \left( \frac{\omega_+}{\gamma_0} \right)} \right]; \quad (2)$$

$\gamma_0 = 2\nu k^2$  – коэффициент вязкого затухания поверхностной волны;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воды;  $\gamma_S = p\omega_{C1}^2 / \omega_0$  – силовой параметр, характеризующий влияние растяжения пленки на волну;  $p = (c_0 / \alpha_1) \times (d\alpha_1 / dc)$  – безразмерная поверхностная активность (упругость) пленки (в дальнейшем – активность),  $\omega_{C1} = \sqrt{\alpha_1 k^3 / \rho}$  – частота капиллярных поверхностных волн;  $c_0$  – невозмущенная концентрация пленки ПАВ. Величины  $S_1, S_2, S_3$  в формуле (1) определены в [22].

Из выражения (1) видно, что теоретический радиоконтраст  $D_{theor}$  зависит в общем случае от пяти основных параметров, характеризующих пленку: активности  $p$ , толщины  $h$ , поверхностного натяжения  $\alpha$ , вязкости нефти  $\nu$  и ее плотности  $\rho$ . В условиях мониторинга нефтяных загрязнений эти параметры могут меняться в зависимости от сорта нефти и различных условий (например, характеристик морской поверхности). Для определения перечисленных параметров необходимо знать хотя бы пять экспериментальных значений радиоконтраста  $D_{exp}$ , полученных по результатам зондирования на различных длинах волн  $\lambda_E = 2\pi / k_E$  или под разными углами  $\theta$ . Сравнение теоретических и экспериментальных значений контрастов позволяет составить пять уравнений для определения указанных параметров нефтяной пленки.

В случае разливов нефти параметры  $\alpha, \nu, \rho$ , как правило, известны (например, в случае аварии на буровой вышке или прибрежном терминале, при морских перевозках). Для определения остальных двух неизвестных параметров ( $p$  и  $h$ ) достаточно решить два уравнения,

содержащие равенства двух теоретических значений радиолокационных контрастов ( $D_{theor1}$ ,  $D_{theor2}$ ) и соответствующих экспериментальных значений радиоконтрастов загрязненной нефтью морской поверхности ( $D_{exp1}$ ,  $D_{exp2}$ ), измеренных в одной и той же точке поверхности на разных длинах волн  $\lambda_{E1}$  и  $\lambda_{E2}$  (МЧМ):

$$\begin{aligned} D_{theor1}(\lambda_{E1}, p, h) &= D_{exp1}(\lambda_{E1}, p, h), \\ D_{theor2}(\lambda_{E2}, p, h) &= D_{exp2}(\lambda_{E2}, p, h) \end{aligned} \quad (3)$$

или под разными углами  $\theta_1$  и  $\theta_2$  (МУМ):

$$\begin{aligned} D_{theor1}(\lambda_E(\theta_1), p_1, h_1) &= \\ = D_{exp1}(\lambda_E(\theta_1), p_1, h_1), \\ D_{theor2}(\lambda_E(\theta_2), p_2, h_2) &= \\ = D_{exp2}(\lambda_E(\theta_2), p_2, h_2). \end{aligned} \quad (4)$$

Из выражений (3), (4) видно, что оба метода определяют параметры  $p$  и  $h$  по результатам измерений в одной точке морской поверхности фактически на двух разных длинах поверхностных волн  $\lambda_{S1} = \lambda_{E1} / 2 \sin \theta$  и  $\lambda_{S2} = \lambda_{E2} / 2 \sin \theta$  или  $\lambda_{S1} = \lambda_E / 2 \sin \theta_1$  и  $\lambda_{S2} = \lambda_E / 2 \sin \theta_2$ .

Несмотря на необходимость непрерывного контроля динамики аварийных разливов, радиолокационные системы позволяют проводить только последовательную съемку загрязненной акватории, период повторения которой зависит от выбора объекта носителя (спутник или самолет). В случае использования МЧМ параметры нефтяной пленки определяются на момент съемки, а последующие съемки служат для контроля их изменения. При использовании МУМ оценка параметров пленки ведется по данным двух последовательных радиолокационных съемок и результатам моделирования растекания нефти в интервале между съемками. Сравнительные оценки возможностей МЧМ и МУМ, полученные путем численного моделирования параметров уравнений теории гашения морского волнения пленкой ПАВ конечной толщины с учетом выбранной радиолокационной станции (РЛС) (частот/частоты радиозондирования, диапазона рабочих углов зондирования поверхности, параметров нефтяной пленки и динамического диапазона измерения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР)) и анализа особенностей применения радиолокационных систем ДЗЗ при обработке

данных спутникового и авиационного мониторинга нефтяных разливов, приведены ниже.

**2. Анализ возможностей обработки радиолокационных данных методами МУМ и МЧМ на основе моделирования.** Как следует из выражений (1)–(4), методы МУМ и МЧМ позволяют определить ожидаемые величины теоретических радиоконтрастов  $D_{theor}$  в зависимости от параметров наблюдения, толщины пленки и ее физических характеристик. При этом экспериментальный радиоконтраст нефтяной пленки на морской поверхности определяется из (1) как

$$D_{exp} = \sigma_{oil}^0 - \sigma_{sea}^0,$$

где  $\sigma_{oil}^0$  и  $\sigma_{sea}^0$  – значения ЭПР (дБ) покрытой нефтью и чистой морской поверхности, зависящие в общем случае от скорости ветра  $V$ , его направления по отношению к направлению съемки  $\varphi$  (в случае авиационной съемки – к направлению синтезирования) и угла падения  $\theta$ .

Необходимо отметить, что с учетом характерных наблюдаемых размеров нефтяных пятен ( $\sim 50 \times 50$  км) время их съемки составляет 7...10 с при спутниковой съемке и 8...10 мин – при авиационной. За это время ветровые зависимости  $\sigma_{oil}^0$  и  $\sigma_{sea}^0$  в пределах исследуемой акватории можно считать одинаковыми. Это позволяет при учете траекторных нестабильностей движения носителя (самолета) исключить из последующих расчетов зависимость радиоконтраста от ветра.

Для оценки величин экспериментальных радиоконтрастов и их флуктуаций при наблюдении нефтяных разливов на поверхности моря обработаны данные РЛ-мониторинга, полученные радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА) *Envisat-1* по акватории Каспийского моря. На рис. 1 представлены характерные данные результатов наблюдения нефтяного пятна при углах падения порядка  $30^\circ$ . Обработка радиолокационных изображений (РЛИ) при наблюдении нефтяного пятна под углами  $20^\circ$  и  $40^\circ$  на последующих витках *Envisat-1* дала аналогичные результаты. Следует отметить, что минимальное значение радиоконтраста порядка  $-8$  дБ является предельно достижимым для измерения для РСА *Envisat-1* из-за предельного уровня шумов приемника [24] и типичных

уровнях ЭПР чистой морской поверхности для длины зондирующей радиоволны 5,6 см. Из рис. 1, б следует, что дисперсия радиоконтрастов в районе пятна составляет около 0,8 дБ. Полученные данные при использовании модельных расчетов служат основанием для выводов о максимально возможной измеряемой толщине нефтяной пленки и чувствительности методов МЧМ и МУМ.

Как отмечено в разд. 1, методом МЧМ измеряются экспериментальные радиоконтрасты, полученные для одних и тех же точек поверхности, но на разных длинах поверхностных резонансных волн, связанных с длинами соответствующих зондирующих радиоволн. При этом отношение длин резонансных волн составляет  $\delta = \lambda_{S1} / \lambda_{S2} = \lambda_{E1} / \lambda_{E2}$ . Так, для длин радиоволн 23 и 3 см – отношение  $\delta = 23/3 = 7,67$ , а для длин радиоволн 23 и 5,627 см – отношение  $\delta = 4,087$ .

При наблюдении точек поверхности под двумя разными углами  $\theta_1$  и  $\theta_2$  (метод МУМ) на одной зондирующей радиоволне отношение длин поверхностных резонансных волн определяется как  $\delta = \lambda_{S1} / \lambda_{S2} = \sin(\theta_2) / \sin(\theta_1)$ . В диапазоне углов падения  $\Delta\theta = 20...60^\circ$  это отношение составляет  $\delta = 2,53$ , т. е. для  $\lambda_E = 3,0$  см ( $X$ -диапазон длин радиоволн) длина поверхностной резонансной волны изменяется от  $\lambda_{S1} = 4,4$  см до  $\lambda_{S2} = 1,7$  см, для  $\lambda_E = 5,6$  см ( $C$ -диапазон длин радиоволн) это изменение составляет от  $\lambda_{S1} = 8,2$  см до  $\lambda_{S2} = 3,3$  см, а для  $\lambda_E = 23,0$  см ( $L$ -диапазон длин радиоволн) – от  $\lambda_{S1} = 33,6$  см до  $\lambda_{S2} = 13,3$  см.

По соотношению длин поверхностных волн видно, что чувствительность метода МЧМ должна быть выше. Однако сложная зависимость формул (1)–(4) от различных параметров не позволяет провести аналитическое исследование чувствительности методов МЧМ и МУМ к определению толщины пленки нефти, основываясь только на этих соотношениях. На рис. 2–3 приведены результаты численного моделирования (с использованием теории Боева [20–22]) зависимостей радиоконтраста от используемых длин радиоволн, углов зондирования и параметров нефтяной пленки. При моделировании использованы следующие параметры: плотность нефти  $\rho_1 = 0,9$  г/см<sup>3</sup>, плотность воды  $\rho_2 = 1,0$  г/см<sup>3</sup>, коэффициент поверх-

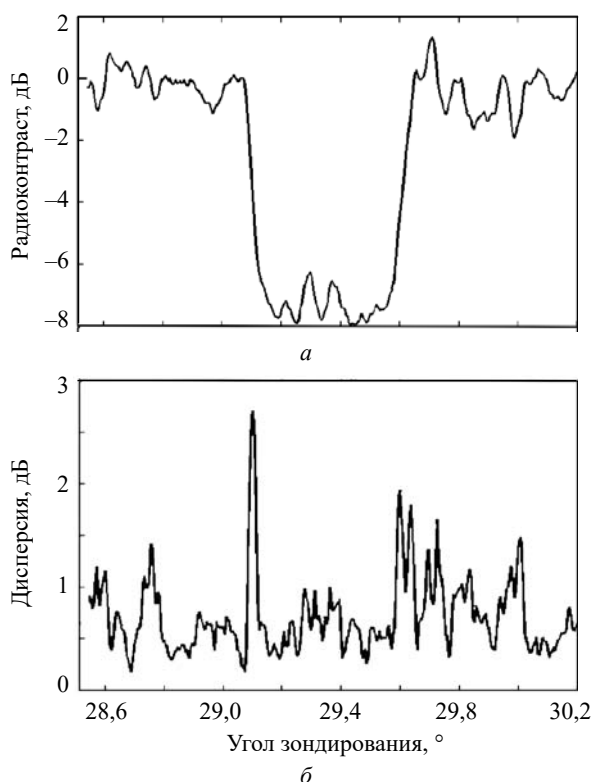
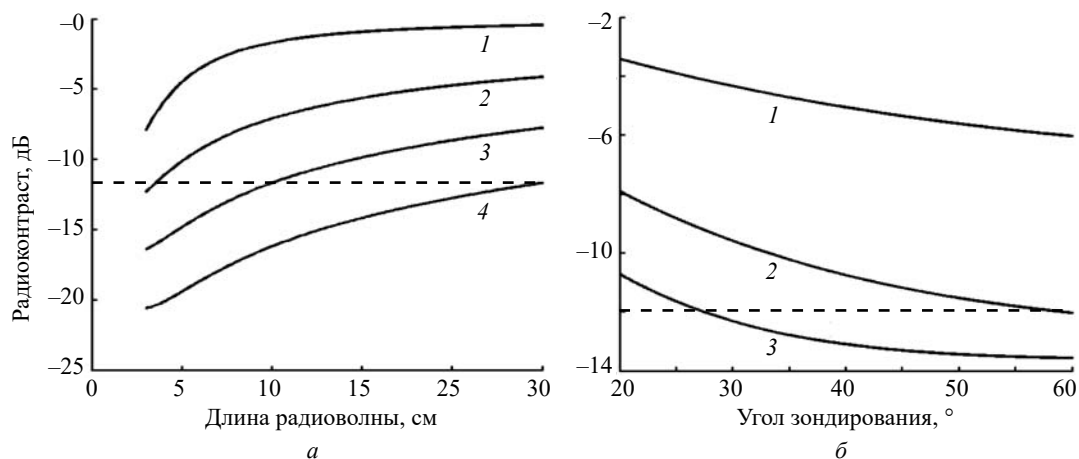


Рис. 1. Характерные экспериментальные значения среднего (а) и дисперсии (б) радиоконтраста вдоль строки РЛИ Envisat-1

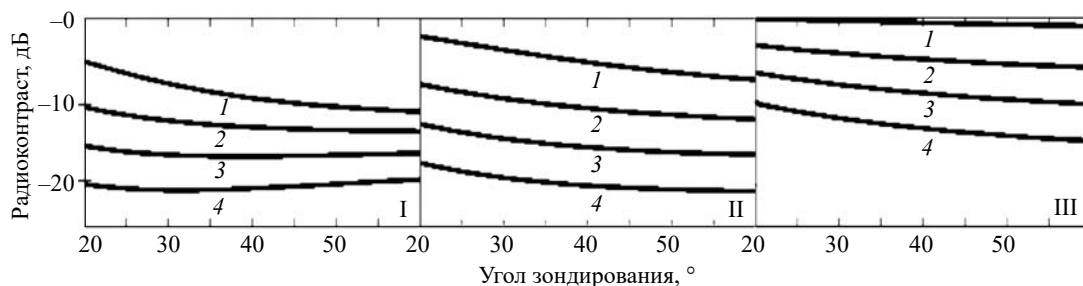
ностного натяжения нефти  $\alpha_1 = 30$  дин/см, коэффициент поверхностного натяжения воды  $\alpha_2 = 72$  дин/см, коэффициент кинематической вязкости нефти  $\nu_1 = 0,2$  см<sup>2</sup>/с, коэффициент кинематической вязкости воды  $\nu_2 = 0,01$  см<sup>2</sup>/с, активность нефтяной пленки  $p = 0,1$ .

На рис. 2, а представлены зависимости радиоконтраста от длины радиоволны. Анализ частотных зависимостей радиоконтраста показывает, что мономолекулярная пленка ( $h = 0$ ) может обнаруживаться при использовании радиоволн короче 10 см, так как для радиоволны длиной 23 см радиоконтраст уже достаточно мал (меньше 2 дБ по абсолютной величине). При этом для мономолекулярной пленки модель расчета радиоконтраста сводится фактически к использованию формулы Левича [23]. Необходимо отметить, что полученные оценки могут отличаться для других параметров нефти.

С другой стороны, анализ частотно-угловых зависимостей радиоконтраста (рис. 2) показывает, что для измерения параметров пленок конечных толщин ( $h = 0,02...0,10$  см) бо-



**Рис. 2.** Зависимости радиоконтраста: *a* – от длины радиоволны облучения поверхности для пленок различной толщины (кривая 1 –  $h = 0$  см, кривая 2 –  $h = 0,02$  см, кривая 3 –  $h = 0,05$  см, кривая 4 –  $h = 0,1$  см); *б* – от угла зондирования для радиоволн различной длины в присутствии нефтяной пленки толщиной 0,02 см (кривая 1 – 23 см, кривая 2 – 5,6 см, кривая 3 – 3,0 см). Штриховыми линиями показан уровень шума приемника РСА

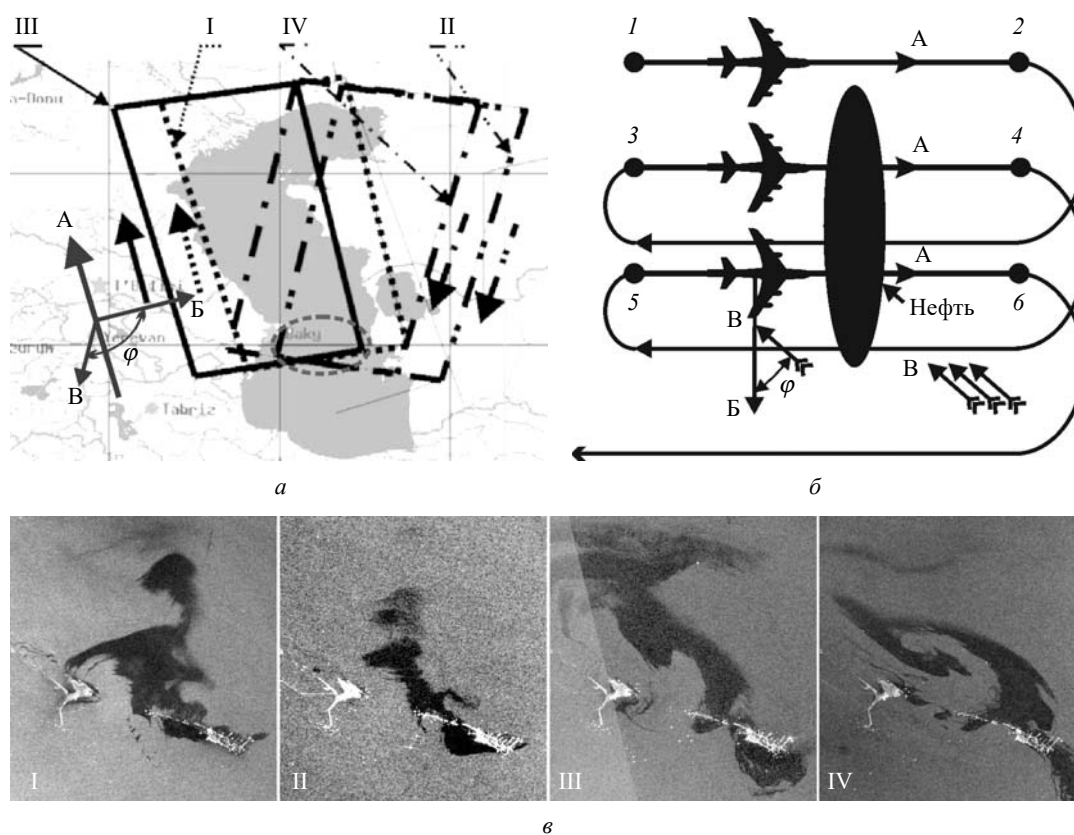


**Рис. 3.** Зависимость радиоконтраста от угла зондирования для различных толщин пленки (кривая 1 –  $h = 0$  см, кривая 2 –  $h = 0,02$  см, кривая 3 –  $h = 0,05$  см, кривая 4 –  $h = 0,1$  см) и длин зондирующих радиоволн (I – 3 см, II – 5,6 см, III – 23 см)

лее подходящим является набор длин радиоволн 5...20 см, так как для коротких радиоволн X-диапазона наблюдаемые радиоконтрасты должны оказаться вне динамического диапазона измерения ЭПР, зависящего от уровня шумов приемника, указанного выше (см. штриховые линии на рис. 2). В этом случае процесс мониторинга нефтяной пленки из режима измерения переходит в режим обнаружения. Ограничения для режима измерения справедливы для более толстых (активных) пленок и при длинах зондирующих радиоволн 5...10 см.

Для исследования возможностей применения метода МУМ на рис. 3 представлены данные моделирования зависимости теоретического радиоконтраста от угла падения для различных длин радиоволн и толщин пленки. Очевидно, что изменение радиоконтраста от угла падения для пленок толщиной 0,02...0,10 см в диапазоне углов 20...60° составляет 2,5 дБ для ра-

диоволны длиной 3,0 см, 4 дБ – для радиоволны 5,6 см и 2,5 дБ – для радиоволны 23 см. Причем данное изменение радиоконтраста по углу падения уменьшается с увеличением толщины пленки в X- и C-диапазонах и увеличивается в L-диапазоне. Из результатов исследования возможностей применения МУМ (рис. 3) можно сделать два промежуточных вывода. Первый – использование радиоволны 5,6 см (C-диапазон длин радиоволн) в методе МУМ должно позволять определять толщину пленки с максимально возможной точностью из рассмотренных диапазонов длин радиоволн. Второй – оценки изменения радиоконтрастов по углу зондирования показывают, что максимальный градиент последних составляет не более 0,1 дБ/град. Учитывая величины реальных флуктуаций радиоконтрастов (рис. 1, б), можно утверждать, что разброс по углу наблюдения в методе МУМ должен составлять не менее 8...10°.



**Рис. 4.** Примеры маршрутов радиолокационной съемки акватории месторождения Нефтяные Камни (отмечено эллипсом) в Каспийском море: *a* – спутниковая съемка радиолокатором *ASAR Envisat-1*; *б* – авиационная многочастотная съемка комплексом *МАРС* [26, 27]; *в* – фрагменты РЛИ (*ASA-WSM-1P*, © *ESA*), полученные по результатам съемки (рис. 1, *a*): I, II, III, IV – данные за 28.07.10 18:28:04, 29.07.10 06:36:28, 31.07.10 18:31:47, 01.08.10 06:42:10). А, Б, В – направления полета самолета, съемки и ветра, соответственно. 1–2, 3–4, 5–6 – отрезки траектории, на которых проводилась съемка

Таким образом, результаты моделирования применения методов МЧМ и МУМ показали следующее:

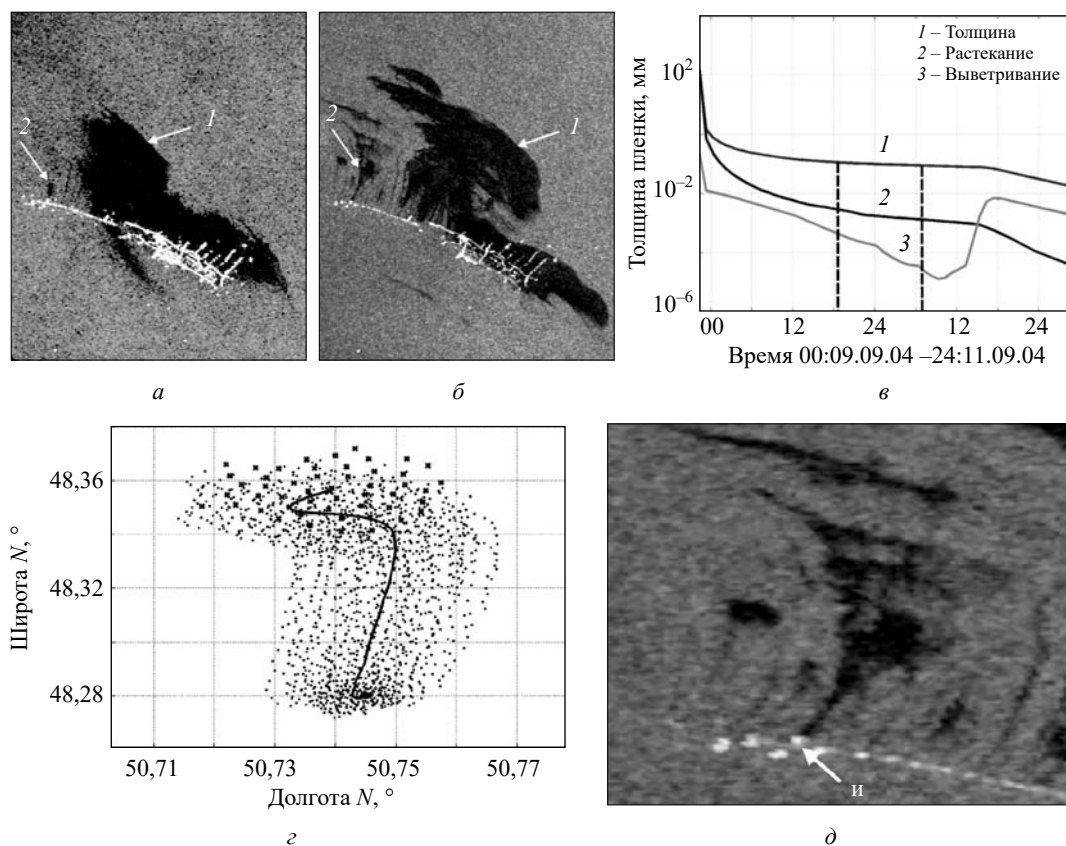
- использование *C*-диапазона длин радиоволн позволяет уверенно обнаруживать присутствие пленки, начиная с мономолекулярной (учитывая используемые на практике уровни шумов приемников космических *РСА*);
- сочетание измерений в *C*-диапазоне и *L*-диапазоне увеличивает эффективность метода МЧМ при измерении толщин нефтяной пленки до  $h = 1$  мм;
- метод МУМ позволяет измерять толщину нефтяной пленки в тех же пределах, но наблюдения желательнее производить с разницей углов зондирования не менее  $8...10^\circ$ .

**3. Особенности применения методов МЧМ и МУМ при спутниковом и авиационном мониторинге.** Учитывая важность оперативного обнаружения и организации работ по свое-

временной утилизации аварийно разлитой на морской поверхности токсичной нефти, как спутниковый, так и авиационный радиолокационный мониторинг должны обеспечивать как можно более частую съемку загрязненной акватории, что ускорит анализ полученной информации с помощью методов МЧМ и МУМ.

Спутниковый мониторинг способен обнаружить аварийные разливы на всей поверхности Мирового океана, но радиолокационная съемка ведется только по предварительным заказам. На некоторых спутниковых *РСА* предусмотрен режим непрерывной съемки и передачи данных на Землю (*Global Mode, Envisat-1*), но с низким разрешением ( $\sim 1$  км), что также может снизить эффективность обнаружения небольших нефтяных разливов.

Авиационный мониторинг обычно осуществляют в бассейнах морей, в которых наблюдается активное судоходство и/или ве-



**Рис. 5.** Анализ методом МУМ двух фрагментов РЛИ акватории месторождения Нефтяные Камни, полученных при съемке PCA *Envisat-1* (*ASA-WSM-1P*, разрешение 150 м (© ESA); *a* – РЛИ от 09.09.04, 18:35 UTC; *б* – РЛИ от 10.09.04, 06:46 UTC; *в* – моделирование изменения толщины малого нефтяного пятна (рис. 5, *a*, *б* стрелка 1) за время между съемками; *г* – совмещенные с координатной сеткой траектории перемещения центров масс частиц малого пятна при растекании (сплошная линия); *д* – фрагмент РЛИ малого пятна (*и* – источник предполагаемого разлива нефти)

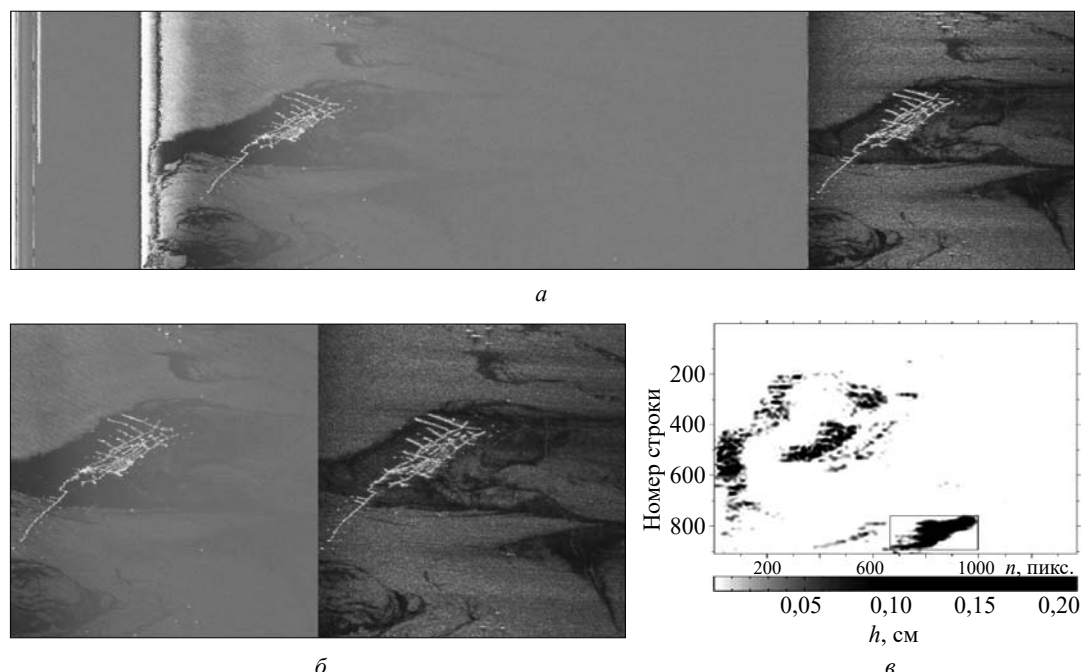
дется промышленная добыча нефти (например, Северное, Южно-Китайское, Каспийское моря). При наличии информации о разливе (например, с проходящих судов) самолетные комплексы способны вести оперативное информационное обслуживание мероприятий по ликвидации разливов и участвовать в их проведении, распыляя на загрязненной поверхности различные диспергенты и сорбенты [25].

Для повышения оперативности спутникового и авиационного мониторинга используются различные методы.

**Спутниковый мониторинг.** Одним из таких способов повышения оперативности спутникового мониторинга является увеличение частоты съемок путем использования последовательных съемок на восходящих и нисходящих витках искусственного спутника Земли (ИСЗ). В качестве примера на рис. 4, *a* показаны совмещенные с картой исследуемого района полосы радиолока-

ционных съемок в режиме *WSM* (ширина полосы 405 км), выполненных с помощью радиолокатора *ASAR Envisat-1* в районе месторождения Нефтяные Камни в Каспийском море. Видно, что повторение наблюдения одного и того же участка поверхности удастся обеспечить последовательной съемкой района аварийного разлива в режиме *WSM* на восходящих и нисходящих витках с интервалом 0,5...3 суток и более. К сожалению, спутниковые PCA с полосой обзора  $\leq 100$  км не в состоянии обеспечить мониторинг с такой частотой. Например, спутник *Sentinel-1* может обеспечить радиолокационную съемку аварийной акватории один раз в 12 суток.

На рис. 5 приведен пример анализа методом МУМ двух фрагментов РЛИ акватории месторождения Нефтяные Камни, полученных при съемке PCA *Envisat-1* на восходящем (рис. 5, *a*) и нисходящем (рис. 5, *б*) витках с разницей ~12 часов; вертикальные штриховые ли-



**Рис. 6.** Результаты обработки методом МЧМ радиолокационных изображений в см – (слева) и дм – диапазонах (справа) длин волн, полученных с помощью многочастотного авиационного комплекса МАРС [26, 27]: *а* – первичные изображения, *б* – изображения после предварительной обработки, *в* – карта распределения толщин нефтяной пленки по акватории месторождения Нефтяные Камни

нии (рис. 5, *в*) – время 1-й и 2-й съемки [13–16]. Основной разлив (большое пятно, рис. 5, *а*, *б* – стрелка *l*) происходит из центральной части бурового комплекса.

Проведение последовательных съемок на разных по направлению витках активно используется современными радиолокационными комплексами в комбинации с расширением полосы обзора, что достигается путем применения и объединения специальных широкополосных режимов съемки (табл. 1), а также изменением направления съемки (справа/слева). Интересным решением также является запуск на орбиту системы из трех спутников по канадской программе *RADARSAT Constellation Mission – RCM-1* (2016 г.) и *RCM-2, 3* (2017 г.). Спутники двигаются синхронно по параллельным орбитам на определенном расстоянии и управляются так, чтобы общая суммарная полоса их обзора (1800 км) была равна сумме полос каждого из них (600 км). В перспективе на орбиту планируется вывод еще трех аналогичных спутников, что увеличит суммарную полосу одновременного обзора земной поверхности до 3600 км. Использование данных таких широкополосных систем для оценок параметров

нефтяных разливов методом МУМ может значительно увеличить оперативность и достоверность космического мониторинга.

Из данных табл. 1 следует, что в настоящее время на орбите Земли работают только одночастотные системы, действующие в *X*-, *C*- и *L*-диапазонах длин радиоволн. Однако у членов Международной Хартии «Космос и крупные бедствия» [30] есть возможность организовать на время аварийных разливов съемки группами разночастотных спутников. Использование их данных при оценке таких разливов методами МЧМ и МУМ (по отдельности и в комбинации) может значительно повысить достоверность полученных данных.

*Авиационный мониторинг.* Авиационные радиолокационные комплексы позволяют получить оценку параметров нефтяных пятен, используя оба метода уже на борту самолета. Пример оценки параметров нефтяного разлива в акватории месторождения Нефтяные Камни в Каспийском море с помощью МЧМ по данным радиолокационной съемки в см- и дм-диапазонах длин волн авиационного комплекса МАРС [26, 27] показан на рис. 6, а методика съемки – на рис. 4.



Таблица 1. Перечень спутниковых РСА, данные которых могут быть использованы для оценки методами МЧМ и МУМ параметров нефтяных разливов на морской поверхности [28, 29]

Название КА	Оператор	Дата запуска	Высота орбиты, км	Рабочий диапазон	Ширина полосы обзора, км	Разрешение, м	Режим съемки	Съемка справа/слева
<i>SIR-CX-SAR</i>	<i>NASA/JPL, DARA/DLR, ASI</i>	1994	225	<i>X, C, L</i>	~90 200	~30	Стандартный Сканирование	+
<i>SRTM</i>	<i>NASA/NIMA DLR/ASI</i>	2000	233	<i>X C</i>	45 225	25 30	Синхронный Автономный	-
<i>EOS-SAR</i>	<i>NASA</i>	2000	824	<i>X, C, L</i>	100...200	50...100	Региональное картографирование	+
<i>RADARSAT-2</i>	<i>CSA, MDA</i>	2007	798	<i>C</i>	200...500	До 700	Глобальное картографирование	+
<i>TCX-SAR</i>	<i>Astrium</i>	2007	514,8	<i>X</i>	250...750 250...650 250...270	До 700	Сканирование	+
<i>RISAT-1</i>	<i>ISRO</i>	2012	536	<i>C</i>	2 × 622	25 × 28	Стандартный	+
<i>KOMPSTAT-5</i>	<i>KARI, TASI</i>	2013	550	<i>X</i>	2 × 622	25 × 28	Широкополосный	+
<i>ALOS-2</i>	<i>JAXA</i>	2014	628	<i>L</i>	2 × 622	100 × 100	Широкополосное сканирование	+
<i>RCM-1, 2, 3</i>	<i>CSA</i>	2016–2017	600	<i>C</i>	2 × 622	1...3	Высокое разрешение Низкое разрешение Экспериментальный	+
<i>NovaSAR-S</i>	<i>SSTL</i>	2016–2017	580	<i>S</i>	223	2...50	Высокое разрешение Сканирование	+
					185...490 (305) 490...675 (185)	3 20	Стандартный Широкополосный	+
					350	100	Сканирование	+
					500	5...50	Низкое разрешение	-
					750	30	Морской мониторинг	-

Одним из путей повышения оперативности получения информации авиационного мониторинга является проведение согласованных по времени подспутниковых измерений. Например, в рамках международной конвенции *MARPOL 73/78* об ограничении загрязнения органическими веществами акваторий морей и их побережья была создана система предупреждения в Балтийском море *Dornier DO228-212*, в состав которой входят космические РСА и несколько самолетных комплексов [5, 31]. На борту самолетов установлена многосенсорная система, состоящая из радиолокатора бокового обзора, микроволнового радиометра, ИК- и УФ-сканеров, лазера, кино- и фотокамеры. По данным из пунктов обработки космической информации РСА *ERS-2*, РСА *Envisat-1*, РСА *RADARSAT-2*, самолет вылетал в заданный район и проводил многосенсорную съемку. К сожалению, в комплексе *Dornier DO228-212* радиолокатор использовался только для обнаружения разливов, а многосенсорная съемка проводилась с высоты 300 м с малой полосой обзора. Это увеличивает время съемки и, соответственно, анализа параметров больших аварийных разливов. В 2004 году был реализован более современный вариант оперативной системы обнаружения морских нефтяных загрязнений в рамках проекта комплексного спутникового мониторинга юго-восточной части Балтийского моря [2]. Для его проведения

использовался ежедневный оперативный прием и анализ спутниковой информации РСА *Envisat-1*, РСА *RADARSAT-2*, *AVHRR NOAA*, *MODIS Terra/Aqua*, *NOPEX/Poseidon*, *Jason-1* о нефтяном загрязнении моря, температуре поверхности моря и др. Также создавалась карта прогноза дрейфа нефтяных пятен, обнаруженных на РЛИ.

Последний вариант оперативной системы обнаружения разливов нефти исключает авиационный мониторинг. Тем не менее, авиационные радиолокационные многочастотные комплексы дешевле в изготовлении и эксплуатации. На них могут отрабатываться новые методы анализа и совершенствования методик обнаружения и оценки загрязнений на поверхности моря. Данные, полученные в ходе проведения экспериментов, могут быть использованы для создания баз данных, облегчающих моделирование динамики поведения нефтяных пятен [32]. Наиболее перспективными из авиационных комплексов считаются созданные в последние годы беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [33, 34]. Они оснащены многосенсорными устройствами (включая РСА), могут проводить непрерывный радиомониторинг в течение 36 часов и более (с дозаправкой в воздухе) из стратосферы (с высоты 18...20 км) и создавать группировки из нескольких БПЛА для получения текущей информации о динамике развития нефтяного разлива. При этом, на-

Таблица 2. Перечень авиационных РСА, данные которых могут быть использованы для оценки нефтяных разливов методами МЧМ и МУМ [5, 33–36]

РСА (изготовитель), страна	Частоты (диапазон/ГГц)	Поляризация
<i>C/X SAR (CCRS)</i> , Канада	<i>C/5,3</i> ; <i>X/9,25</i>	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ * В или Г
<i>DO-SAR (EADS)</i> , Германия	<i>S/3,2</i> ; <i>C/5,3</i> ; <i>X/9,6</i> ; <i>Ka/35</i>	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ
<i>EMISAR (EMI/TUD)</i> , Дания	<i>C/5,3</i> ; <i>L/1,4</i>	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ
<i>E-SAR (DLR)</i> , Германия	<i>P/0,45</i> ; <i>L/1,3</i> ; <i>C/5,3</i> ; <i>X/9,6</i>	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ ВГ или ГГ ВВ или ГГ
<i>P-3/SAR (ERIM, Navy)</i> , США	<i>UWB/0,35</i> ; <i>L/1,25</i> ; <i>C/5,3</i> ; <i>X/9,35</i>	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ
<i>PI-SAR (CRL, NASDA)</i> , Япония	<i>L/1,27</i> ; <i>X/9,55</i>	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ
<i>RAMSES (ONERA)</i> , Франция	<i>L/1,6</i> ; <i>S/3,0</i> ; <i>C/6,2</i> ; <i>X/9,5</i> ; <i>Ku/14,5</i> ; <i>Ka/35</i> ; <i>W/95</i>	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ
<i>RQ-4 Global Hawk (Navy)</i> , США	<i>X</i>	ВВ, ГГ
БАС-62, Россия	<i>X</i>	ВВ, ГГ
<i>Shin Diao</i> , Китай	<i>X, L</i>	ВВ, ГГ

\* В – вертикальная поляризация, Г – горизонтальная поляризация.

пример, радиолокационные изображения американского БПЛА *RQ-4 Global Hawk* [33] обрабатываются на борту и оперативно передаются на наземную станцию по широкополосной линии связи в виде отдельных кадров (1900 кадров размером  $2 \times 2 \text{ км}^2$  с разрешением 0,3 м за 24 часа). Наземная станция собирает из кадров полные изображения и подготавливает их для дальнейшего использования. Китайский БПЛА *Shin Diao* [34] оборудован двумя РСА см- и дм-диапазонов длин радиоволн, что позволяет вести количественную оценку параметров нефтяных разливов методами МЧМ и МУМ. Российский БПЛА БАС-62 по своим летным характеристикам и техническому оснащению превосходит свои зарубежные аналоги [34]. В табл. 2 приведены наиболее известные в настоящий момент авиационные комплексы и БПЛА, способные использовать предложенные методы МЧМ и МУМ для диагностики нефтяных разливов, как по отдельности, так и в их комбинации.

**Выводы.** С использованием МЧМ и МУМ проведено численное моделирование параметров рассеяния радиоволн  $X$ -,  $C$ - и  $L$ -диапазонов морской поверхностью в присутствии нефтяной пленки. В расчетах применена модифицированная теория Боева определения радиоконтрастов при наблюдении гашения гравитационно-капиллярных волн пленкой ПАВ конечной толщины. Используются типичные параметры нефтяной пленки.

Анализ результатов моделирования показал, что для МЧМ наиболее эффективно применение сочетания  $C$ - и  $L$ -диапазонов, что позво-

ляет обнаруживать присутствие очень тонких (мономолекулярных) пленок и расширяет пределы измерения толщины пленки до  $h = 1 \text{ мм}$ . В случае применения МУМ определены ограничения на использование минимально допустимой разности в углах зондирования, которая должна составлять не менее  $8 \dots 10^\circ$ .

Проведено исследование особенностей применения МЧМ и МУМ при оценке данных спутникового и авиационного мониторинга. Приведены примеры результатов обработки радиолокационных изображений разливов нефти, полученных в результате применения обоих методов.

Сравнительный анализ параметров зондирования существующих космических и авиационных РСА показал, что первые позволяют проводить мониторинг нефтяных разливов в динамике при определенных требованиях к ширине полосы обзора и повторяемости съемки заданного района. Данные таких съемок позволят получить более точные оценки параметров нефтяных разливов при использовании МУМ. В случае создания временных группировок разночастотных спутников в рамках Международной Хартии «Космос и крупные бедствия» полученные с их помощью данные дают возможность получать более достоверные оценки комбинацией МУМ и МЧМ. Действующие авиационные системы с многочастотными системами РСА позволяют реализовать оперативную обработку данных РСА методом МЧМ прямо на борту самолета и обработку измерений параметров нефтяной пленки комбинацией методов МЧМ и МУМ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sandven S., Kudriavtsev V., Malinovsky V. Development of Marine Oil Spills/slicks Satellite Monitoring System Elements for the Black Sea, Caspian Sea and Kara/Barents Seas. *Proc. of the 2<sup>nd</sup> Workshop on Advances SAR Oceanography from Envisat and ERS Missions (SEASAR 2008)*. (Frascati, Italy, 21–25 Jan. 2008). Rome: ESA ESPRIN, 2008. Press 301.
2. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. *Комплексный спутниковый мониторинг морей России*. Москва: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
3. Gadimova S. Towards the Development of an Operational Strategy for Oil Spill Detection and Monitoring in the Caspian Sea Based upon a Technical Evaluation of Satellite SAR Observations in Southeast Asia. In: *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Amsterdam, 2000. Vol. XXXIII, Pt. B1. P. 295–300.
4. Иванов А.Ю., Достовалов М.Ю., Синева А.А. Определение параметров нефтяных загрязнений по данным космической поляризационной радиолокационной съемки в районе нефтепромыслов «Нефтяные Камни» в Каспийском море. *Исследование Земли из космоса*. 2011. № 5. С. 31–44.
5. Tufte L., Trieschmann O., Hunsänger T., Kranz S., Barjenbruch U. Using Air- and Spaceborne Remote Sensing Data for the Operational Oil Spill Monitoring of the German North Sea and Baltic Sea. XXth ISPRS Congr. Tech. Comm. VII. ISPRS Arch. Vol. XXXV, Pt. B7. (Istanbul, Turkey, 12–23 July 2004). Istanbul, 2004. P. 1006–1010. URL: <https://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm7/papers/193.pdf>

6. Boyev A.G., Karvitsky G.E., Matveyev A.Ya., Tsymbal V.N. Evaluation of Oil Film Parameters on the Sea Surface Using Multifrequency Radar Data. *Telecommunications and Radio Engineering*. 1997. Vol. 51, N 8. P. 4–12.
7. De Mario A., Ricci G., Tesauro M. On CFAR Detection of Oil Slicks on the Ocean Surface by a Multifrequency and/or multipolarization SAR. *Proc. 2001 IEEE Radar Conf. Atlanta, Georgia*, 1–3 May 2001. P. 351–355.
8. Боев А.Г., Ефимов В.Б., Цымбал В.Н., Яцевич С.Е., Калмыков И.А., Курекин А.С., Емельянов О.Л., Кавелин С.С., Салтыков Ю.Д., Куликовский О.Ю., Попель А.М., Матвеев А.Я., Евдокимов А.П., Крыжановский В.В., Бычков Д.М., Сытник О.В., Гавриленко А.С. *Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей*. Под ред. С.Н. Конохова, В.И. Драновского, В.Н. Цымбала. Киев: НАН Украины, 2007. 439 с.
9. Боев А.Г., Матвеев А.Я. Радиолокационный метод оценки параметров нефтяных загрязнений морской поверхности. *Исслед. Земли из космоса*. 2008. № 5. С. 29–36.
10. Боев А.Г., Кабанов А.В., Матвеев А.Я., Бычков Д.М., Цымбал В.Н. Спутниковая радиолокационная многоугловая диагностика нефтяных загрязнений морской поверхности. *9-я Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (14–18 ноября 2011, Москва, ИКИ РАН)*: тез. докл. Москва, 2011. С. 244.
11. Боев А.Г., Бычков Д.М., Матвеев А.Я., Цымбал В.Н. Спутниковая радиолокационная многоугловая диагностика нефтяных загрязнений морской поверхности. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. Под ред. Н.П. Лаврова, Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. Москва: ИКИ РАН, 2013. Т. 10, № 2. С. 166–172.
12. Матвеев А.Я., Боев А.Г., Бычков Д.М., Кубряков А.А., Станичный С.В., Цымбал В.Н., Шелиховский С.В. Апробация модели растекания нефти в задаче радиолокационной многоугловой диагностики загрязнений морской поверхности. *11-я Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (11–15 ноября 2013 г.)*: тез. докл. Москва: ИКИ РАН, 2013. С. 251.
13. Матвеев А.Я., Кубряков А.А., Боев А.Г., Бычков Д.М., Величко С.А., Иванов В.К., Станичный С.В., Цымбал В.Н. Валидация метода спутниковой радиолокационной многоугловой диагностики нефтяных загрязнений морской поверхности. *Радиофизика и электроника*. 2015. Т. 6(20), № 2. С. 20–31. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2015.02.020>.
14. Матвеев А.Я., Кубряков А.А., Боев А.Г., Бычков Д.М., Величко С.А., Иванов В.К., Станичный С.В., Цымбал В.Н. Моделирование растекания нефти в задаче радиолокационной многоугловой диагностики загрязнений морской поверхности. *Исследование Земли из космоса*. 2016. № 1–2. С. 213–224.
15. Matveyev A.Ya., Kubriakov A.A., Boyev A.G., Bychkov D.M., Velichko S.A., Ivanov V.K., Stanichny S.V. & Tsymbal V.N. Radar remote sensing multiangular satellite radar diagnostics of oil spills on the sea surface: validation of the method. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2016. Vol. 75, N 4. P. 313–331.
16. Matveyev A.Ya., Kubriakov A.A., Boyev A.G., Bychkov D.M., Ivanov V.K., Stanichny S.V. and Tsymbal V.N. Modeling of Oil Spreading in a Problem of Radar MultiAngle Diagnostics of Sea Surface Pollutions. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52, N 9. P. 940–950.
17. Satellite Altimetry Data AVISO. URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data.html>
18. Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., Chelton D.B., Casey K.S. and Schlax M.G. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *J. Climate*. 2007. Vol. 20, Iss. 22. P. 5473–5496.
19. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woolen J., Yang S.-K., Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. *NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2)*. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2002. Vol. 83, Iss. 11. P. 1631–1643.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Левич В.Г. *Физико-химическая гидродинамика*. Москва: ГИФМЛ, 1959. 669 с.
24. Envisat ASAR Brochure - DHI-GRAS [online]. Available from: [www.dhi-gras.com/~media/.../Envisat\\_asar\\_brochure.pdf](http://www.dhi-gras.com/~media/.../Envisat_asar_brochure.pdf)
25. Oil spill response field manual [online]: ExxonMobil. Available from: [https://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/energy-and-environment/oil-spill-response-field-manual\\_2014\\_e.pdf](https://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/energy-and-environment/oil-spill-response-field-manual_2014_e.pdf)
26. Белоброва М.В., Боев А.Г., Кабанов А.В., Матвеев А.Я., Цымбал В.Н. Оперативное картографирование и диагностика нефтяных загрязнений морской поверхности по данным многочастотного радиолокационного зондирования. *Космічна наука і технологія*. 2009. Т. 15, № 5. С. 24–33. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2009.05.024>.
27. Калмыков А.И., Цымбал В.Н., Курекин А.С., Ефимов В.Б., Матвеев А.Я., Гавриленко А.С., Иголкин В.В. Многоцелевой радиолокационный самолетный комплекс исследования Земли “МАРС”. *Радиофизика и радиоастрономия*. 1998. Т. 3, № 2. С. 119–129.
28. Satellite Missions Database [online]. Available from: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions>
29. Way J., Smith E.A. The Evolution of synthetic aperture radar system and their progression to the EOS SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1991. Vol. 29, Iss. 6. P. 962–985. DOI: <https://doi.org/10.1109/36.101374>.
30. Колесников С.Г., Шумейко В.Н. Роль Международной Хартии по космосу и стихийным бедствиям в обеспечении мониторинга чрезвычайных ситуаций. Научный центр оперативного мониторинга Земли ОАО «Российские космические системы». URL: [http://www.ntsomz.ru/files/kolesnikov%20s\\_15.11.2013.pdf](http://www.ntsomz.ru/files/kolesnikov%20s_15.11.2013.pdf)

31. Grüner K., Reuter R., Smid H. A New Sensor System for Airborne Measurements of Maritime Pollution and Hydrographic Parameters. *GeoJournal*. 1991. Vol. 24, Iss. 1. P. 103–107.
32. Бондур В., Цидилина М. Особенности формирования баз космических и подспутниковых данных при мониторинге антропогенных воздействий на экосистемы прибрежных акваторий. *Proc. 31<sup>st</sup> Int. Symp. Remote Sensing of Environment*. 20–24 June 2005. Saint Petersburg, Russian Federation. URL: [http://www.aerocosmos.info/pdf/bondur%20\\_sidilina.pdf](http://www.aerocosmos.info/pdf/bondur%20_sidilina.pdf)
33. Википедия. RQ-4 Global Hawk. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/RQ-4\\_Global\\_Hawk](https://ru.wikipedia.org/wiki/RQ-4_Global_Hawk)
34. Валагин А. Российский беспилотник делает самолеты-невидимки бесполезными. *Русское оружие*. 2015.08.31. URL: <https://rg.ru/2015/08/31/bla-site.html>
35. Keydel W. Present and Future Airborne and Space-borne Systems. *Part of Nato-PTO-Lecture on "Radar Polarimetry and Interometry"*, RTO-EN-SET-081bis-PP, presented on 21 to 22 March, 2006, Warsaw, Poland. P. 1–22.
36. Pilon R.O., Purves C.G. Radar imagery of oil slicks. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 1973. Vol. 9, N 5. P. 630–636.

Стаття надійшла 21.02.2018

## REFERENCES

1. Sandven, S., Kudriavtsev, V., Malinovsky, V., 2008. Development of Marine Oil Spills/slicks Satellite Monitoring System Elements for the Black Sea, Caspian Sea and Kara/Barents Seas. In: *Proc. of the 2<sup>nd</sup> Workshop on Advances SAR Oceanography from Envisat and ERS Missions (SEASAR 2008)*. Frascati, Italy, 21–25 Jan. 2008. Rome: ESA ESPRIN. Press\_301.
2. Lavrova, O.Yu., Kostianoy, A.G., Lebedev, S.A., 2011. *Comprehensive satellite monitoring of Russia seas*. Moscow: IKI RAN Publ. (in Russian).
3. Gadimova, S., 2000. Towards the Development of an Operational Strategy for Oil Spill Detection and Monitoring in the Caspian Sea Based upon a Technical Evaluation of Satellite SAR Observations in Southeast Asia. In: *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Amsterdam. XXXIII(Pt. B1), pp. 295–300.
4. Ivanov, A.Yu., Dostovalov, M.Yu., Sineva, A.A., 2012. Characterization of oil pollution around the oil rocks production site in the Caspian Sea using spaceborne polarimetric SAR imagery. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **48**(9), pp. 1014–1026 (in Russian).
5. Tufte, L., Trieschmann, O., Hunsänger, S., Kranz, S., Barjenbruch, U., 2004. Using Air- and Spaceborne Remote Sensing Data for the Operational Oil Spill Monitoring of the German North Sea and Baltic Sea. In: XXth ISPRS Congr. Tech. Comm. VII ISPRS Arch. XXXV(B7). Istanbul, Turkey, 12–23 July 2004, pp. 1006–1010. Available at: <https://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm7/papers/193.pdf>.
6. Boyev, A.G., Karvitsky, G.E., Matveyev, A.Ya., 1997. Evaluation of Oil Film Parameters on the Sea Surface Using Multifrequency Radar Data. *Telecommunications and Radio Engineering*, **51**(8), pp. 4–12.
7. De Mario, A., Ricci, G., Tesaurò, M., 2001. On CFAR Detection of Oil Slicks on the Ocean Surface by a Multifrequency and/or multipolarization SAR. In: *Proc. of the 2001 IEEE Radar Conf. Atlanta, Georgia*, 1–3 May 2001, pp. 351–355.
8. Boev, A.G., Efimov, V.B., Tsymbal, V.N. ed., Yatsevich, S.Ye., Kalmykov, I.A., Kurekin, A.S., Yemelyanov, O.L., Kavelin, S.S., Saltykov, Yu.D., Kulikovskiy, O.Yu., Popel, A.M., Matveyev, A.Ya., Yevdokimov, A.P., Kryzhanovskiy, V.V., Bychkov, D.M., Sytnik, O.V., Gavrilenko, A.S., Konjukhov, S.N. ed., Dranovskii, V.I. ed., 2007. *Radar methods and facilities for operational Earth remote sensing from airborne and spaceborne carriers*. Kiev, NAS of Ukraine Publ. (in Russian).
9. Boev, A.G., Matveev, A.Ya., 2008. Radar method for oil pollutions on the sea surface parameters estimation. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, **5**, pp. 29–36 (in Russian).
10. Boev, A.G., Matveev, A.Ya., Bychkov, D.M., Tsymbal, V.N., 2011. Satellite radar multiangle diagnostics of oil pollutions on sea surface. In: *9<sup>th</sup> All-Russian Open Annual Conf. "Modern problems of Earth remote sensing from space"*: proc. 14–18 Nov. 2011, Moscow, IKI RAN, p. 244 (in Russian).
11. Boev, A.G., Bychkov, D.M., Matveev, A.Ya., Tsymbal, V.V., Laverov N.P. ed., Lupjan, E.A. ed., Lavrova, O.Yu. ed., 2013. Radar satellite multi-angle diagnostics of sea surface pollution. *Modern problems of Earth remote sensing from space*, **10**(2), pp. 166–172. Moscow, IKI RAN Publ. (in Russian).
12. Matveev, A.Ya., Boev, A.G., Bychkov, D.M., Kubryakov, A.A., Stanichny, C.V., Tsymbal, V.N., Chelikhovskiy, S.V., 2013. Examination of oil spreading model in the problem of radar multiangle diagnostic of sea surface pollutions. In: *11<sup>th</sup> All-Russian Open Annual Conference "Modern problems of Earth remote sensing from space"*: proc. Moscow, Russian Federation, 11–15 Nov. 2013. Moscow, IKI RAN (in Russian).
13. Matveev, A.Ya., Kubryakov, A.A., Boev, A.G., Bychkov, D.M., Velichko, S.A., Ivanov, V.K., Stanichny, S.V., Tsymbal, V.N., 2015. Validation of spaceborne radar multi-angle method for the sea surface oil pollutions diagnostics. *Radiofiz. Elektron.*, **6**(20)(2), pp. 20–31 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2015.02.020>.
14. Matveev, A.Ya., Kubryakov, A.A., Boev, A.G., Bychkov, D.M., Ivanov, V.K., Stanichny, S.V., Tsymbal, V.N., 2016. Testing of the Oil Drift Model Fots Using Radar Multiangle Diagnosis of the Sea Surface Pollution. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1–2, pp. 213–224 (in Russian).
15. Matveyev, A.Ya., Kubriakov, A.A., Boyev, A.G., Bychkov, D.M., Velichko, S.A., Ivanov, V.K., Stanichny, S.V. & Tsymbal, V.N., 2016. Radar remote sensing multiangular satellite radar diagnostics of oil spills on the sea surface: validation of the method. *Telecommunications and Radio Engineering*, **75**(4), pp. 313–331.
16. Matveyev, A.Ya., Kubryakov, A.A., Boyev, A.G., Bychkov, D.M., Ivanov, V.K., Stanichny, S.V. and Tsymbal, V.N., 2016. Modeling of Oil Spreading in a Problem of Radar MultiAngle Diagnostics of Sea Surface Pollutions. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **52**(9), pp. 940–950.

17. Satellite Altimetry Data AVISO [online]. Available at: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data.html>
18. Reynolds, R.W., Smith, T.M., Liu, C., Chelton, D.B., Casey, K.S. and Schlax, M.G., 2007. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *J. Climate*, **20** (22), pp. 5473–5496.
19. Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.-K., Hnilo, J.J., Fiorino, M., Potter, G.L., 2002. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**(11), pp. 1631–1643.
20. Boev, A.G., Karvitsky, G.E., 1997. On Theory of Radar Sea Contrast in presence of Surface-Active Film. *Radiophysika and radioastronomy*, **2**(3), pp. 281–291 (in Russian).
21. Boev, A.G., Yasnitskaya, N.N., 2002. Attenuation coefficient for surface waves under the surface-active substance film with finite hydrodynamic thickness. *Prykladna Hidromekhanika*, **4**(4), pp. 14–22 (in Russian).
22. Boev, A.G., Yasnitskaya, N.N., 2003. Sea-wave suppression by a finite-thickness film of a surface-active matter. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **39**(1), pp. 118–126 (in Russian).
23. Levich, V.G., 1959. *Physicochemical hydrodynamics*. Moscow: GIFML Publ. (in Russian).
24. Envisat ASAR Brochure - DHI-GRAS [online]. Available from: [www.dhi-gras.com/~media/.../Envisat\\_asar\\_brochure.pdf](http://www.dhi-gras.com/~media/.../Envisat_asar_brochure.pdf)
25. Oil spill response field manual [online]: ExxonMobil. Available from: [https://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/energy-and-environment/oil-spill-response-field-manual\\_2014\\_e.pdf](https://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/energy-and-environment/oil-spill-response-field-manual_2014_e.pdf)
26. Belobrova, M.V., Boev, A.G., Kabanov, A.V., Matveev, A.Ya., Tsybmal, V.N., 2009. On-line map-making and diagnostics of oil pollutions of the sea surface using multifrequency radar data. *Kosmichna nauka i tekhnologiya*, **15**(5), pp. 24–33 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2009.05.024>.
27. Kalmykov, A.I., Tsybmal, V.N., Kurekin, A.S., Yefimov, V.B., Matveyev, A. Ya., Gavrilenko, A.S., Igolkin, V.V., 1998. Multi-purpose airborne earth's remote sensing radar system "MARS". *Radio phys. radio astron.*, **3**(2), pp. 119–129 (in Russian).
28. Satellite Missions Database [online]. Available from: <https://earth.esa.int/web/portal/satellite-missions>
29. Way, J., Smith, E.A., 1991. The Evolution of synthetic aperture radar system and their progression to the EOS SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **29**(6), pp. 962–985. DOI: <https://doi.org/10.1109/36.101374>.
30. Kolesnikov, S.G., Shumeiko, V.N., 2013. The role of International Charter on Space and Major Disasters in providing emergency situations monitoring [online]. Research Center for Earth Operative Monitoring OAO "Russian space systems". Available at: [http://www.ntsomz.ru/files/kolesnikov%20s.\\_15.11.2013.pdf](http://www.ntsomz.ru/files/kolesnikov%20s._15.11.2013.pdf) (in Russian).
31. Grüner, K., Reuter, R., Smid, H., 1991. A New Sensor System for Airborne Measurements of Maritime Pollution and Hydrographic Parameters. *GeoJournal*, **24**(1), pp. 103–107.
32. Bondur, V., Tsidilina, M., 2005. Features of space and under-satellite databases formation for monitoring of anthropogenic effect on coastal zones ecosystems. In: *Proc. of 31<sup>st</sup> Int. Symp. Remote Sensing of Environment*, 20–24 June 2005. Saint Petersburg, Russian Federation. Available from: <http://www.aerocosmos.info/pdf/bondur%20sidilina.pdf> (in Russian).
33. Wikipedia. RQ-4 Global Hawk. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/RQ-4\\_Global\\_Hawk](https://ru.wikipedia.org/wiki/RQ-4_Global_Hawk) (in Russian).
34. Valagin, A., 2015. Russian drone will make stealth planes useless. *Russian weapons*. Available at: <https://rg.ru/2015/08/31/bla-site.html> (in Russian).
35. Keydel, W., 2006. Present and Future Airborne and Space-borne Systems. *Part of Nato-PTO-Lecture on "Radar Polarimetry and Interometry"*, RTO-EN-SET-081bis-PP, presented on 21 to 22 March, 2006, Warsaw, Poland, pp. 1–22.
36. Pilon, R.O., Purves, C.G., 1973. Radar imagery of oil slicks. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, **9**(5), pp. 630–636.

Received 21.02.2018

A.Ya. Matveev, S.A. Velichko, D.M. Bychkov,  
V.K. Ivanov, V.N. Tsybmal, V.B. Yefimov, A.S. Gavrilenko

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine  
12, Acad. Proskura st., Kharkov, 61085, Ukraine

MULTI-FREQUENCY AND MULTI-ANGLE RADAR METHODS  
APPLICATION PECULIARITIES FOR PARAMETERS ESTIMATION  
OF OIL POLLUTIONS ON SEA SURFACE

**Subject and purpose.** Comparative analysis of multi-frequency (MFM) and multi-angle (MAM) radar methods has to be carried out in order to evaluate their measurement capabilities for parameters diagnostic of emergency oil spill on sea surface. Methods applications are investigated in connection with possible uses in spaceborne and airborne radar systems for ocean monitoring.

**Methods and methodology.** The numerical simulation of modified theory of radar sea contrast in presence of surface-active film was used in the research. The simulation took into account the selected radar systems parameters, such as radio frequency, range of observation angles and radar cross-section measurement range, for monitoring of oil film with given physical properties. The analysis was provided in order to formulate applicable airborne and spaceborne radar systems parameters for the problem solution.

**Results.** Expected values of radar contrast for oil pollution presence are obtained, when both MFM and MAM estimating methods are applied. As shown, MAM method application is essential for oil spilling dynamics survey with oil film parameters determination. MFM method should be used for data operative retrieval of oil spill features. The examples are given that prove the methods measurement capabilities. Also, the list is provided for operating and prospective airborne and spaceborne radar systems, data of which could be used for oil spill parameters estimation by MFM and MAM methods.

**Conclusion.** Multi-frequency and multi-angle methods can be applied for both airborne and spaceborne systems in use, and for future multifrequency spaceborne synthetic-aperture radars. Moreover, MFM and MAM methods combination would allow to realize processing and analysis of integrated data provided by satellite systems group for emergency oil spills monitoring.

**Key words:** *remote sensing, multi-frequency and multi-angle radar methods, emergency oil spill parameters diagnostics.*

*О.Я. Матвеев, С.А. Величко, Д.М. Бычков,  
В.К. Иванов, В.М. Цимбал, В.Б. Єфімов, О.С. Гавриленко*

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України  
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

#### ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОЧАСТОТНОГО І БАГАТОКУТОВОГО РАДІОЛОКАЦІЙНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ РОЗЛИВІВ НАФТИ НА МОРСЬКІЙ ПОВЕРХНІ

**Предмет і мета роботи** – порівняльний аналіз вимірювальних можливостей багаточастотного (БЧМ) і багатокутового (БКМ) радіолокаційних методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для діагностики параметрів морських аварійних розливів нафти. Досліджується застосування методів до можливої реалізації у космічних і авіаційних системах радіолокаційного моніторингу океану.

**Методи і методологія роботи.** Використано засоби числового моделювання параметрів рівнянь модифікованої теорії радіолокаційного контрасту морського хвилювання за наявності плівки поверхнево-активної речовини (ПАР) з урахуванням характеристик обраної радіолокаційної системи (частоти радіозондування, діапазону робочих кутів зондування), параметрів нафтової плівки і динамічного діапазону вимірювання ефективної поверхні розсіяння. Виконано аналіз основних вимог до параметрів аерокосмічних радіолокаційних систем ДЗЗ.

**Результати роботи.** Отримано величини очікуваних радіолокаційних контрастів забрудненої нафтою морської поверхні при оцінюванні методами БКМ і БЧМ. Показано, що для кількісного дослідження динаміки розтікання нафтової плями по морській поверхні необхідне застосування БКМ, а для отримання оперативних даних про параметри розливої нафти може бути використаний БЧМ. Надано приклади вимірювальних можливостей методів і перелік діючих і перспективних аерокосмічних радіолокаційних комплексів, дані яких можуть бути придатні для оцінювання параметрів розливів нафти методами БЧМ і БКМ.

**Висновок.** Запропоновані методи можуть бути застосовані для діючих аерокосмічних систем, потенційних багаточастотних космічних РСА та їх угруповань. Посадження методів БЧМ і БКМ дозволить виконувати оброблення й аналіз супутникових даних моніторингу динаміки розливів нафти.

**Ключові слова:** *дистанційне зондування, багаточастотний радіолокаційний метод, багатокутовий радіолокаційний метод, діагностика морських аварійних розливів нафти.*