

УДК 621.396.06

**М. В. Белоброва<sup>1</sup>, А. Г. Боев<sup>2</sup>, А. В. Кабанов<sup>3</sup>, А. Я. Матвеев<sup>3</sup>, В. Н. Цымбал<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Інститут радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, Харків

<sup>2</sup> Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

<sup>3</sup> Центр радіофізичного зондування Землі ім. А. І. Калмикова Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Харків

## **ОПЕРАТИВНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ МНОГОЧАСТОТНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

*Описано реалізацію методу оперативного складання мап нафтових забруднень морської поверхні безпосередньо на борту літака при проведенні синхронної двохчастотної радіолокаційної зйомки. Розроблено алгоритми і програмне забезпечення для бортової обробки результатів зйомки, що дозволяють оперативно оцінювати товщину нафтової плівки у кожному пікселі зображення району, що досліджується, складати мапу розподілу товщин плівки по всьому зображенню і, за вказівкою оператора, оцінювати кількість нафти як на окремій ділянці, так і на всьому зображенні. Метод ґрунтується на порівнянні теоретичних і експериментальних радіолокаційних контрастів забрудненої нафтою морської поверхні. Він використаний для складання мапи розподілу товщини нафтової плівки в акваторії району видобування нафти «Нафтові Каміні» у Каспійському морі за результатами обробки двох радіолокаційних зображень (довжина хвиль  $\lambda_1 = 3$  см,  $\lambda_2 = 23$  см), отриманих за допомогою авіаційного багаточастотного радіолокаційного комплексу МАРС. Аналіз результатів картографування показав, що товщина нафтової плівки по акваторії змінювалася у межах 0.01–3 мм, а сумарна маса розлитої нафти сягала 44000 т. Аналіз дозволив виявити найбільш забруднені ділянки акваторії та оцінити на них кількість розлитої нафти.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время во всем мире интенсивно ведется разработка и запуск систем дистанционного зондирования Земли, которые ориентированы на широкое и эффективное практическое использование [16]. С учетом растущего количества катастрофических явлений природного и антропогенного происхождения (ураганы, наводнения, аварийные разливы нефти и проч.) [16, 24] приоритетным направлением является создание оперативных радиолокационных систем по предупреждению таких явлений. Их использование невозможно без разработки методов зондирования, обработки и интерпретации полученной информации, которая непосредственно связана с

особенностью рассеяния радиоволн различными видами земной поверхности.

Разработка дистанционных методов диагностики катастрофических явлений является многопараметрической задачей, для решения которой привлекаются данные различных систем зондирования (комплексные методы), данные синхронного зондирования на нескольких частотах (многочастотные методы) или поляризациях (многополяризационные методы).

Первые количественные оценки толщины нефтяных пленок на морской поверхности были получены комплексированием данных радиометрических и радиолокационных систем [19, 23]. При этом обнаружение нефтяных пятен и оценка их размеров осуществлялись радиолокатором, а измерение толщины пленки проводилось по радиометрическим данным. Поскольку оперативность такого комплексного метода за-

висит от погодных условий, то более перспективным является использование радиолокационных методов. Несмотря на достаточно давнее использование радиолокационных систем для обнаружения нефтяных загрязнений и их источников [1, 8, 11, 12, 14, 16, 17, 20, 21, 23], достоверные радиолокационные оценки толщины пленки и объемов разлитой нефти стали возможными только после создания многочастотного радиолокационного метода диагностики нефтяных загрязнений [3–7, 15, 16, 18] на основе теории гашения морской волны пленками ПАВ [3, 9, 10].

### МНОГочАСТОТНЫЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Суть метода заключается в сравнении теоретических и экспериментальных радиолокационных контрастов загрязненной нефтью морской поверхности, полученных по результатам синхронных измерений на двух длинах волн.

Величина экспериментального радиолокационного контраста  $D_E(k_E)$  определялась как

$$D_E(k_E) = 10 \lg \left\{ \frac{V_r^2 - V_N^2}{V_S^2 - V_N^2} \right\}, \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

где  $k_E$  — волновое число радиоволны,  $V_r = \sqrt{U_r^2 + U_n^2}$  — среднее квадратичное значение амплитуды сигнала, который принят от загрязненного участка морской поверхности,  $V_S = \sqrt{U_S^2 + U_n^2}$  — среднее квадратичное значение амплитуды сигнала, который принят от чистой морской поверхности,  $V_N = \sqrt{U_n^2}$  — среднее квадратичное значение амплитуды шумов приемника радиолокатора,  $U_r$ ,  $U_S$ ,  $U_n$  — амплитуды соответствующих сигналов на выходе блока обработки сигналов (БОС). Отметим, что использование величины радиолокационного контраста  $D_E(k_E)$  в качестве сравнительной характеристики рассеяния морской поверхности на различных частотах позволяет исключить из рассмотрения ряд важных переменных парамет-

ров (ветровая зависимость интенсивности рассеяния радиоволн морской поверхностью, стабильность параметров аппаратуры, различия в обработке информации РСА и РБО и др.)

Теоретические радиолокационные контрасты  $D_h(k, h)$  рассчитывались в рамках теории взаимодействия поверхностных волн с пленкой конечной толщины [9, 10]. Контраст  $D_h(k, h)$  морского волнения под пленкой ПАВ конечной толщины  $h$  записывается в виде

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

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

$$k = 2k_E \sin \theta.$$

Здесь  $\omega_0 = \sqrt{gk + \alpha k^3} / \rho$ ,  $\omega_+ = \sqrt{gk + (\alpha + \alpha_1)k^3} / \rho$  соответственно частоты поверхностных волн на чистой и покрытой пленкой морской поверхности,  $k$  — волновое число морской волны,  $g = 981 \text{ см/с}^2$ ,  $\alpha$  и  $\alpha_1$  — коэффициенты поверхностного натяжения на границе вода — пленка и пленка — воздух,  $\rho$  — плотность воды;  $\theta$  — угол падения радиоволны на морскую поверхность. В формулах (2) выражение

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

— коэффициент затухания Левича [13],  $\gamma_0 = 2\nu k^2$  — коэффициент вязкого затухания поверхностной волны,  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости воды,  $\omega_{C1} = \sqrt{\alpha_1 k^3} / \rho$  — частота капиллярных поверхностных волн,  $\gamma_S = p \omega_{C1}^2 / \omega_0$  — силовой параметр, характеризующий влияние растяжения пленки на волну,  $p = (c_0 / \alpha_1)(d\alpha_1 / dc)$  — безразмерная поверхностная активность (упругость) пленки (в дальнейшем активность),  $c_0$  — невозмущенная концентрация пленки ПАВ.

Величины  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  в формуле (2) определяются выражениями

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \frac{\gamma_g}{\omega_+} \left( 1 - \frac{\gamma_g}{\omega_+} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \right) \times \\
 &\times \left\{ \frac{\rho_1}{\rho} \left[ \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \left( \frac{\omega_+^2}{\omega_+^2} - 2 \frac{\gamma_s}{\omega_+} \right) - 2 \frac{\omega_+^2}{\omega_+^2} \frac{\gamma_g}{\gamma_{01}} \left( 1 - \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} \right) \right] - \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} \right\} \times \\
 &\times \left( 1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} + 2 \frac{\omega_+}{\gamma_0} \left( \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \right)^{-1} - \frac{\rho_1 \gamma_{01}}{\rho \omega_+}, \\
 S_2 &= \left( \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \times \\
 &\times \left[ 1 - \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} + 2 \frac{\gamma_s}{\omega_+} \frac{\omega_+^2}{\omega_+^2} \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} - \frac{\rho_1}{\rho} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\omega_+^2}{\omega_+^2} - 2 \frac{\gamma_s}{\omega_+} \right] \times \\
 &\times \left( 1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} + 2 \frac{\omega_+}{\gamma_0} \left( \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \right)^{-1}, \\
 S_3 &= \sqrt{\frac{v}{v_1}} \left( \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \left( 1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right) \times \\
 &\times \left[ -1 + 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} + 2 \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} \right] \times \\
 &\times \left[ \left( 1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 + 4 \frac{\omega_+}{\gamma_0} \left( \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \left( 1 - \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right) \right]^{-1}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь  $\gamma_g = (\rho_1/\rho)\gamma_s$ ,  $\gamma_{01} = 2v_1 k^2$  — коэффициент вязкого затухания поверхностной волны в нефти. В формулах (2)–(4) содержится пять параметров, характеризующих пленку: активность, толщина, поверхностное натяжение, вязкость нефти и ее плотность. При наличии достаточно большого массива экспериментальных данных принципиально возможно составить пять независимых уравнений, и решить их относительно всех этих параметров. Отметим, что в случае зондирования акватории, загрязненной нефтью с заранее известными вязкостью, поверхностным натяжением и плотностью, для определения остальных двух неизвестных параметров (активности  $p$  и толщины  $h$ ) достаточно составить и решить два уравнения с использованием данных эксперимента, например, на сантиметровых и дециметровых радиоволнах:

$$D_E(k_c) = D_0(k_c) + 20 \lg \left[ 1 + \frac{\gamma_0}{2\gamma_L} k_c h Q(k_c) \right], \tag{5}$$

$$D_E(k_d) = D_0(k_d) + 20 \lg \left[ 1 + \frac{\gamma_0}{2\gamma_L} k_d h Q(k_d) \right]. \tag{6}$$

Здесь  $k_c$  и  $k_d$  — волновые числа сантиметровых и дециметровых поверхностных волн, определяемые для одного и того же угла падения радиоволн  $\theta$ ,  $D_E(k_c)$ ,  $D_E(k_d)$  — соответствующие им экспериментальные значения радиолокационных контрастов,  $D_0(k_c)$ ,  $D_0(k_d)$  — теоретические значения контрастов из выражения (2) при  $h = 0$ .

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА

Необходимо подчеркнуть, что реализация такого метода должна выполняться под конкретный авиационный комплекс дистанционного зондирования с учетом технических возможностей самолета и характеристик радиолокационных систем.

Рассмотрим обобщенный вариант оперативного двух частотного метода, реализованного под авиационный многоцелевой радиолокационный комплекс МАРС [12, 16], на котором в 1989–1991 гг. в акватории каспийского нефтепромысла «Нефтяные Камни» проводилась апробация предложенного метода. Комплекс МАРС был установлен на борту самолета ИЛ-18Д. В его состав входили два радиолокатора бокового обзора с реальной апертурой антенн (РБО-08,  $\lambda = 0.8$  см и РБО-3,  $\lambda = 3$  см) и два радиолокатора с синтезированием апертуры (РСА-23,  $\lambda = 23$  см и РСА-180,  $\lambda = 180$  см).

Реализация метода была разделена на три этапа:

- получение и предварительная обработка экспериментальных данных;
- определение экспериментальных контрастов и расчет толщины нефтяной пленки;
- оценка площади нефтяного загрязнения и количества разлитой на морской поверхности нефти.

**Получение и предварительная обработка экспериментальных данных.** Как видно из выражения (1), для оценки радиолокационных контрастов  $D_E(k_E)$  загрязненных участков морской поверхности необходимо получить в цифровом виде их совмещенные см- и дм-изображения и опреде-

лить в полосе обзора изменение значений сигналов, отраженных от чистого моря, и шумов приемников. Кроме того, поскольку падающая на морскую поверхность под углом  $\theta$  радиоволна и поверхностная волна связаны соотношением  $k = 2k_E \sin \theta$ , для оценок толщин нефтяных пленок по формулам (5) и (6) необходимо определить значения углов  $\theta$  для каждого пикселя изображения в полосе обзора.

Для получения указанной информации была использована следующая апробированная методика съемки загрязненных участков морской поверхности. Сначала выполнялся поиск и обнаружение загрязненных нефтью участков, оценивались их размеры и возможный источник загрязнения, уточнялись режимы съемки. В перерывах между съемками или на разворотах самолета выполнялась внутренняя калибровка радиолокаторов (записывались уровень собственных шумов приемников, форма кривой временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) приемного тракта и др.). Затем выполнялась контрольная съемка в оптимальных режимах.

Самолет Ил-18Д обеспечивал радиолокационную съемку с высоты 7000—7500 м при скорости 400—500 км/ч. При этом выполнялись одновременное зондирование радиолокаторами РБО-3 и РСА-23 (поляризация вертикальная на прием и передачу сигналов) в полосе около 30 км и оперативная обработка в реальном времени принятой информации. Принятые радиосигналы см- и дм-диапазонов обрабатывались независимо, но синхронно, блоками обработки сигналов — БОС РБО-3 и БОС РСА-23. Обработанная с их помощью рабочая информация имеет вид набора строк радиолокационных изображений см-, дм-диапазонов. Первые 512 байт в каждой строке заняты служебной информацией. К ней относятся: служебные параметры записи данной информации, время и дата создания файла, место съемки, диапазон частот, высота и скорость полета, углы сноса, крена, тангажа и географические координаты самолета. Время обновления координат составляло 0.5—1 с и зависело от выбора режима работы приемника GPS. Данные о калибровке радиолокаторов записывались в информационной части строки

каждого из них. Во время съемок на самолете велся журнал наблюдений, в который вносились данные о состоянии атмосферы, морской поверхности (как по визуальными наблюдениям, так и по данным метеостанций, ближайших к району исследований), описание визуально наблюдаемых явлений и др.

На рис. 1, а показаны изображения, полученные по результатам контрольной съемки на выходах БОС РБО-3 и БОС РСА-23 комплекса МАРС (первичная информация) Те же изображения после предварительной обработки приведены на рис. 1, б. Видно, что первичное формирование информационной части строки изображения блоками БОС РБО-3 и БОС РСА-23 имеет свои особенности. Если БОС РБО-3 вел запись и обработку см-сигналов с момента запуска передатчика РБО-3, то запись и обработка дм-сигналов велась БОС РСА-23 с начальной задержкой (50—60 мкс), которая определялась высотой полета самолета и начальным углом обзора. При этом полоса обзора РСА-23 составляла около 30 км. Полное геометрическое совпадение см- и дм-изображений возможно только при движении самолета строго вдоль и против направления ветра. Это объясняется тем, что антенна РБО-3 жестко фиксирована вдоль фюзеляжа самолета и формирует см-изображение в перпендикулярном к нему направлении, а РСА-изображение формируется в направлении, которое перпендикулярно к линии полета самолета. При наличии бокового ветра эти направления не совпадают, в связи с чем возникают геометрические искажения см-изображения, которые корректируются с помощью стандартных графических редакторов. Наличие в изображениях ярких точек и линий, источниками которых являются нефтедобывающие вышки и эстакады между ними, дает возможность с высокой точностью совместить см- и дм-изображения.

Строки шумов приемников записывались на этапе подготовки контрольной съемки. Строки амплитуд сигналов  $V_S$ , соответствующие отражению от чистого моря, выделялись из изображения исследуемого участка. Оценка угла падения  $\theta_n$  для каждого пикселя строки файлов шу-

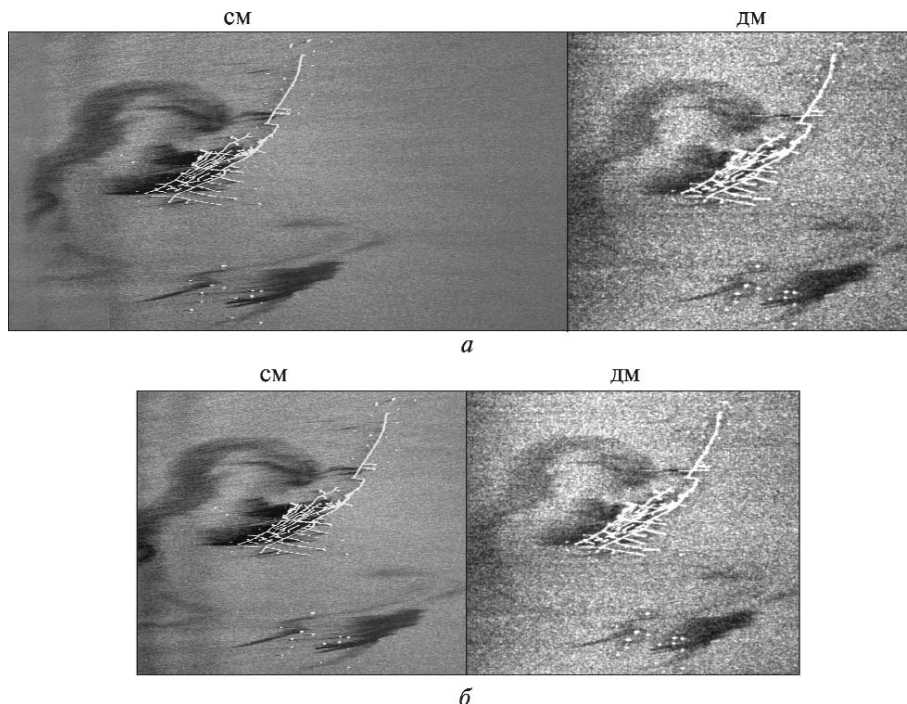


Рис. 1. Примеры см- и дм-изображений, полученных с помощью комплекса МАРС: а — первичные изображения, б — изображения после предварительной обработки

ма приемника, изображений загрязненного и чистого моря выполнялась по формуле

$$\theta_n = \arccos \left[ \frac{2H}{c(\tau_{\text{зад}} + An)} \right], \quad (7)$$

$$A = \frac{2(R_2 - R_1)}{cN}.$$

Здесь  $H$  — высота полета самолета,  $n$  — номер пикселя в строке обрабатываемого изображения ( $n = 1, 2, \dots, N$ ),  $\tau_{\text{зад}}$  — время, за которое излученный радиоимпульс, отразившись от начала полосы обзора исследуемой морской поверхности, поступит на вход приемника радиолокатора,  $R_1$  и  $R_2$  — расстояния от фазового центра приемо-передающей антенны радиолокатора до начала и конца полосы обзора морской поверхности, соответственно (наклонные дальности),  $c$  — скорость света.

**Определение экспериментальных контрастов и расчет толщины нефтяной пленки.** Анализируемые изображения (рис. 1) состоят из 922 строк (счет сверху вниз) длиной 1380 пкл. Чистому мо-

рю отвечает 40-я строка изображений. Строки шумов приемников вырезаются из калибровочных файлов, записанных перед контрольной съемкой. Строки пары изображений могут обрабатываться как последовательно с 1-й по 922-ю (для получения карты), так и выборочно (для получения оперативных данных по конкретному участку во время съемки). Все строки изображений и шума сглажены кубическими сплайнами [22].

Для расчетов использовались известные значения параметров нефти, добываемой на нефтепромысле «Нефтяные Камни» [6, 7, 10, 16]: коэффициенты поверхностного натяжения на границе раздела вода — нефть и воздух — нефть соответственно  $\alpha = 13$  дин/см и  $\alpha_1 = 60$  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; плотность воды  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>, плотность нефти —  $\rho_1 = 0.8$  г/см<sup>3</sup>. Расчеты неизвестных значений активности  $p$  и толщины  $h$  проводились по формулам (5) и (6). Блок-схема алгоритма решения задачи и построения карты распределения толщин пленки по акватории показана на рис. 2.

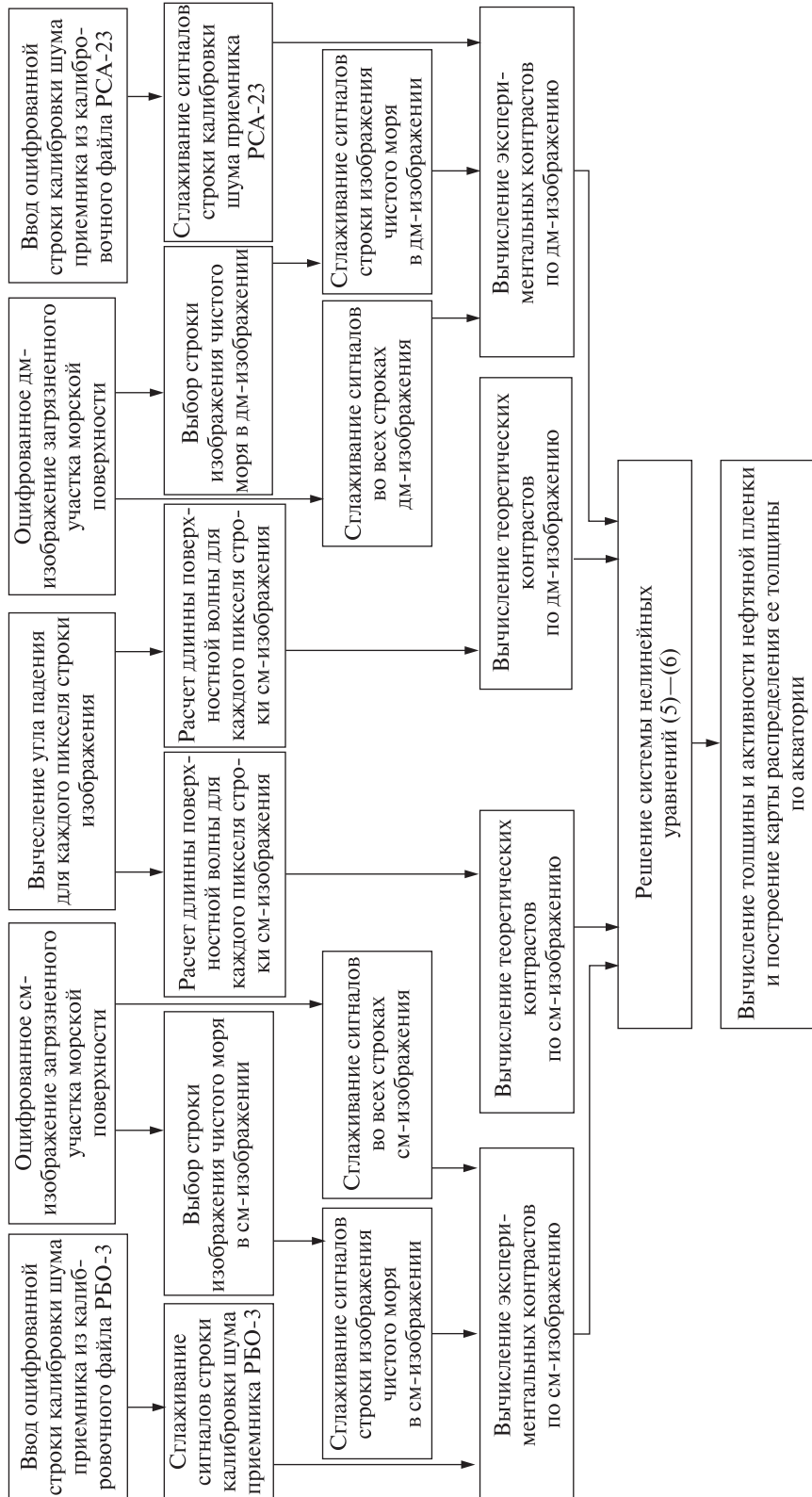


Рис. 2. Блок-схема построения карты распределения толщины нефтяной пленки

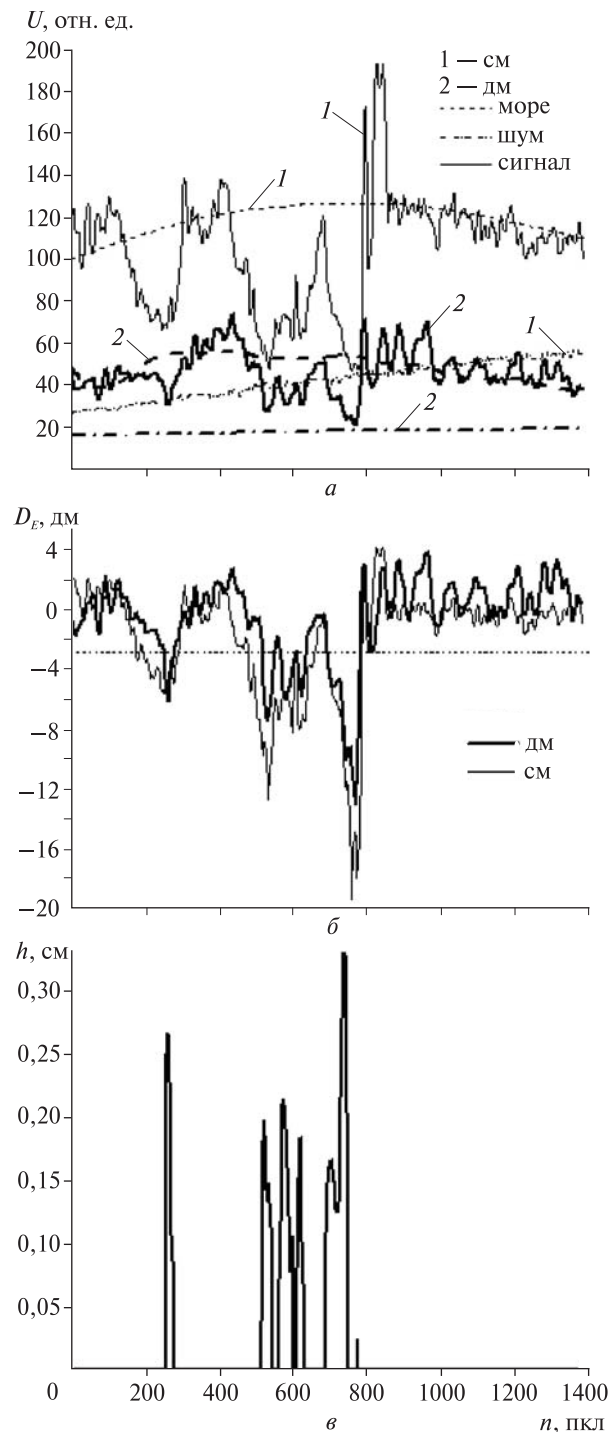


Рис. 3. Оценки параметров нефтяной пленки для 290-й строки см- и дм-изображений: а — сглаженные значения амплитуд отраженных от загрязненной и незагрязненной поверхности моря сигналов и шума, б — экспериментальные значения контрастов, в — значения толщины пленки

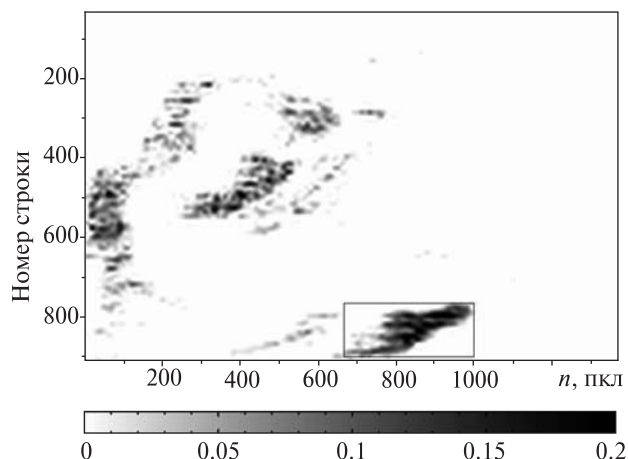


Рис. 4. Карта распределения толщин нефтяной пленки по акватории нефтедобывающего района «Нефтяные Камни» в Каспийском море

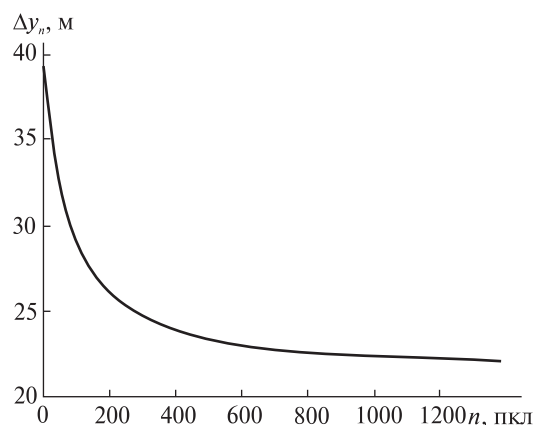


Рис. 5. Зависимость поперечного размера пикселя  $\Delta y_n$  его номера вдоль строки изображения

На рис. 3 приведен пример расчета толщины пленки для 290-й строки изображений. На рис. 3, а показаны сглаженные значения амплитуд отраженных от загрязненной и незагрязненной поверхности моря сигналов и шума приемника в строке РЛ-изображения. На рис. 3, б представлены экспериментальные значения контрастов. На рис. 3, в показаны значения толщины пленки, рассчитанные для экспериментальных контрастов, меньших  $-3$  дБ, — порога, определяемого условиями предварительной обработки сигналов. Видно, что большим по модулю значениям контрастов отвечают большие значения толщи-

ны нефтяной пленки. Карта распределения толщин нефтяной пленки по акватории месторождения показана на рис. 4. Квадратом выделен участок, для которого далее будет приведена оценка количества разлитой нефти.

**Оценка площади нефтяного загрязнения и количества разлитой на морской поверхности нефти** является конечным этапом мониторинга, после которого принимается решение о необходимости организации мероприятий по оперативному устранению опасных для окружающей среды разливов поверхностно-активных веществ. На основе карты толщин (рис. 4), которая дает информацию о толщине пленки в каждом пикселе изображения, площадь  $S_{nl}$  загрязненного участка и масса  $M$  разлитой нефти определялись по формулам

$$S_{nl} = \sum_{n=a}^b \sum_{l=c}^d (\Delta x \Delta y_n), \quad (8)$$

$$M = \sum_{n=a}^b \sum_{l=c}^d (\Delta x \Delta y_n) h_{nl} \rho. \quad (9)$$

Здесь  $\Delta x$  и  $\Delta y_n$  — геометрические проекции на горизонтальную плоскость размеров пикселя вдоль и поперек направления движения самолета соответственно,  $n$  — номер пикселя в строке изображения,  $l$  — номер строки,  $h_{nl}$  — толщина пленки нефти в выбранном пикселе,  $\rho$  — плотность нефти.

В комплексе МАРС блоки обработки сигналов РБО-3 и РСА-23 формируют на своих выходах строки изображения с частотой  $F = 0.25$  Гц. Поэтому при неизменной скорости самолета  $V$  во время съемки размер каждого пикселя вдоль направления полета одинаковый и равняется  $\Delta x = V \cdot F$ . Для использованной контрольной съемки  $\Delta x = 445 \text{ км/ч} \cdot 0.25 \text{ Гц} = 30.9 \text{ м}$ .

Размер пикселя  $\Delta y_n$  с учетом (7) составлял

$$\Delta y_n = R_{n+1} \sin \theta_{n+1} - R_n \sin \theta_n, \quad (10)$$

$$n = 1, 2, \dots, 1380,$$

где  $R_n, R_{n+1}$  — наклонные дальности до конца  $n$ -го и  $n+1$ -го пикселя строки изображения. Зависимость размера пикселя  $\Delta y_n$  от номера  $n$  для анализируемой пары изображений показана на рис. 5.

В соответствии с формулами (8)—(10) было разработано программное обеспечение для оценки объема и количества нефти по карте распределения толщины пленки. Расчеты показали, что масса нефти на поверхности в участке изображения, которая обозначена на рис. 4 черным прямоугольником, равняется 11509 т. Суммарная же масса нефти, разлитой на всей акватории, составила 43925 т. Ошибки определения количества нефти при данной аппаратурной реализации метода составляют 15—20 %. Точность измерений толщины нефтяной пленки [3—7, 15, 16, 18] подтверждается данными радиометрических измерений [23], проведенных в том же районе.

## ВЫВОДЫ

Описанный метод и его аппаратурная реализация обеспечивают возможность получения оперативной информации о количестве разлитой на морской поверхности нефти с ошибкой 15—20 %. Метод прошел апробацию на авиационном радиолокационном многочастотном комплексе МАРС. Результаты, полученные с помощью комплекса при зондировании акватории месторождения «Нефтяные Камни» в Каспийском море, подтверждены данными, полученными в том же районе радиометрическим методом. Разработанное программное обеспечение метода позволяет в реальном времени строить карты распределения толщин нефтяных загрязнений морской поверхности и получать количественные данные о массе разлитой нефти непосредственно во время полета. Предложенный метод может быть использован также и на других авиационных радиолокационных комплексах. Космическое применение метода также возможно при синхронном РЛ-зондировании с КА на различных длинах волн, например с КА RADARSAT-1,2 или ENVISAT ( $\lambda = 6 \text{ см}$ ) и КА Terra SAR-X или COSMO-SkyMed-1,2 ( $\lambda = 3 \text{ см}$ ) [[http://directory.eoportal.org/missions\\_all\\_list.php?&view\\_all](http://directory.eoportal.org/missions_all_list.php?&view_all)].

1. Белоброва М. В., Боев А. Г., Иванов В. К. и др. Результаты многочастотного радиолокационного монито-



- ринга неоднородностей волнения морской поверхности // *Космічна наука і технологія*. — 2002. — 8, № 2/3. — С. 275—278.
2. Боев А. Г., Карвицкий Г. Э. К теории радиолокационного контраста морского волнения при наличии пленки поверхностно-активного вещества // *Радиофизика и радиоастрономия*. — 1997. — 2, № 3. — С. 281—291.
3. 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. — 3, № 1. — С. 43—48.
4. Боев А. Г., Матвеев А. Я. Радиолокационная диагностика аварийного разлива нефти в акватории Каспийского нефтепромысла «Нефтяные Камни» // Третья открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 14—17 ноября, 2005, г. Москва. — М., 2005. — С. 157.
5. Боев А. Г., Матвеев А. Я. Радиолокационный мониторинг аварийного разлива нефти в акватории Каспийского нефтепромысла «Нефтяные Камни» // Международная научно-практическая конференция «Сучасні технології управління екологічною та інформаційною безпекою території», 5—9 сентября, 2005, п. Рыбачий, АР Крым. — С. 138—139.
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. — 10, № 2. — С. 178—188.
7. Боев А. Г., Матвеев А. Я. Радиолокационный метод оценки параметров нефтяных загрязнений морской поверхности // *Исслед. Земли из космоса*. — 2008. — № 5. — С. 29—36.
8. Боев А. Г., Матвеев А. Я., Цымбал В. Н. Опыт оперативного мониторинга загрязненной нефтепродуктами морской поверхности радиолокационными средствами ДЗЗ аэрокосмического базирования // *Матеріали регіональної наради «Можливості сучасних ГІС/ДЗЗ-технологій у сприянні вирішення проблем причорноморського регіону»*, 11—14 листопада 2003 р., Одеса, Україна. — Одеса, 2003. — С. 65—67.
9. Боев А. Г., Ясницкая Н. Н. Коэффициент затухания поверхностных волн под пленкой поверхностно-активного вещества конечной гидродинамической толщины // *Прикладна гідромеханіка*. — 2002. — 4, № 4. — С. 14—22.
10. Боев А. Г., Ясницкая Н. Н. Гашение морского волнения пленкой поверхностно-активного вещества конечной толщины // *Изв. РАН. ФАО*. — 2003. — 39, № 1. — С. 132—141.
11. Галаев Ю. М., Калмыков А. И., Курекин А. С. и др. Радиолокационные обнаружения нефтяных загрязнений морской поверхности // *Изв. АН СССР. ФАО*. — 1977. — 13, № 4. — С. 406—414.
12. Калмыков А. И., Цымбал В. Н., Курекин А. С. и др. Многоцелевой радиолокационный самолетный комплекс исследования Земли MAPC // *Радиофизика и Радиоастрономия*. — 1998. — 3, № 2. — С. 119—129.
13. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. — М.: ГИТТЛ, 1959. — 669 с.
14. Литовченко К. Ц., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. и др. Нефтяные загрязнения восточной части Черного моря: космический мониторинг и подспутниковая верификация // *Исслед. Земли из космоса*. — 2007. — № 1. — С. 81—94.
15. Матвеев А. Я., Боев А. Г. Радиолокационный метод оценки параметров нефтяных загрязнений морской поверхности // *Матеріали міжнародної наукової конференції «Достигнення в супутниковій океанографії: изучение и мониторинг окраинных морей Азии»*, 3—6 октября, 2007, Владивосток. — Владивосток, 2007. — Р. 83—85.
16. *Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей* / Под ред. С. Н. Конюхова, В. И. Драновского, В. Н. Цымбала. — К.: НАН Украины, 2007. — 439 с.
17. Belobrova M. V., Boev A. G., Ivanov V. K., et al. Experimental multifrequency investigations into the sea surface roughness inhomogeneities through the use of the MARS radar system // *Proc. 4-th European Conf. on Synthetic Aperture Radar, EUSAR 2002: 4—6 June 2002*. — Cologne (Germany). — VDE VERLAG GMBH \*Berlin\* Offenbach. — P. 733—736.
18. Boyev A. G., Karvitsky G. E., Matveyev A. Ya., Tsybmal V. N. Evaluation of oil film parameters on the sea surface using multifrequency radar data // *Telecommunications and Radio Engineering*. — 1997. — 51, N 8. — P. 4—12.
19. Grüner K., Reuter R., Smid H. A new sensor system for airborne measurements of maritime pollution and hydrographic parameters // *GeoJournal*. — 1991. — 24, N 1. — P. 103—117.
20. Krishen K. Detection of oil spills using a 13.3-GHz radar scatterometer // *J. Geophys. Res.* — 1973. — 78, N 12. — P. 1952—1963.
21. Pilon R. O., Purves C. G. Radar imagery of oil slicks // *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* — 1973. — AES-9, N 5. — P. 630—636.
22. Reinsh C. H. Smoothing by spline functions // *Numer. Math.* — 1967. — 10. — P. 177—183.
23. Sharkov E. A. Passive microwave remote sensing of the Earth. Physical foundations. — Chichester, UK, Praxis Publishing Ltd, 2003. — 611 p.
24. Vimont D. J., Kossin J. P. The atlantic meridional mode and hurricane activity // *Geophys. Res. Letters*. — 2007. — 34. — P. 1—5 (L07709, doi:10.1029/2007GL029683).

Надійшла до редакції 12.05.09

*M. V. Belobrova, A. G. Boyev,  
A. V. Kabanov, O. Ya. Matveyev, V. N. Tsybal*

**ON-LINE MAP-MAKING  
AND DIAGNOSTICS OF OIL POLLUTIONS  
OF THE SEA SURFACE USING  
MULTIFREQUENCY RADAR DATA**

The realization of the method for on-line map construction of oil contaminations of sea surface is described. The method allows one to construct map directly aboard an airplane during the synchronous two-frequency radar surveying. The algorithms and software for onboard processing of surveying results are developed. They allow one to estimate operative-ly the film thickness in every pixel of radar images, to plot the map for the distribution of the oil film thicknesses on the

overall image and, at the direction of the operator, to estimate the amount of the spilled oil, both on a separate area and on the overall image. The method is based on the comparison of theoretical and experimental radar contrasts of oil-polluted sea surface. It was used for the map-making of oil film thickness distribution in the oil-producing area «Neftyanie Kamni» in the Caspian Sea. The maps were constructed using the processing results of two X- and L-band radar images which were obtained with the airborne multifrequency radar complex MARS. The mapping analysis showed that the film thickness on the oil-producing area changed from 0.01 mm to 3 mm and the total mass of the spilled oil was about 44000 tons. The analysis enabled us to find the most polluted water areas and to estimate the amount of the oil spilled there.