

ISSN 1028-821X. Radiofiz. Electron. 2020. Vol. 25, No. 2: 9–21

DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2020.02.009>

УДК 528.8.044.2

PACS 95.75.-z

**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)

## **Модификация спутникового радиолокационного многоуглового метода измерений параметров аварийных разливов нефти на морской поверхности**

*Предмет и цель работы* – создание спутникового радиолокационного модифицированного многоуглового метода (ММУМ) измерения параметров аварийных разливов нефти на морской поверхности и разработка методики определения основных и вспомогательных расчетных параметров. Методика базируется на использовании изображений радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) Envisat-1 района добычи нефти Нефтяные Камни в Каспийском море, полученных в рамках совместного проекта id: CIP11140 с Европейским космическим агентством (ЕКА).

*Методы и методология работы.* Используются средства численного моделирования параметров уравнений модифицированной теории радиолокационного контраста морского волнения при наличии нефтяной пленки. Разработаны методология получения предварительных данных по результатам обработки радиолокационных изображений РСА Envisat-1 загрязнений моря нефтью, а также методология оценки объема и толщины для исходного и конечного нефтяных пятен на основе этих данных.

*Результаты работы.* По данным двух последовательных радиолокационных съемок получены величины объема, толщины и поверхностной активности исходного и конечного нефтяных пятен на морской поверхности. Параметризация основных характеристик нефти упростила расчеты и анализ результатов. Показано, что испарение нефти приводит к необходимости моделирования активности пленки нефти и коэффициентов поверхностного натяжения на границах нефти с водой и с воздухом, что свидетельствует об изменении физических характеристик растекающейся нефти. Все этапы моделирования подтверждены графической информацией.

*Заключение.* Предлагаемый метод может быть применен для аэрокосмических систем мониторинга аварийных разливов нефти на морской поверхности. Использование современных методов обработки и предоставления информации делает ММУМ доступным для широкого круга потребителей. Ил. 7. Табл. 1. Библиогр.: 32 назв.

*Ключевые слова:* радиолокационный мониторинг морской поверхности, спутниковый модифицированный многоуглового радиолокационный метод, диагностика параметров морских аварийных разливов нефти.

При возрастающих темпах добычи нефти и ее транспортировки по морю потери нефти в виде разливов неизбежны. Для обнаружения и диагностики таких разливов наиболее эффективными являются одночастотные радиолокационные (ОРМ), многочастотные (МЧМ) и многоугловой (МУМ) методы [1–8]. К сожалению, анализ перспектив использования спутникового радиолокационного мониторинга нефтяных загрязнений показал, что в ближайшие годы до-

ступная оперативная информация о разливах нефти будет обеспечиваться только одночастотными радиолокационными комплексами [8].

Для оценки параметров разлитой нефти существующие одночастотные методы используют ряд моделей растекания нефти по морской поверхности [9–13] с учетом максимального числа влияющих факторов. Это приводит к необходимости увеличения объема используемой машинной памяти и времени обработки ин-

формации. Учет влияния на динамику процесса растекания нефти взаимодействующих между собой факторов позволяет качественно оценивать временные изменения объема и толщины нефтяного пятна.

Данная работа посвящена разработке модифицированного одночастотного спутникового метода, основанного на предложенном нами ранее многоугловом методе (МУМ) [14–17]. В представленном варианте ММУМ реализована возможность минимизации числа необходимых параметров для расчетов толщины и объема разлитой нефти. Напомним, что особенностью метода МУМ было его использование для обработки радиолокационных изображений (РЛИ), полученных при последовательной спутниковой съемке загрязненной акватории на разных витках (с интервалом 12 и более часов), для чего важно проводить моделирование изменения параметров нефти, происходящего в течение интервала времени между съемками. Опыт наблюдения аварийных разливов на открытых морских акваториях [10, 18–21] показал, что в первые двое суток испарение является доминирующим фактором, изменяющим физические свойства нефти. Эта особенность была учтена при разработке ММУМ, в котором при моделировании используются данные комплексного измерения физических свойств и химического состава нефти (аналогичной каспийской нефти) в условиях испарения, полученные из совместной базы данных по свойствам нефти Агентства по охране окружающей среды США и министерства окружающей среды Канады [18]. Для повышения достоверности ММУМ оценки выполнены с использованием экспериментальных зависимостей параметров нефтяной пленки – коэффициента поверхностного натяжения (КПН), упругости, вязкости и др. – от толщины нефтяной пленки [22–25].

В результате предложен метод оценки толщины нефтяной пленки по измеренным значениям радиоконтрастов загрязненных участков относительно чистой морской поверхности с использованием параметризации свойств нефти в зависимости от относительного изменения толщины пленки и длительности интервала времени между измерениями.

Также при моделировании привлекались данные сопутствующей спутниковой погодной ин-

формации из бесплатных архивов – *NOMADS* [26] и *oceandata* [27]. Все расчеты параметров нефтяных пятен по радиолокационным данным и графическая информация выполнены с помощью пакета программ *MATLAB*.

**1. Диагностика нефтяных разливов на морской поверхности с использованием ММУМ.** Напомним, что идея многоугольного метода заключается в определении толщины нефтяной пленки по результатам сравнения двух значений экспериментальных радиолокационных контрастов (радиоконтрастов)  $D_{exp}$ , измеренных в одной точке нефтяного пятна под разными углами падения  $\theta_1$  и  $\theta_2$  на радиолокационных изображениях РЛИ-1 и РЛИ-2, и соответствующих теоретических значений радиоконтрастов  $D_{theor}$  [4–5]:

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

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

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

$$k = 2k_E \sin \theta, \quad p = (c_0 / \alpha_1)(d\alpha_1 / dc).$$

Здесь  $W_{sea}$  и  $W_{oil}$  – мощности принятых радиосигналов от чистой и загрязненной нефтью 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 поверхностного натяжения (КПН) на границе «вода – нефтяная пленка» и «нефтяная пленка – воздух»;  $\rho$  – плотность воды;  $\theta$  – угол падения радиоволны на морскую поверхность;  $\gamma_L(p)$  – коэффициент затухания Левича в присутствии мономолекулярной пленки [28];  $\gamma_0 = 2\nu k^2$  – коэффициент вязкого затухания поверхностной волны;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воды;  $p$  – поверхностная активность нефтяной пленки;  $c_0$  – невозмущенная концентрация нефтяной пленки; величины  $S_1, S_2, S_3$  в формуле (1) определяются выражениями в [4–5]. Необходимо отметить, что обычно под количественной мерой поверхностной активности принята величина  $g_1$ , фи-

зическим смыслом которой является изменение поверхностного натяжения  $\alpha$  при изменении концентрации нефти  $g_1 = -\partial\alpha/\partial c$  [29]. В формуле (1) использован безразмерный аналог поверхностной активности (далее – активности) пленки  $\rho$  для упрощения теоретических оценок и анализа результатов моделирования.

Как следует из формулы (1), теоретический контраст в общем случае является функцией пяти переменных  $\rho, h, \alpha, \nu, \rho$ . Для определения этих переменных необходимо составить и решить систему из пяти уравнений  $D_{theor,N}(\rho, h, \alpha, \nu, \rho) = D_{exp,N} (N = 1...5)$ . Отметим, что в рамках МУМ по результатам двух съемок можно записать систему только из двух уравнений для начальных и конечных значений поверхностной активности ( $\rho_1, \rho_2$ ) и толщины нефтяной пленки ( $h_1, h_2$ ):

$$\begin{aligned} D_{theor1}(k(\theta_1), \rho_1, h_1) &= D_{exp1}, \\ D_{theor2}(k(\theta_2), \rho_2, h_2) &= D_{exp2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где остальные переменные  $\alpha, \nu, \rho$  определяются путем моделирования по известным экспериментальным зависимостям.

Так, в случае обычно известных при аварии начальных значений вязкости и плотности нефти и с учетом первичности влияния на них процесса испарения за время между радиолокационными (РЛ) съемками (12 и более часов), можно воспользоваться зависимостями изменения вязкости и плотности нефти от теряемого при испарении (в процентах) объема нефти, полученными из банков экспериментальных данных параметров нефти [18, 30]. На рис. 1 приведены зависимости плотности и кинематической вязкости нефти *Cook Inlet* [18], близкой по своему составу к нефти месторождения Нефтяные Камни в Каспийском море.

Как видно на рис. 1, по известному интервалу времени между съемками можно промоделировать значения  $\rho$  и  $\nu$  до совпадения с измеренным законом их изменения.

Ряд измерений [22–25] показывают, что при изменении толщины нефтяной пленки  $h = 0,01...1,0$  мм происходит изменение ее упругости  $E$  и активности  $\rho = E/\alpha$  (где  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения (КПН) на границе «нефтяная пленка – воздух») [22]. На рис. 2 приведена зависимость активности неф-

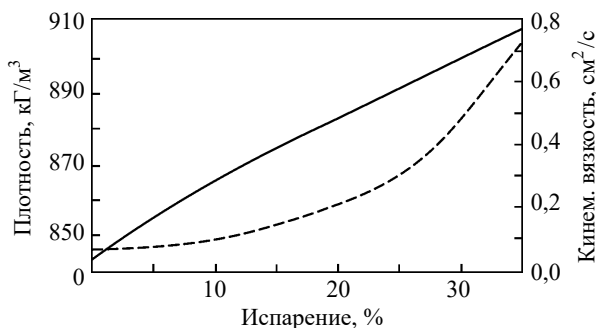


Рис. 1. Зависимость плотности (кривая 1) и кинематической вязкости (кривая 2) от испарения (в процентах от общей массы) нефти *Cook Inlet* при  $T_{oil} = 30$  °C [18]

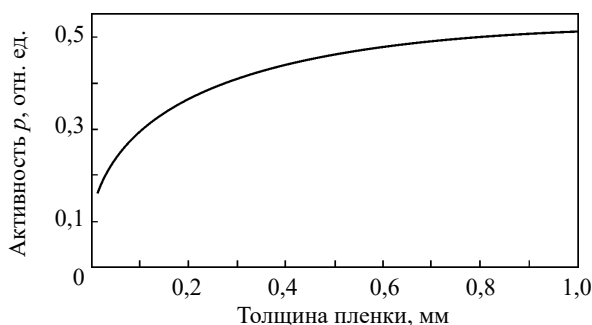


Рис. 2. Зависимость поверхностной активности пленки  $\rho$  от ее толщины  $h$ , обобщенная по экспериментальным данным [18, 22–25, 31–32]

тяной пленки  $\rho$  от ее толщины  $h$  для участка спектра морского волнения 10...15 Гц, усредненная по экспериментальным данным [18, 22–25, 31–32]. Эти данные, с учетом анализа растекания пленки, использованы для параметризации неизвестных значений  $\rho$  и  $h$  в уравнениях (2).

Преобразование уравнений (2) путем введения параметров связи между неизвестными значениями приводит к уменьшению количества переменных и используется в алгоритме вычислений ММУМ. Для выбора этих параметров проведем анализ растекания нефтяного пятна на морской поверхности по двум РЛИ. Он позволяет оценить площадь этого пятна (методика определения наличия нефти в каждой точке поверхности, основанная на анализе плотности распределения радиоконтраста по РЛИ в области наблюдения пятна будет приведена ниже). В результате можно определить  $S_1$  и  $S_2$  – площади нефтяных пятен для исходного и конечного РЛИ в моменты их съемки. Пусть  $V_1$  и  $V_2$  – соответствующие объемы разлитой нефти для исходного и конечного изображений, тогда их связь без учета потерь при расте-

кании запишется как

$$m_h = \frac{h_1}{h_2} = \frac{S_2 V_1}{S_1 V_2}. \quad (3)$$

При этом относительное изменение  $V_2 / V_1$  объема разлитой нефти принимается равным 1 на достаточно коротком отрезке времени либо корректируется с учетом происходящих процессов испарения, эмульгирования и пр. Последнее возможно при использовании параметризованных физических моделей и сопутствующих данных о состоянии окружающей среды на моменты съемок (температуре воды, воздуха, скорости ветра и т. д.). Кроме того, возможен вариант непрерывного разлива нефти при наличии постоянного источника разлива. В этом случае необходимы дополнительные данные о мощности источника.

В результате при использовании параметра  $m_h = h_1 / h_2$  система (2) имеет решение, в частности, при неизменной активности пленки ( $p_1 = p_2$ ). Следует учесть, что для определения частоты поверхностных волн  $\omega_+$  используются экспериментальные данные по измерению эффективного коэффициента поверхностного натяжения (ЭКПН) [22–25], определяющие, в том числе, величину активности. Поэтому для случая  $p_1 \neq p_2$  (рис. 2) поиск решения системы уравнений (2) возможен при введении следующих параметров:

$$\begin{aligned} m_h &= h_1 / h_2, \\ m_p &= \frac{p_1}{p_2} = f_p(m_h, m_\alpha), \\ m_\alpha &= \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\alpha_{11}$  и  $\alpha_{12}$  – КПН на границе «нефтяная пленка – воздух» для исходного и конечного РЛИ, соответственно. Следует отметить, что в то время как КПН пленки в конечном измерении предполагается неизвестным, величина  $\alpha_{11}$  принимается равной 25 дин/см – стандартной для данного типа нефти [18, 31–32].

Необходимо подчеркнуть, что предложенная выше параметризация изменения толщины пленки нефти, основанная на измерениях по двум РЛИ, в сочетании с параметризацией изменения активности нефти, определяемая на

основе дополнительных экспериментальных данных, является основой ММУМ.

В результате предложенных изменений система уравнений (2) для  $p$  и  $h$  приводится к следующему виду:

$$\begin{aligned} h_1 &= H(D_{exp1}, \theta_1, p_1), \\ \frac{h_1}{m_h} &= H\left(D_{exp2}, \theta_2, \frac{p_1}{m_p}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

где произведены замены  $h_2 = h_1 / m_h$ ,  $p_2 = p_1 / m_p$ ; функция  $H$  – обратное преобразование функции  $D_{theor}$  при радиоконтрастах  $D_{exp1}$  и  $D_{exp2}$ , измеренных под углами  $\theta_1$  и  $\theta_2$  в фиксированной точке поверхности по двум РЛИ.

Решение уравнений (5) возможно в форме

$$\begin{aligned} H(D_{exp1}, k(\theta_1), p_1) &= \\ = m_h H\left(D_{exp2}, k(\theta_2), \frac{p_1}{m_p}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

путем численного моделирования, а именно расчета зависимостей для левой и правой частей уравнения как функции активности при вариации параметра  $m_p$ . Определение параметра  $m_p$  как функции  $m_h$  при этом производится как по экспериментальным зависимостям Ермакова [23–25], так и с учетом испарения нефти в промежутке между съемками [18, 30].

Ниже приведены примеры численного моделирования по предложенной методике для данных двух последовательных радиолокационных съемок разлива нефти в акватории месторождения Нефтяные Камни в Каспийском море, полученных с помощью РСА *Envisat-1* 20040909 в 18-34-17 UTC (РЛИ-1, рис. 3, а) и 20040910 в 06-46-37 UTC (РЛИ-2, рис. 3, б).

Численные оценки по предложенной методике проводятся в два этапа.

*Первый этап* – подготовительные работы:

1. Преобразование данных РСА *Envisat-1* после чтения стандартным пакетом ЕКА (*NEST 5.1*) для обработки РЛИ в формат *MATLAB*.

Одновременно преобразуется в цифровой формат и может обрабатываться фрагмент РЛИ размером  $4500 \times 4500$  точек (пикселей) или  $\sim 340 \times 340$  км<sup>2</sup>. При этом из каждого фрагмента РЛИ-1 и РЛИ-2 (рис. 3) формируется по од-

ной матрице размером  $i \times j$  и  $k \times l$  (равным соответствующему фрагменту РЛИ) с массивами данных: об эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) –  $\text{Sigma}0_{1,i,j}$  и  $\text{Sigma}0_{2,k,l}$ ; о положении точек на РЛИ по  $X$  и  $Y$  –  $X_{1,i,j}$ ,  $X_{2,k,l}$  и  $Y_{1,i,j}$ ,  $Y_{2,k,l}$ ; о широте –  $\text{Lat}_{1,i,j}$  и  $\text{Lat}_{2,k,l}$ , долготе –  $\text{Long}_{1,i,j}$  и  $\text{Long}_{2,k,l}$ , углах падения  $\theta$  радиоволны на поверхность –  $\theta_{1,i,j}$  и  $\theta_{2,k,l}$ . По углу падения  $\theta$  контролируется разница  $\Delta\theta = 8 \dots 10^\circ$  между соответствующими углами для РЛИ-1 и РЛИ-2, обеспечивающая необходимую точность измерений параметров нефтяных пленок [8].

2. Взаимная привязка данных РЛИ:

- друг к другу. Из двух образованных ранее в формате *MATLAB* матриц для данных РЛИ-1 и РЛИ-2 строятся матрицы соответствия между индексами  $i, j$  элементов  $\text{Sigma}0_{1,i,j}$  и индексами  $k, l$  элементов  $\text{Sigma}0_{2,k,l}$  (рис. 3). Для этого рассчитываются расстояния  $\text{Dist}_{i,j,k,l}$  между точками РЛИ-1 и РЛИ-2 в десятичных координатах, после чего выбираются их минимальные значения  $\min(\text{Dist}_{i,j,k,l})$ . Проверка показала, что средняя ошибка совмещения точек двух РЛИ получается на порядок меньше размера элемента разрешения  $n$  ( $75 \times 75 \text{ м}^2$ ). При этом используются массивы координат  $\text{Lat}_1$ ,  $\text{Long}_1$ ,  $\text{Lat}_2$ ,  $\text{Long}_2$ . Учитывается, что точка РЛИ-1, вообще говоря, может не принадлежать области РЛИ-2. Этот случай контролируется путем сравнения величины  $\min(\text{Dist}_{i,j,k,l})$  со средним расстоянием между элементами РЛИ на поверхности («периодом решетки» в тех же десятичных градусах);

- к общей системе координат. Производится путем преобразования в фрагмент равноугольной цилиндрической проекции Меркатора в совмещенной системе координат для всех РЛИ, что позволяет отслеживать, например, динамику растекания нефти на морской поверхности по набору последовательных РЛИ, либо изменение толщины пленки (после обработки данных РЛИ) по областям разлитой нефти.

3. Определение радиоконтрастов зон загрязнения нефтяной пленкой морской поверхности (с учетом величины порогового радиоконтраста обнаружения нефтяных пятен), а также оценка их площадей.

Для этого из двух матриц данных РЛИ-1 и РЛИ-2 (пункты 1–2) формируются отдель-

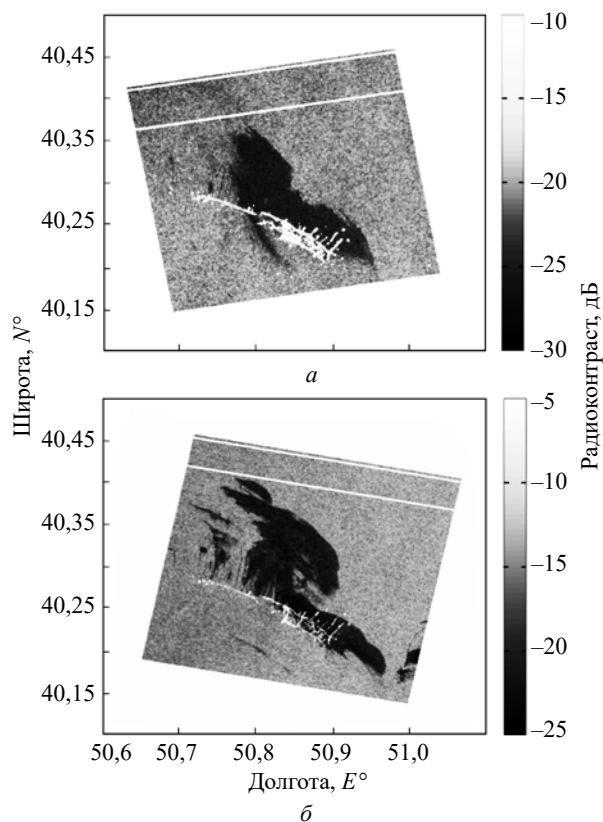


Рис. 3. Преобразованные программой *NEST 5.1* в значения радиоконтрастов фрагменты РЛИ-1 (а) и РЛИ-2 (б) разлива нефти в акватории месторождения Нефтяные Камни в Каспийском море, полученных с помощью РСА *Envisat-1 (ASA-WSM-1P, 090904 18-35 и 100904 06-46, © ESA)*. Белыми линиями выделены области обработки сигналов, рассеянных чистой морской поверхностью

ные матрицы значений ЭПР ( $\text{Sigma}0_{1,i,j}$  и  $\text{Sigma}0_{2,k,l}$ ). Для определения величин нефтяных контрастов морской поверхности в каждой точке РЛИ из матриц  $\text{Sigma}0_{1,i,j}$  и  $\text{Sigma}0_{2,k,l}$  сперва выделяются ряды данных, соответствующие ЭПР чистой воды. По ним строятся одномерные матрицы ЭПР чистой поверхности путем их двумерной фильтрации и усреднения угловой зависимости. Затем производится двумерная фильтрация всего массива данных матриц  $\text{Sigma}0_{1,i,j}$  и  $\text{Sigma}0_{2,k,l}$ , после чего выполняется соответствующее поэлементное вычитание данных одномерных матриц о ЭПР чистой воды из матриц  $\text{Sigma}0_{1,i,j}$  и  $\text{Sigma}0_{2,k,l}$  для использования в формуле (1). Оценка площади нефтяного пятна проводится по количеству  $n$  элементов матриц – масок (черных точек «нефть», рис. 4, а, б), для которых при выполнении условия  $D_{\text{expl},2} < D_0$ ,  $D_0 = -2,5 \dots -4,0 \text{ дБ}$  (здесь

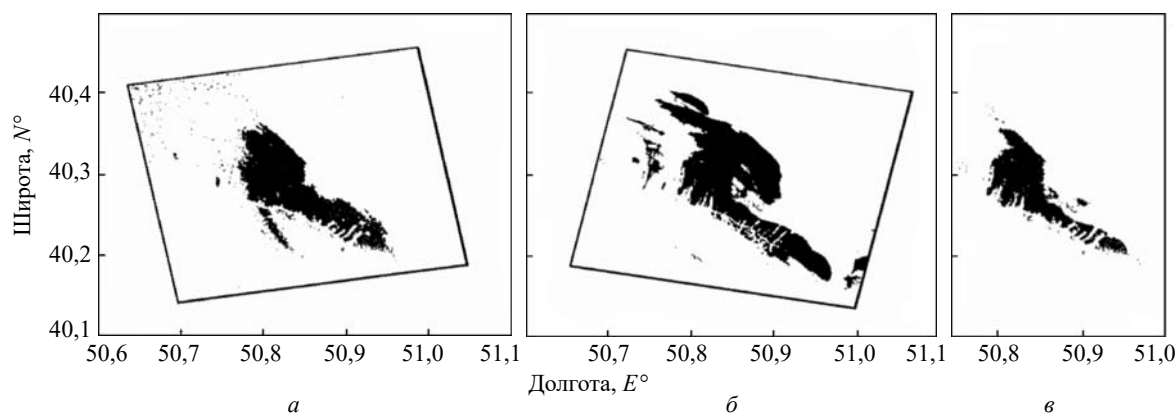


Рис. 4. Выделенные по уровню радиоконтраста  $D_0 = -4$  дБ фрагменты РЛИ загрязненных нефтью участков ( $a - n_1 = 17\ 513$ ,  $b - n_2 = 26\ 613$ ) и результирующее изображение совпадающих точек ( $v - n_{12} = 10\ 371$ ). Элемент пространственного разрешения –  $S_n = 75 \times 75$  м

$D_0$  – величина порогового радиоконтраста обнаружения нефтяных пятен [8], элементы точек «нефть» равны «1», а оставшиеся – «0». Затем по двум РЛИ строится матрица взаимосвязанных точек «нефть», где присутствует нефть на обоих снимках (рис. 4, в). Для упрощения обработки номера пикселей РЛИ-1 и РЛИ-2 привязаны только друг к другу.

Из данных, представленных на рис. 4, следует, что отношение  $n_2 / n_1 = 1,52$  указывает на увеличение площади нефтяного пятна и является первым приближением величины коэффициента  $m_h$ .

*Второй этап.* Подготовленные на первом этапе данные используются для оценок активности и толщины нефтяной пленки на РЛИ-1 и РЛИ-2 с помощью ММУМ.

До реализации расчетов по всей площади нефтяных пятен сначала проводится моделирование, основанное на численном решении системы уравнений (5), где в качестве величин радиоконтрастов и углов падения берутся средние по совпадающей наблюдаемой области пятна (рис. 4, в). Для РЛИ-1 это  $D_{exp1} = -5,25$  дБ и  $\theta_1 = 40^\circ$  (данные для первого уравнения системы), для РЛИ-2 соответственно  $D_{exp2} = -7,65$  дБ и  $\theta_1 = 30^\circ$  (данные для второго уравнения системы).

Экспериментальные данные [18] используются при задании физических параметров нефтяной пленки – плотности нефти  $\rho$ , кинематической вязкости  $\nu$  и коэффициента поверхностного натяжения  $\alpha$ . Так, для первого пятна на РЛИ-1  $\rho_1 = 0,84$  г/см<sup>3</sup>,  $\nu_1 = 0,07$  см<sup>2</sup>/с,  $\alpha_1 = 25$  дин/см. С учетом испарения пленки нефти

за 12 часов [18] (рис. 1) параметры плотности и вязкости для пятна на РЛИ-2 принимаются равными  $\rho_2 = 0,89$  г/см<sup>3</sup>,  $\nu_2 = 0,30$  см<sup>2</sup>/с. Что же касается выбора  $\alpha_2$  для второй съемки, то, по последним данным [25], при уменьшении толщины пленки происходит увеличение ЭКПН на границе «нефтяная пленка – вода» до величин  $\alpha_{eff} = 40...45$  дин/см. Поскольку величина ЭКПН связана как с межфазным КПН на границе «вода – нефтяная пленка», так и с КПН на границе «нефтяная пленка – воздух», величина последнего варьируется при моделировании в соответствующих пределах.

Для решения системы уравнений (5) в преобразованном виде (6) необходимо оценить входящие в них параметры  $m_h, m_p$ . Начальное значение коэффициента изменения толщины пленки принимается равным отношению площадей пятен, затем корректируется на величину испарения за время наблюдения, приводя к результату  $m_h \approx 1,6$ . В то же время коэффициент изменения активности  $m_p$  также связан с вариацией ЭКПН и, согласно оценкам [25], изменяется при моделировании в пределах  $m_p = 1,05...1,20$  (рис. 2).

Примеры результатов моделирования для выбора параметров при определении толщины пленки представлены на рис. 5. Сплошные кривые соответствуют зависимостям толщины от активности для РЛИ-1 при указанных выше среднем радиоконтрасте и угле падения, пунктирные – соответственно, для РЛИ-2. При выбранном методе представления решения зависимости для РЛИ-2 сжаты по осям на коэффициенты  $m_h$  и  $m_p$  соответственно.

Построенные кривые (рис. 5) являются изолиниями зависимостей возможных решений для толщины и активности пленки при измеренных радиоконтрастах и углах падения по данным РЛИ-1 и РЛИ-2. Данные [25] представляют собой результаты физических экспериментов по непосредственному измерению параметров нефтяной пленки, в том числе ЭКПН и вязкости, и, как следствие, активности, в зависимости от ее толщины (рис. 2). При этом подтверждается корреляция между модельными расчетами по радиолокационным данным и результатами лабораторных исследований.

Сравнение полученных решений по радиолокационным измерениям (рис. 5) и лабораторных данных (рис. 2) приведено в таблице.

Анализ результатов на рис. 5 показывает, что для используемой модели и полученных экспериментальных данных необходимо варьировать величины ЭКПН нефти в диапазоне 40...45 дин/см (для РЛИ-2). При меньших значениях ЭКПН решения системы уравнений (5) отсутствуют. Коэффициент изменения активности менялся в пределах  $m_p = 1,0...1,2$ .

Из приведенных в таблице решений можно сделать вывод, что наилучшее совпадение с экспериментальными лабораторными данными наблюдается при  $m_p = 1,025$ ,  $m_h = 1,6$ ,  $\alpha_{eff} = 45$  дин/см (строка № 4). В этом случае при изменении  $h = 0,0520...0,0319$  см величина активности, рассчитанной по модели и радиолокационным данным, меняется в пределах  $p = 0,4440...0,4332$ , по лабораторным данным –  $p_{Lab} = 0,4628...0,4116$ . При этом соблюдалось условие  $m_p > 1$ .

Также важно, что одновременное наличие характерных признаков – увеличение площа-

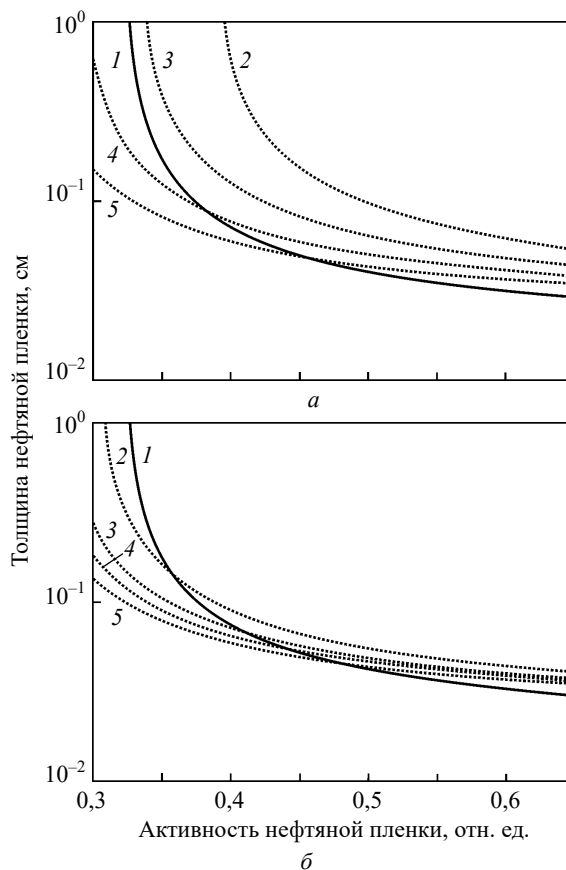


Рис. 5. Результаты моделирования зависимости толщины нефтяной пленки от активности нефтяной пленки как функции измеренных величин радиоконтрастов и углов падения. Кривые 1 (а, б) – зависимости для РЛИ-1, кривые 2–5 (а) – для РЛИ-2 при  $\alpha_{eff} = 30, 35, 40, 45$  дин/см, кривые 2–5 (б) – для РЛИ-2 при  $m_p = 1,2; 1,1; 1,05; 1,0$

ди нефтяного пятна и уменьшение активности  $p$  (растущая зависимость активности от толщины пятна на рис. 2) – свидетельствует о том, что причиной разлива является одиночный аварийный разлив нефти.

Далее были проведены расчеты толщины пленки и активности по области, где нефть на

#### Сравнение модельных расчетов по радиолокационным измерениям и лабораторным данным

№ п/п	Параметры, величины							
	Модельные						Лабораторные	
	$m_p$ , отн. ед.	$\alpha_{eff}$ , дин/см	$h_1$ , см	$h_2$ , см	$p_1$	$p_2$	$p_{1Lab}$	$p_{2Lab}$
1	1,025	30	–	–	–	–	–	–
2	1,025	35	–	–	–	–	–	–
3	1,025	40	0,0918	0,0569	0,3800	0,3707	0,5075	0,4696
4	1,025	45	0,0520	0,0319	0,4440	0,4332	0,4628	0,4116
5	1,000	45	0,0485	0,0297	0,4570	0,4570	0,4564	0,4044
6	1,050	45	0,0563	0,0346	0,4310	0,4105	0,4688	0,4205
7	1,1000	45	0,0677	0,0419	0,4070	0,3700	0,4846	0,4406
8	1,2000	45	0,1347	0,0836	0,3590	0,2992	0,5332	0,5028

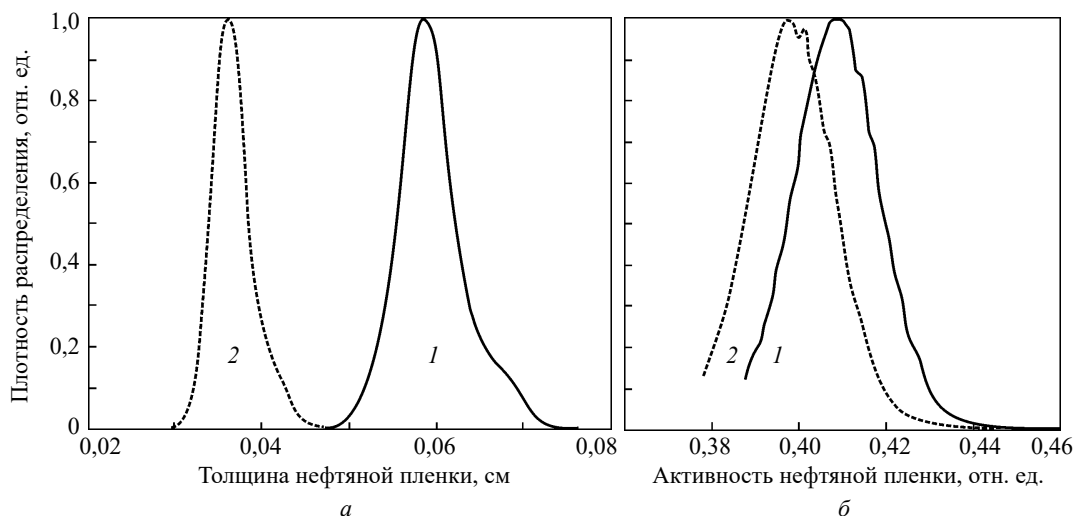


Рис. 6. Гистограммы распределения расчетных значений толщины (а) и активности (б) пленки в пятнах нефти на РЛИ-1 (кривая 1) и РЛИ-2 (кривая 2)

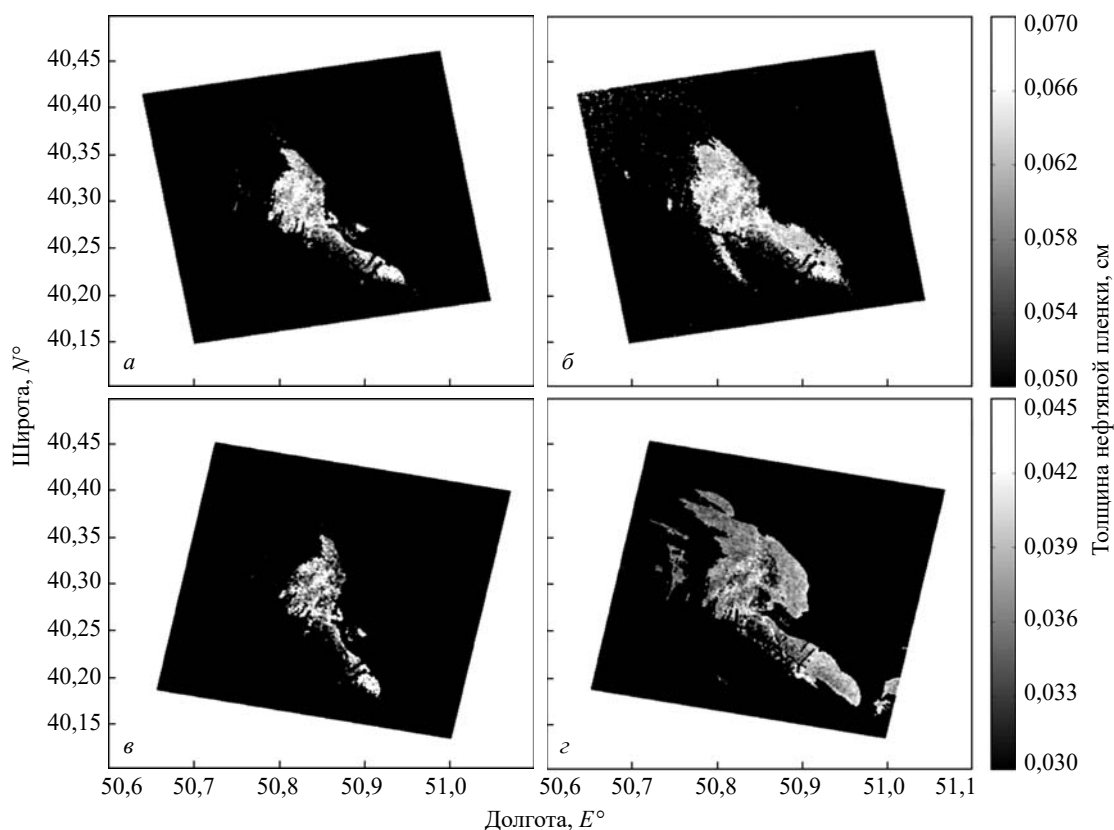


Рис. 7. Оценки неравномерности распределения толщины нефтяной пленки по поверхности совпадающих точек (а) и всего первого пятна (б); для второго пятна – (в) и (г), соответственно

поверхности моря присутствует на обоих РЛИ (рис. 4, в), с учетом уже определенных физических параметров пленки и параметров расчета. Система уравнений (5) решалась для каждой пары точек из РЛИ-1 и РЛИ-2, связанных по географическим координатам на поверхно-

сти. Одновременно производилось накопление решений по величинам толщины и активности в соответствующие массивы для расчета распределений и статистики по первому и второму пятнам нефти. Результаты расчетов представлены на рис. 6. Среднее по массиву решений для



толщины пленки для первого пятна составляет  $\bar{h}_1 = 0,061$  см при среднеквадратичном отклонении  $\sigma_{h1} = 0,004$  см, для второго пятна –  $\bar{h}_2 = 0,037$  см и  $\sigma_{h2} = 0,002$  см, соответственно. Полученные значения согласуются с результатами моделирования, проведенного для средних значений радиоконтрастов и углов падения при выборе параметров расчетов (рис. 5). Относительно небольшой разброс по значениям толщины пленки внутри пятен может быть объяснен на данном этапе низкой чувствительностью применяемой модели (1) к вариации радиоконтраста при небольших изменениях углов падения радиоволны [8]. Последние составляют  $\max(\Delta\theta_{ij}; \Delta\theta_{kl}) \leq 1^\circ$  для каждого пятна, в то время как разница углов падения при наблюдении двух пятен на порядок больше (в данном случае  $\Delta\theta_{1-2} \approx 10^\circ$ ).

На рис. 7 представлены окончательные расчеты оценки толщины пленки и ее вариации по поверхности для нефтяных пятен, зарегистрированных на РЛИ-1 и РЛИ-2 (рис. 3). Алгоритм расчета для участков пленки, где пленка присутствует на обоих РЛИ (рис. 7, а, в), подробно объяснен выше и заключается в решении системы из двух уравнений для каждой пары точек. Что же касается областей поверхности, где нефть присутствует только на одном РЛИ (первом или втором), то здесь применяется следующий алгоритм расчета. Вначале определяются средние значения активности  $\bar{p}_1, \bar{p}_2$  для уже рассчитанных областей совместного наблюдения пятна (рис. 6, б), а затем, для оставшейся части нефтяной пленки для начального пятна (РЛИ-1), расчет  $h_1$  ведется по первому уравнению системы (5) с использованием значения  $\bar{p}_1$  и соответствующих значений  $D_{exp1}, \theta_1$ , и для конечного пятна (РЛИ-2) расчет  $h_2$  ведется по второму уравнению системы (5) с использованием  $\bar{p}_2$  и соответствующих значений  $D_{exp2}, \theta_2$ .

Как видно из рис. 7, предложенный метод оценки толщины нефтяной пленки на морской поверхности ММУМ позволяет также получить карту распределения толщины (неравномерности), выделив наиболее и наименее загрязненные участки.

Из данных, представленных на рис. 4, по количеству пикселей можно определить площади начального ( $n_1 = 17\,513$ ,  $S_1 = 98,5$  км<sup>2</sup>) и

конечного ( $n_2 = 26\,613$ ,  $S_2 = 149,7$  км<sup>2</sup>) участков, покрытых нефтью. При этом используется величина элемента пространственного разрешения  $S_n$ . Также возможно оценить массу и объем разлитой нефти. Так, для первого пятна  $M_1 = \rho_1 S_n \sum_{i=1}^{k_1} h_{1i}$ , где суммирование ведется по всем элементам поверхности ( $k_1 = n_1$ ) с учетом толщины пленки нефти, оценка дает  $M_1 = 50\,475 \cdot 10^3$  кг. Аналогично для второго пятна  $M_2 = \rho_2 S_n \sum_{i=1}^{k_2} h_{2i}$  ( $k_2 = n_2$ ) получаем  $M_2 = 49\,295 \cdot 10^3$  кг. При этом объемы нефти составляют  $V_1 = 60\,091$  м<sup>3</sup> и  $V_2 = 55\,388$  м<sup>3</sup> соответственно.

**Выводы.** Использование предложенного спутникового радиолокационного многоуглового метода (ММУМ) позволило решить задачу определения параметров аварийного морского разлива нефти с учетом ее испарения как наиболее активного на начальном этапе разлива процесса изменения характеристик нефти. С помощью ММУМ по данным двух последовательных радиолокационных съемок получены величины площадей ( $S_1 = 98,5$  км<sup>2</sup> и  $S_2 = 149,7$  км<sup>2</sup>), объемов ( $V_1 = 60\,091$  м<sup>3</sup> и  $V_2 = 55\,388$  м<sup>3</sup>), масс ( $M_1 = 50\,475 \cdot 10^3$  кг и  $M_2 = 49\,295 \cdot 10^3$  кг), неоднородностей распределения толщины пленки нефти по поверхности ( $h_1 = 0,061 \pm 0,008$  см,  $h_2 = 0,037 \pm 0,004$  см) и активности ( $p_1 = 0,415$ ,  $p_2 = 0,405$ ) исходного (РЛИ-1) и конечного (РЛИ-2) нефтяных пятен на морской поверхности. Полученные значения коррелируют с последними экспериментальными данными других авторов [23–25]. Показано, что испарение нефти приводит к необходимости моделирования и параметризации активности  $p$  и коэффициентов поверхностного натяжения на границах нефти с водой  $\alpha_1$  и воздухом  $\alpha$ , что свидетельствует об изменении физических характеристик растекающейся нефти. Введение параметризации толщины пленки нефти  $h$  и ее активности  $p$  в уравнениях теории Боева [4, 15], с учетом современных экспериментальных данных о влиянии различных процессов на растекание нефти, упрощает анализ полученных результатов. По данным анализа сформулированы основные требования, позволяющие отнести наблюдаемый разлив нефти на морской по-

верхности к разряду одноразовых аварийных. Предложенный ММУМ позволяет использовать для анализа результаты последовательных радиолокационных съемок (с интервалом 0,5, 1,0, 1,5 и т. д. суток), исключая из рассмотрения процессы, перестающие оказывать замет-

ное влияние на растекание нефти. Алгоритм предварительной обработки РЛИ может быть использован при оценке параметров нефтяных разливов с помощью спутникового радиолокационного многочастотного метода [8]. Работа выполнялась в рамках проекта с *ESA id:11140*.

#### 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. 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. 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.
3. Tuft L., Trieschmann O., Hunsänger T. Using AirR- and Spaceborne Remote Sensing Data for the Operational Oil Spill Monitoring of the German North Sea and Baltic Sea. *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Airborne Remote Sensing Conf.* (San Francisco, California, 17–20 Sept. 2001). URL: [https://www.bafg.de/DE/08\\_Ref/M4/02\\_Fernerkundung/01\\_uelueberwachung/Fernerkundung-Nord OstSec.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bafg.de/DE/08_Ref/M4/02_Fernerkundung/01_uelueberwachung/Fernerkundung-Nord OstSec.pdf?__blob=publicationFile)
4. Боев А.Г., Цымбал В.Н., Матвеев А.Я., Ефимов В.Б., Бычков Д.М., Калмыков И.А., Яцевич С.Е. Аэрокосмическая радиолокационная диагностика природных катастроф и критических ситуаций: монография. Под ред. В.К. Иванова. Харьков: Изд. Рожко С.Г., 2017. 372 с.
5. De Mario A., Ricci G., Tesauo 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.
6. 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. *Исслед. Земли из космоса*. 2011. № 5. С. 31–44.
7. 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. М.: ИКИ РАН, 2013. Т. 10, № 2. С. 166–172.
8. Матвеев А.Я., Величко С.А., Бычков Д.М., Иванов В.К., Цымбал В.Н., Ефимов В.Б. Особенности применения многочастотного и многоугольного радиолокационных методов для оценки параметров разливов нефти на морской поверхности. *Радиофизика и электроника*. 2019. Т. 24, № 3. С. 30–44. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2019.03.030>.
9. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea. In: *Oil on the sea*. New York: Plenum Press, 1969. P. 53–63.
10. Корогенко К.А., Мамедов Р.М. Моделирование процесса распространения пятен нефти в прибрежной зоне Каспийского моря. *Океанология*. 2001. Т. 41, № 1. С. 45–52.
11. Lehr W., Jones R., Evans M., Simecek-Beatty D., Overstreet R. Revisions of the ADIOS oil spill model. *Environ. Model. Softw.* 2002. Vol. 17. P. 191–199. DOI:10.1016/S1364-8152(01)00064-0.
12. Hai-zhou Chen, Da-ming Li, Xiao Li. Mathematical modeling of the oil spill on the sea and application of the modeling in Daya Bay. *J. Hydrodynamics*. 2007. Vol. 19, Iss. 3. P. 282–291. DOI: 10.1016/S1001-6058(07)60060-2.
13. Liungman O., Mattson J. Scientific Documentation of Seatrack Web; physical processes, algorithms and references. Sweden: Norrköping, 2011. 32 p. URL: [http://www.smhi.se/polopoly\\_fs/1.15600!SeatrackWebScientificDocumentation.pdf](http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.15600!SeatrackWebScientificDocumentation.pdf)
14. 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 многоугольной 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.
15. Tsybmal V.N., Matveyev A.Ya., Boev A.G., Yatsevich S.Ye., Bychkov D.M., Velichko S.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V. *Radar monitoring of natural and anthropogenic hazardous phenomena*. Part 2: Monograph. Ed. V.K. Ivanov. Mauritius, Germany: LAP Lambert Academic Publ., 2018. 104 p.
16. Матвеев А.Я., Кубряков А.А., Боев А.Г., Бычков Д.М., Иванов В.К., Станичный С.В., Цымбал В.Н. Моделирование растекания нефти в задаче радиолокационной многоугольной диагностики загрязнений морской поверхности. *Исслед. Земли из космоса*. 2016. № 1–2. С. 213–224.
17. Matveyev A.Ya., Kubriakov A.A., Boyev A.G., Bychkov D.M., Velichko S.A., Ivanov V.K., Stanichny S.V., Tsybmal 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, Iss. 4. P. 313–331.
18. Wang Z.D., Hollebone B.P., Yang C., Fieldhouse B.G., Fingas M.F., Landriault M., Gamble R.L., Peng X., and Weaver J. Oil Composition and Properties for Oil Spill Modelling. *Proc. of the 28<sup>th</sup> AMOP Technical Seminar*. (Calgary, Alberta, Canada, 7–9 June 2005). Ottawa: Environment Canada, 2005. Vol. 1. P. 93–112.
19. Jordan R.E., Payne J.R. *Fate and Weathering of Petroleum Spills in the Marine Environment: A Literature Review and Synopsis*. Michigan: Ann Arbor Science Publishers, 1980.

20. Fingas M. Studies on the Evaporation of Grude Oil and Petroleum: I. the Relationship Between Evaporation Rate and Time. *J. Haz. Mat.* 1997. Vol. 56, Iss. 3. P. 227–236. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(97\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(97)00050-2).
21. Wang Z., Hollebone B, P., Fingas M., Fieldhouse B., Sigouin L., Landriault M., Smith P., Noonan J., Thouin G. Characteristics of Spilled Oils, Fuels, and Petroleum Products: 1. Composition and Properties of Selected Oils. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-03/072, 2003. URL: <http://www.epa.gov/athens/publicatons>.
22. Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн: монография. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
23. Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Гуцин Л.А. Пленки на морской поверхности и их дистанционное зондирование. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2006. Т. 3, № 2. С. 86–98.
24. Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., and Gushchin I.A. Damping of Gravity-Capillary Waves in the Presence of Oil Slicks According to Data from Laboratory and Numerical Experiments. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012. Vol. 48, No 5. P. 565–572.
25. Sergievskaya I., Ermakov S., Lazareva T., Guo J. Damping of surface waves due to crude oil/oil emulsion films on water. *Marine Pollution Bull.* 2019. Vol. 146. P. 206–214. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.06.018
26. Архив данных NOMADS URL: <http://nomads.ncep.noaa.gov/>
27. Архив данных oceandata URL: <http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>
28. Левич В.Г. *Физико-химическая гидродинамика*. Москва: ГИТТЛ, 1959. 669 с.
29. Савицкая Т.А., Шиманович М.П. *Практикум по коллоидной химии. Часть 1. «Поверхностные явления»*. Минск: БГУ, 2003. 100 с.
30. Центр компетенции по ликвидации разливов нефти в Арктике. Лаборатория для исследования характеристик нефти. URL: <http://osr-arctic.ru/ru/matrica-kompetencii-resursy/laboratoriya-dlya-issledovaniya-harakteristik-nefti#>
31. Поверхностное натяжение. URL: <http://www.homedistiller.ru/poverhnochnoe-natjazhenie.html>
32. Геология. Молекулярно-поверхностные свойства системы нефть–газ–вода–порода. URL: [http://studopedia.ru3\\_63468\\_molekulyarno-poverhnochnie-svoystva-sistemi-neft-gaz-voda-poroda.html](http://studopedia.ru3_63468_molekulyarno-poverhnochnie-svoystva-sistemi-neft-gaz-voda-poroda.html)

Статья найдена 20.08.2019

#### 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. 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. 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.
3. Tufte, L., Trieschmann, O., Hunsänger, T., Kranz, S., Barjenbruch, U., 2001. Using AirR- and Spaceborne Remote Sensing Data for the Operational Oil Spill Monitoring of the German North Sea and Baltic Sea: *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Airborne Remote Sensing Conf.*, San Francisco, California, 17–20 Sept. 2001. Available from: [https://www.bafg.de/DE/08\\_Ref/M4/02\\_Fernerkundung/01\\_oelueberwachung/FernerkundungNordOstSee.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bafg.de/DE/08_Ref/M4/02_Fernerkundung/01_oelueberwachung/FernerkundungNordOstSee.pdf?__blob=publicationFile)
4. Boev, A.G., Tsymbal, V.N., Matveyev, A.Ya., Yefimov, V.B., Bychkov, D.M., Kalmykov, I.A., Yatsevich, S.Ye., Ivanov, V.K. ed. 2017. *Aerospace radar diagnostics of natural disasters and critical situations: monograph*. Kharkov: Publishing House Rozhko S.G. (in Russian).
5. De Mario, A., Ricci, G., and Tesauro, M., 2001. On CFAR Detection of Oil Slicks on the Ocean Surface by a Multifrequency and/or multipolarization SAR. In: *Proc. 2001 IEEE Radar Conf.* Atlanta, GA, USA, 1–3 May 2001. Atlanta: IEEE, pp. 351–355.
6. Ivanov, A.Yu., Dostovalov, M.Yu., and Sineva, A.A., 2012. Characterization of oil pollution around the oil rocks production site in the Caspian Sea using spaceborne polarimetric SAR imagery. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 48(9), pp. 1014–1026. DOI: 10.1134/S0001433812090058.
7. Boev, A.G., Bychkov, D.M., Matveyev, A.Ya., Tsymbal, V.N., Laverov, N.P. ed., Lupjan, E.A. ed., Lavrova, O.Yu. ed., 2013. Radar satellite multi-angle diagnostics of sea oil pollution. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 10(2), pp.166–172 (in Russian).
8. Matveyev, A.Ya., Velichko, S.A., Bychkov D.M., Ivanov, V.K., Tsymbal, V.N., Yefimov, V.B., Gavrilenko, A.S., 2019. Multi-frequency and multi-angle radar methods application peculiarities for parameters estimation of oil pollutions on sea surface. *Radiofiz. elektron.*, 24(3), pp. 30–44. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2019.03.030>.
9. Fay, J.A., 1969. The spread of oil slicks on a calm sea. In: *Oil on the sea*. New York, Plenum Press, pp. 53–63.
10. Korotenko, K.A., Mamedov, R.M., 2001. Modelling of oil spill propagation in the near-shore area of the Caspian Sea. *Oceanology*, 41(1), pp. 45–52 (in Russian).
11. Lehr, W., Jones, R., Evans, M., Simecek-Beatty, D., Overstreet, R., 2002. Revisions of the ADIOS oil spill model. *Environ. Model. Softw.*, 17, pp. 191–199. DOI:10.1016/S1364-8152(01)00064-0.
12. Hai-zhou, Chen, Da-ming, Li, Xiao, Li, 2007. Mathematical modeling of the oil spill on the sea and application of the modeling in Daya Bay. *J. Hydrodynamics*, 19(3), pp. 282–291. DOI: 10.1016/S1001-6058(07)60060-2.
13. Liungman, O., Mattson, J., 2011. Scientific Documentation of Seatrack Web; physical processes, algorithms and references. [pdf] Sweden: Norrköping, 2011. 32 p. Available at: [http://www.smhi.se/polopoly\\_fs/1.15600!SeatrackWebScientificDocumentation.pdf](http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.15600!SeatrackWebScientificDocumentation.pdf)

14. Matveev, A.Ya., Boev, A.G., Bychkov, D.M., Kubryakov, A.A., Stanichny, C.V., Tsymbal, V.N., Chelikhovsky, 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).
15. Ivanov, V.K. ed., 2018. *Aerospace radar diagnostics of natural disasters and critical phenomena*. Part 2. Mauritius, Germany: LAP Lambert Academic Publ.
16. Matveev, A.Ya., Kubryakov, A.A., Boev, A.G., Bychkov, D.M., Ivanov, V.K., Stanichny, S.V., Tsymbal, V.N., 2016. Modeling of Oil Spreading in a Problem of Radar MultiAngle Diagnostics of Sea Surface Pollutions. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 1–2, pp. 213–224 (in Russian).
17. 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.
18. Wang, Z.D., Hollebone, B.P., Yang, C., Fieldhouse, B.G., Fingas, M.F., Landriault, M., Gamble, R.L., Peng, X., and Weaver, J., 2005. Oil Composition and Properties for Oil Spill Modelling. In: *Proc. of the 28<sup>th</sup> AMOP Technical Seminar*. (Calgary, Alberta, Canada, 7–9 June 2005). Ottawa: Environment Canada, **1**, pp. 93–112.
19. Jordan, R.E., Payne, J.R., 1980. *Fate and Weathering of Petroleum Spills in the Marine Environment: A Literature Review and Synopsis*. Michigan: Ann Arbor Science Publishers.
20. Fingas, M., 1997. Studies on the Evaporation of Grude Oil and Petroleum: I. The Relationship Between Evaporation Rate and Time. *J. Haz. Mat.*, **56**(3), pp. 227–236. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(97\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(97)00050-2).
21. Wang, Z., Hollebone, B.P., Fingas, M., Fieldhouse, B., Sigouin, L., Landriault, M., Smith, P., Noonan, J., Thouin, G., 2003. Characteristics of Spilled Oils, Fuels, and Petroleum Products: 1. Composition and Properties of Selected Oils. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-03/072, 2003. Available in: <http://www.epa.gov/athens/publicatons>
22. Ermakov, S.A., 2010. *Influence of surfactant films on dynamics of gravity-capillary waves*. N. Novgorod: IAPRAS (in Russian).
23. Ermakov, S.A., Sergievskaya, I.A., and Gushchin, I.A., 2006. Films on the Sea Surface and Their Remote Sensing. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, **3**(2), pp. 86–98 (in Russian).
24. Ermakov, S.A., Sergievskaya, I.A., and Gushchin, I.A., 2012. Damping of Gravity-Capillary Waves in the Presence of Oil Slicks According to Data from Laboratory and Numerical Experiments. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, **48**(5), pp. 565–572.
25. Sergievskaya, I., Ermakov, S., Lazareva, T., Guo, J., 2019. Damping of surface waves due to crude oil/oil emulsion films on water. *Marine Pollution Bulletin*, **146**, pp. 206–214. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.06.018.
26. NOMADS data archive. Available at: <http://nomads.ncep.noaa.gov/>
27. Oceandata data archive. Available at: <http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>
28. Levich, V.G., 1959. *Physico-chemical hydrodynamics*. Moscow: State publishing house of technical and theoretical literature (in Russian).
29. Savitskaya, T.A., Shimanovich, M.P., 2003. *Workshop on colloid chemistry. Part 1. «Surface phenomena»* Minsk: BSU Publ. (in Russian).
30. The Oil Spill Response Competence Center in the Arctic. Laboratory for the study of the characteristics of oil. (in Russian) Available at: <http://osr-arctic.ru/ru/matrica-kompetencii-resursy/laboratoriya-dlya-issledovaniya-harakteristik-nefti#>
31. Surface tension. (in Russian) Available at: [www.homedistiller.ru/poverhnostnoe-natjazhenie.html](http://www.homedistiller.ru/poverhnostnoe-natjazhenie.html)
32. Geology. Molecular – surface properties of the system oil–gas–water–rock. (in Russian) Available at: [https://studopedia.ru/3\\_63468\\_molekulyarno-poverhnostnie-svoystva-sistemi-neft-gaz-voda-poroda.html](https://studopedia.ru/3_63468_molekulyarno-poverhnostnie-svoystva-sistemi-neft-gaz-voda-poroda.html)

Received 20.08.2019

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

O.Ya. Usikov IRE of NASU  
12, Akad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

#### MODIFICATION OF SATELLITE RADAR MULTI-ANGLE METHOD FOR MEASURING PARAMETERS OF EMERGENCY OIL SPILLS ON THE SEA

**Subject and purpose.** The paper seeks to develop a modified satellite radar multi-angle method (MMAM) for measuring parameters of emergency oil spills on the sea surface and, also, a technique for the determination of the main and auxiliary design parameters. Employed are radar images from synthesized aperture radar *Envisat-1* surveying the oil production area *Neftyanje Kammi* in the Caspian Sea in terms of the joint project id: CIP11140 with European Space Agency.

**Methods and methodology.** Numerical modeling is performed for equation parameters in the modified radar-contrast theory of sea roughness in the oil film presence. Methodologies have been worked out which enable the preliminary data to be derived from the *Envisat-1* radar images of oil spills and allow the volume and thickness of the initial and final oil spills to be estimated upon these data.

**Results.** From two successive radar surveys of the initial and final oil spills on the sea, the volume, thickness and surface activity of the initial and final oil spills have been determined. The parameterization of the basic oil characteristics has simplified matters with the calculations and analysis of the results. It has been shown that the oil evaporation requires that the oil film activity and the surface tension coefficients be simulated at the oil-water and oil-air interfaces, for the physical characteristics of the spreading oil vary over time. Every step of the simulation is supported with the graphic data.

**Conclusions.** The suggested MMAM method can be employed in the airborne and spaceborne systems monitoring emergency oil spills on the sea surface. With the modern methods of data processing and presentation, the MMAM can be adopted by a wide range of consumers.

**Key words:** sea surface radar monitoring, satellite modified multi-angle radar method, diagnostics of emergency oil spill parameters.

О.Я. Матвеев, С.А. Величко, Д.М. Бичков,  
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

#### МОДИФІКАЦІЯ СУПУТНИКОВОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО БАГАТОКУТОВОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ АВАРІЙНИХ РОЗЛИВІВ НАФТИ НА МОРСЬКІЙ ПОВЕРХНІ

**Предмет і мета роботи** – створення супутникового радіолокаційного модифікованого багатокутового методу (МБКМ) для вимірювання параметрів аварійних розливів нафти на морській поверхні та розроблення модифікованої методики визначення основних і допоміжних розрахункових параметрів. Методика базується на використанні зображень радіолокатора із синтезованою апертурою (РСА) *Envisat-1* району видобутку нафти Нафтові Камені у Каспійському морі, що були отримані у межах спільного проекту *id: CIP11140* з Європейським космічним агентством (ESA).

**Методи і методологія роботи.** Використано засоби чисельного моделювання параметрів рівнянь модифікованої теорії радіолокаційного контрасту морського хвилювання за наявності нафтової плівки. Розроблено методологію отримання попередніх даних за результатами оброблення радіолокаційних зображень РСА *Envisat-1* забруднень моря нафтою і на їх основі методологію оцінки об'єму і товщини для вихідної та кінцевої нафтових плям.

**Результати роботи.** За даними двох послідовних радіолокаційних зйомок отримані величини об'єму, товщини та активності вихідної і кінцевої нафтових плям на морській поверхні. Параметризація головних характеристик нафти спростила розрахунки і аналіз результатів. Показано, що випаровування нафти призводить до необхідності моделювання активності плівки нафти і коефіцієнтів поверхневого натягу на межах нафти з водою і повітрям, що свідчить про зміну фізичних характеристик нафти, яка розтікається. Усі етапи моделювання підтверджені графічною інформацією.

**Висновок.** Запропонований метод може бути застосований для аерокосмічних систем моніторингу аварійних розливів нафти на морській поверхні. Використання сучасних методів оброблення і надання інформації робить МБКМ доступним для широкого кола споживачів.

**Ключові слова:** радіолокаційний моніторинг морської поверхні, супутниковий модифікований багатокутовий радіолокаційний метод, діагностика параметрів морських аварійних розливів нафти.