

Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла “Нефтяные камни” по данным многочастотного радиолокационного зондирования

А. Г. Боев, А. Я. Матвеев¹

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 310002, Украина*

*¹Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАН и НКА Украины,
ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 310085, Украина
matveyev@ire.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 27 января 2005 г.

В работе по данным радиолокационного зондирования получены оценки количества нефти, загрязняющей акваторию каспийского промысла “Нефтяные Камни”. Оценки сделаны в рамках теории гашения морского волнения пленкой поверхностно-активного вещества конечной толщины. Сравнение теоретических и экспериментально наблюдаемых на различных длинах волн радиоконтрастов морской поверхности позволили оценить пространственную неоднородность толщины нефтяной пленки и определить среднюю поверхностную плотность разлитой нефти – 62 т/км². Найденная оценка загрязнения акватории промысла свидетельствует о том, что аэросъемка зафиксировала момент аварийного разлива нефти.

1. Введение

Каспийское море обладает третьими по величине в мире запасами нефти и газа, и работы по их добыче ведутся уже почти 150 лет. Используемая технология добычи предполагает потери, приводящие к разливам нефти по морской поверхности. Кроме технологических, существует целый ряд непрогнозируемых потерь, связанных с утечками из законсервированных скважин, естественными выходами нефти на поверхность через грифоны, аварийными выбросами при потере контроля над скважинами и прорывах нефтепроводов, транспортировке, хранении и др [1]. Растекающаяся нефть загрязняет морскую поверхность, затем под действием ветра и волн нефтяная пленка рвется и коагулирует, превращаясь в твердые шарики, загрязняющие дно моря [2].

Каспийское море – закрытый водоем, и оперативный мониторинг состояния морской поверхности является необходимым звеном в сохранении его чистоты. Оперативные данные об источниках загрязнения, местонахождении наиболее загрязненных участков, о количестве разлитой нефти позволяют принимать более эффективные организационные меры по устранению очагов загрязнений. Одним из перспективных методов получения оперативных данных о состоянии загрязнения моря является авиационная и спутниковая радиолокация.

Радиофизические методы дистанционного зондирования морской поверхности уже давно используются для обнаружения разливов на морской поверхности нефти, нефтепродуктов и других поверхностно-активных веществ (ПАВ) [3-6]. При этом достаточно легко и уверенно определяет-

ся площадь загрязнения, оценка же объема и количества разлитой нефти требует знания значений толщины нефтяной пленки, которая вместе с другими параметрами нефти определяет механизм формирования морского волнения, рассеивающего радиоволны.

В работах [7, 8] построена теория морского волнения под пленкой ПАВ конечной гидродинамической толщины и предложен алгоритм определения толщины пленки по данным радиолокационного зондирования. Целью настоящей работы являются практическое использование результатов этой теории для обработки данных многочастотного радиолокационного мониторинга акватории каспийского морского промысла “Нефтяные Камни” и определение количества загрязняющей ее нефти.

2. Эксперимент

Работы по обнаружению и оценке параметров загрязнений морской поверхности акватории каспийского нефтепромысла “Нефтяные Камни” проводились в 1989–1991 гг. с помощью авиационного многочастотного радиолокационного

комплекса (МРЛК) “МАРС”, установленного на борту самолета-лаборатории ИЛ-18Д [9]. Основные характеристики комплекса “МАРС” приведены в таблице.

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе осуществлялось многочастотное синхронное зондирование акватории с высоты $H \approx 7200$ м (поляризация только вертикальная) и предварительная обработка принимаемой информации в реальном времени.

Работы первого этапа происходили в такой последовательности. Сначала проводился поиск и обнаружение участков, загрязненных нефтепродуктами, оценивались их размеры, проводилась внутренняя калибровка радиолокаторов комплекса и уточнялся режим оптимальной съемки. Затем уже в оптимальном режиме проводилась контрольная съемка. Работы этого этапа подтвердили, что данные радиолокаторов миллиметрового (ММ), сантиметрового (СМ) и дециметрового (ДМ) диапазонов длин волн обладают достаточной информацией о нефтяных загрязнениях. Поскольку в период проведения съемок крупного волнения не наблюдалось, то радиолокационное изображение загрязнений в метровом (М) диапа-

Таблица. Основные характеристики авиационного МРЛК “МАРС”

Название радиолокатора	Длина волны, см	Тип антенны	Средняя излучаемая мощность, Вт	Поляризация	Ширина полосы обзора, км	Пространственное разрешение, м	Вид обработки данных
РБО-0.8	0.8	антенна с дифракционной решеткой	4.5	ВВ, ГГ	15	30 ÷ 50	бортовая
РБО-3	3	волноводно-щелевая	8.3	ВВ	45	20 ÷ 50	бортовая
РСА-23	23	АФАР	11.2	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ	30	2.5 ÷ 25 25 ÷ 50	на земле, бортовая
РСА-180	180	ФАР	8.4	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ	30, 60	10 ÷ 50 50 ÷ 100	на земле, бортовая

Примечание. ФАР – фазированная антенная решетка, АФАР – активная ФАР, В – вертикальная поляризация, Г – горизонтальная поляризация

зоне длин волн было малоинформативным. Окончательная обработка информации, полученной в результате контрольной съемки, проводилась уже на земле и составляла содержание второго этапа исследования.

Этот этап начинался с селекции экспериментов по условиям съемки, наиболее важными из которых являлись состояние морской поверхности и погодные условия.

Состояние морской поверхности контролировалось по величине скорости приводного ветра, определяемой путем сравнения измеренной с помощью радиолокатора РБО-3 удельной эффективной поверхности рассеяния σ^0 чистой морской поверхности с известными зависимостями σ^0 от скорости ветра [10]. В обсуждаемых ниже экспериментах скорость ветра составляла $3 \div 5$ м/с.

Селекция по погодным условиям показала, что точность измерений радиолокатором, работающим в ММ диапазоне, сильно зависит от погодных условий [11], а полученная с его помощью информация чаще всего может быть применена как дополнительная. Поэтому для количественных оценок использовались в основном данные радиолокаторов СМ и ДМ диапазонов длин радиоволн.

После селекции осуществлялось совмещение радиолокационных изображений, полученных на различных частотах, с по-

мощью компьютерных программ или стандартных графических редакторов. Затем производилась оцифровка амплитуд сигналов, принятых от загрязненного и чистого участков морской поверхности. Данные об уровне собственных шумов приемника, кривая временной автоматической регулировки усиления и коэффициент усиления приемника брались из результатов внутренней калибровки радиолокаторов. Уровень шумов приемников контролировался после каждой серии измерений.

На рис. 1 приведено синхронное трехчастотное радиолокационное изображение исследуемого района. Видно, что акватория “Нефтяных Камней” характеризуется сильной неоднородностью загрязнения (темные и светлые пятна), связанной с различием толщины и активности нефтяных пленок. Наличие в средней и верхней части изображения нефтяных вышек, соединенных между собой в длинную эстакаду (яркие линии), и автономных вышек (яркие точки в нижней части изображения) позволяло (как по реперным точкам) совмещать различные радиолокационные изображения с высокой точностью. Там же горизонтальными стрелками “а-ж” указаны строки изображений, данные которых использованы при дальнейшем обсуждении.

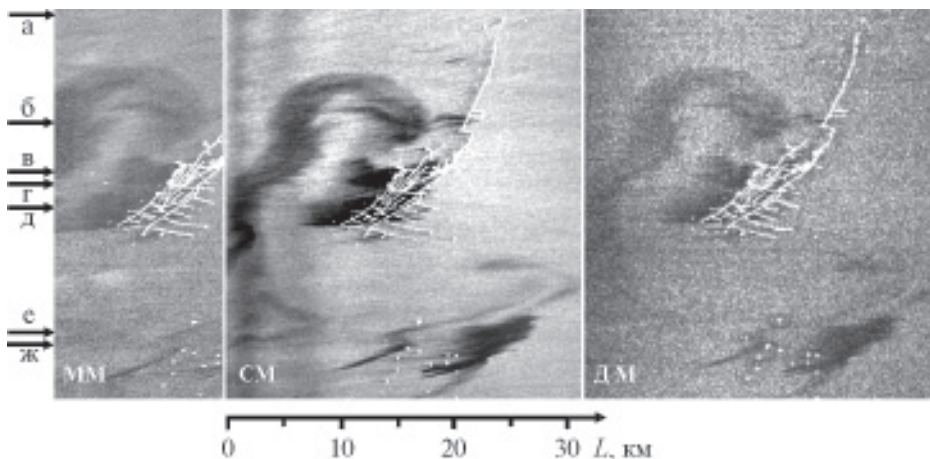


Рис. 1. Синхронное трехчастотное (в ММ, СМ и ДМ диапазонах) радиолокационное изображение района добычи нефти “Нефтяные Камни” в Каспийском море, полученное с помощью МРЛК “МАРС” 19.07.90. Стрелками а-ж выделены выбранные для анализа строки изображения

Степень загрязнения морской поверхности оценивалась по величине логарифмического радиолокационного контраста (в дальнейшем контраста) D_E , измеряемого в дБ:

$$D_E = 10 \lg \left\{ \frac{\bar{P}_r - \bar{P}_N}{\bar{P}_s - \bar{P}_N} \right\} \quad (1)$$

где \bar{P}_r , \bar{P}_s – средние мощности сигналов, принятых соответственно от загрязненного и чистого участков морской поверхности, \bar{P}_N – средняя мощность собственных шумов приемника на выходе блока обработки сигналов.

На рис. 2 приведены зависимости амплитуд радиолокационных сигналов (а и б) и собственных шумов приемника (в) от угла падения радиоволны Θ в строках радиолокационного изображения в СМ диапазоне, указанных соответственно горизонтальными стрелками “а” и “б” на рис. 1. Они характеризуют метеоусловия и состояние волнения отражающих участков моря в полосе обзора. Статистически однородный по всей дальности сигнал, отраженный от чистого моря (рис. 2, а), свидетельствует об идентичности метеоусловий в пределах полосы обзора. Изрезанность сигнала (рис. 2, б), отраженного загрязненной морской поверхностью, указывает на не-

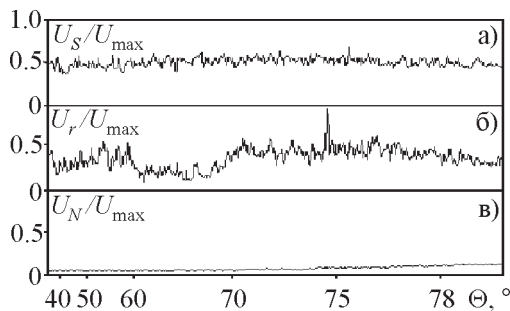


Рис. 2. Записи зависимостей амплитуд радиосигналов на длине волны $\lambda \approx 3$ см от угла падения радиоволны на морскую поверхность: а) – для сигналов, принятых от чистой поверхности моря (по стрелке а, рис. 1), б) – для сигналов, принятых от загрязненной поверхности (по стрелке б, рис. 1), в) – собственные шумы приемника на выходе блока бортовой обработки сигналов

днородность нефтяной пленки исследуемого участка. Изменение с дальностью уровня шумов приемника автоматически учитывалось при обработке сигналов.

Анализ величин радиолокационных контрастов D_E на различных частотах был проведен для всех изображений морской поверхности исследуемого района. В результате оказалось, что участки в изображениях в СМ и ДМ диапазонах, покрытые нефтяной пленкой, можно разбить по полученным значениям контрастов D_E на две группы. К первой группе относятся участки, удаленные от эстакад и вышек на 10÷20 км, со значениями $|D_E| < 7$ дБ, а ко второй – близлежащие, с контрастами $|D_E| > 7$ дБ. Максимальное значение $|D_E|$ для второй группы составляет ≈ 14 дБ. В ММ диапазоне радиолокационный контраст на участках первой и второй группы примерно одинаков и составляет $D_E \approx (-2.5 \pm 1.5)$ дБ. Визуальный анализ изображений показывает, что участки второй группы в основном располагаются в непосредственной близости от источников загрязнения – нефтедобывающих вышек. Это позволяет предположить, что такие участки покрыты свежей нефтяной пленкой с более высокой активностью, чем участки первой группы. Поскольку измерения проводились одновременно, то при оценке контраста на различных радиочастотах исключалось влияние аппаратных ошибок и ошибок, связанных с погодными условиями. Кроме того, как видно из таблицы, все радиолокаторы комплекса имели примерно одинаковое разрешение (размер ячейки пространственного разрешения не более 50×50 м) и, следовательно, ошибка определения контраста не зависела и от частоты. Среднеквадратическая ошибка вычисления контраста составила менее 1 дБ.

3. Теоретический анализ результатов экспериментов

Объяснение экспериментальных зависимостей радиолокационных контрастов D_E от частоты и угла падения, их связи

с параметрами морского волнения и нефтяной пленки проводилось следующим образом. В рассмотрении были использованы данные эксперимента, полученные с участков акватории 1-й и 2-й групп. Теоретический анализ этих данных проводился с использованием двух моделей пленки. Сначала они исследовались в рамках теории резонансного рассеяния радиоволн морским волнением под нерастворимой пленкой ПАВ нулевой (в гидродинамическом и электродинамическом смыслах) толщины. Использовалось следующее выражение для радиолокационного контраста [12]:

$$D_0(k) = -10 \lg \frac{\omega_0^2 \gamma_0^2}{\omega_+^2 \gamma_L^2}, \quad k = 2k_E \sin \Theta. \quad (2)$$

Здесь $\omega_0 = \sqrt{gk + \alpha k^3 / \rho}$, $\omega_+ = \sqrt{gk + \alpha_1 k^3 / \rho}$ – соответственно частоты поверхностных волн на чистой и покрытой пленкой морской поверхности; k и k_E – волновые числа морской и радиоволн; $g = 981$ см/с²; α и α_1 – коэффициенты поверхностного натяжения на границе вода–пленка и пленка–воздух; ρ – плотность воды; Θ – угол падения радиоволны на морскую поверхность. Поверхностные волны под нефтяной пленкой в формуле (2) характеризуются коэффициентом затухания Левича [13]

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

где $\gamma_0 = 2\nu k^2$ – коэффициент вязкого затухания поверхностной волны, ν – коэффициент кинематической вязкости воды; $\gamma_s = \rho \omega_{c1}^2 / \omega_0$ – силовой параметр, характеризующий влияние растяжения пленки на волну, $\omega_{c1} = \sqrt{\alpha_1 k^3 / \rho}$ – частота капиллярных поверхностных волн;

$p = (c_0 / \alpha_1) (d\alpha_1 / dc)$ – безразмерная поверхностная активность пленки (в дальнейшем активность), c_0 – невозмущенная концентрация ПАВ пленки. Формула (2), по сути, характеризует отношение пространственных спектральных плотностей волнения на загрязненном и чистом участках моря в одинаковых погодных условиях. При полученном из эксперимента значении левой части (и известных значениях α , ν , k и ρ) (2) превращается в уравнение для определения активности пленки p .

Конкретные теоретические расчеты контраста по формуле (2) и далее проводились для нефтяной пленки с параметрами, близкими к параметрам нефти месторождения “Нефтяные Камни” [14, 15]. Для коэффициентов поверхностного натяжения выбирались следующие значения: на границе раздела вода–нефть $\alpha = 13$ дин/см, на границе раздела воздух–нефть $\alpha_1 = 60$ дин/см. Для коэффициентов кинематической вязкости воды и нефти – $\nu = 10^{-2}$ см²/с, $\nu_1 = 0.3$ см²/с соответственно. Плотность воды принималась равной $\rho = 1$ г/см³, плотность нефти – $\rho_1 = 0.8$ г/см³.

На рис. 3 представлены зависимости контраста D_0 от длины поверхностной волны для различных значений поверх-

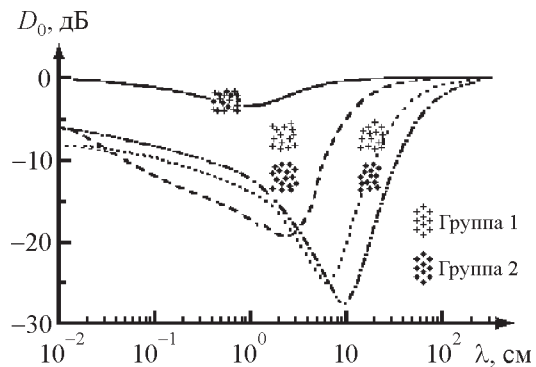


Рис. 3. Зависимости расчетной величины контраста D_0 морского волнения под нефтяной пленкой нулевой толщины от длины поверхностной волны λ (крестики – экспериментальные значения контраста D_E): — — $p = 0.02$; - - - - $p = 0.1$; ···· $p = 0.3$; - · - · $p = 0.5$

ностной активности p . Там же (крестиками) приведены экспериментальные значения контрастов D_E , полученные на различных частотах. Видно, что значения контраста D_E для радиоволн $\lambda = 23$ см (участки групп 1 и 2) удовлетворительно согласуются с теоретической зависимостью, соответствующей поверхностной активности $p = 0.3$. Согласно [16] этой активности соответствует поверхностная концентрация нефти $c \cong 9$ мг/м². Характерные экспериментальные значения контрастов для радиоволн $\lambda = 3.2$ см групп 1, 2 лежат между теоретическими кривыми со значениями параметра $p = 0.3$ и 0.02 . Анализ показывает, что их нельзя совместить с какой-либо теоретической кривой, соответствующей одному и тому же значению p . Значения контрастов группы 1 соответствуют параметру $p = 0.05$, а группы 2 – $p = 0.08$, т. е. отличаются от расчетных в среднем на 8 и 3 дБ. Экспериментальные значения контрастов для радиоволн $\lambda = 0.8$ см “ложатся” на теоретическую кривую с $p = 0.02$, отличаются от расчетных в среднем на 9 дБ и почти одинаковы для групп 1 и 2. Таким образом, допуская небольшое различие в концентрациях на поверхности участков 1 и 2, обнаружимое радиолокационными методами, необходимо отметить значительное, увеличивающееся с уменьшением длины радиоволны λ , отклонение экспериментальных значений от теоретических.

Наблюдаемое расхождение теории с экспериментом, по-видимому, связано с тем, что модель взаимодействия пленки с поверхностной волной является более сложной, чем та, которая использована в рассматриваемой теории. К эффектам, не учтенным данной теорией, можно, прежде всего, отнести влияние гидродинамической толщины пленки. Этот эффект становится заметным, когда в пленке становятся возможными собственные волновые движения. Наименьший масштаб таких движений δ опреде-

ляется вязкостью и частотой поверхностной волны [12]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\nu_1}{\omega}}. \quad (4)$$

Эта величина характеризует толщину вязкого волнового слоя, способного образовываться на границах пленки. Влияние толщины пленки h на поведение волны проявляется, если эта толщина сравнима с δ . Зависимость толщины вязкого волнового слоя в нефти от длины поверхностной волны в ней представлена на рис. 4. Видно, что влияние толщины пленки должно проявляться сильнее с укорочением длины поверхностной волны. Именно такая качественная картина наблюдалась в экспериментах (рис. 3). Исходя из этого, дальнейшая обработка данных эксперимента проводилась в рамках теории взаимодействия поверхностных волн с пленкой конечной толщины [7, 8].

Контраст D_h морского волнения под пленкой ПАВ конечной толщины h записывается в виде:

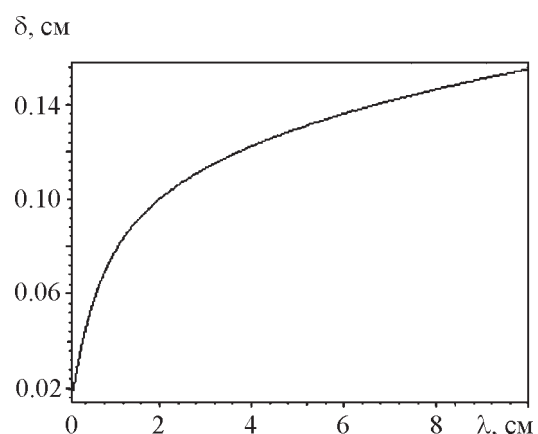


Рис. 4. Зависимость толщины вязкого волнового слоя δ в нефти от длины λ поверхностной волны

$$D_h(k, h) = D_0(k) + 20 \lg \left(1 + \frac{\gamma_0}{2\gamma_L} khR \right), \quad (5)$$

$$R \equiv \frac{\omega_+}{\gamma_0} (S_1 + S_2 + S_3),$$

где $D_0(k)$ – контраст морского волнения под пленкой “нулевой” толщины (см. (2)), а величины S_1 , S_2 , S_3 определяются выражениями:

$$S_1 = \frac{\gamma_g}{\omega_+} \left(1 - \frac{\gamma_g}{\omega_+} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \right) \times \frac{\frac{\rho_1}{\rho} \left[\sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \left(\frac{\omega_1^2}{\omega_+^2} - 2 \frac{\gamma_s}{\omega_+} \right) - 2 \frac{\omega_1^2}{\omega_+^2} \frac{\gamma_g}{\gamma_{01}} \left(1 - \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} \right) \right] - \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}}}{\left(1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} + 2 \frac{\omega_+}{\gamma_0} \left(\frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \right)} - \frac{\rho_1 \gamma_{01}}{\rho \omega_+},$$

$$S_2 = \left(\frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \times$$

$$\times \frac{\left[1 - \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} + 2 \frac{\gamma_s}{\omega_+} \frac{\omega_1^2}{\omega_+^2} \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} - \frac{\rho_1}{\rho} \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\omega_1^2}{\omega_+^2} - 2 \frac{\gamma_s}{\omega_+} \right]}{\left(1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} + 2 \frac{\omega_+}{\gamma_0} \left(\frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \right)}, \quad (6)$$

$$S_3 = \sqrt{\frac{v_1}{v_2}} \left(\frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \times$$

$$\times \frac{\left(1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right) \left[-1 + 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} + 2 \sqrt{\frac{\gamma_0}{\omega_+}} \right]}{\left(1 - 2 \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 + 4 \frac{\omega_+}{\gamma_0} \left(\frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)^2 \left(1 - \sqrt{\frac{\omega_+}{\gamma_0}} \frac{\gamma_g}{\omega_+} \right)}.$$

Здесь $\gamma_g = (\rho_1/\rho)\gamma_s$, $\gamma_{01} = 2v_1k^2$ – коэффициент вязкого затухания поверхностной волны в нефти. В формулах (5)-(6) содержатся пять параметров, характеризующих пленку: активность, толщина, поверхностное натяжение, вязкость и плотность. При наличии достаточно большого массива экспериментальных данных принципиально возможно составить пять независимых уравнений и решить их относительно всех этих параметров. В нашем случае задача упрощена, т. к. вязкость, поверхностное натяжение и плотность нефти известны. Для определения двух неизвестных параметров (активности p и толщины h) необходимые два уравнения получаются с использованием данных эксперимента в СМ и ДМ диапазонах:

$$D_E(k_C; r) = D_0(k_C) + 20 \lg \left[1 + \frac{\gamma_0}{2\gamma_L} k_C h R(k_C) \right], \quad (7)$$

$$D_E(k_d; r) = D_0(k_d) + 20 \lg \left[1 + \frac{\gamma_0}{2\gamma_L} k_d h R(k_d) \right]. \quad (8)$$

Здесь k_C и k_d – волновые числа соответственно сантиметровых и дециметровых поверхностных волн.

Для анализа основные загрязненные участки акватории были разделены на квадраты площадью 50×50 м и положение их в уравнениях задавалось радиусом-вектором r . Данные радиолокатора в ММ диапазоне в дальнейшем не использовались из-за большой погрешности измерений.

Уравнения (7) и (8) решались численно. Правые части уравнений варьировались путем изменения активности p и толщины h пленки до тех пор, пока оба уравнения не удовлетворялись одновременно при одних и тех же значениях этих параметров. Для каждой пары значений экс-

периментальных контрастов решение уравнений было единственным. В качестве примера на рис. 5 показаны теоретические зависимости контрастов D_h (линии 1 и 2) от толщины пленки h при значении активности $p = 0.21$ для одного из участков акватории. Значение толщины пленки определяется вертикальной штриховой линией, проведенной через точки пересечения теоретических и экспериментальных (горизонтальные пунктирные линии) кривых.

Такой анализ толщин и активностей пленки был проведен для всех участков акватории. При этом оказалось, что решение уравнений (7) и (8) при указанных выше значениях коэффициентов поверхностного натяжения и кинематической вязкости существует лишь для участков 2-й группы с контрастами $|D_E| > 7$ дБ.

Отсутствие решения для участков 1-й группы естественно было связать с их удаленностью от источников нефти и длительным существованием пленки на воде. Действительно, при скорости растекания $3 \div 6$ см/с [5] пленка распространится на расстояние $10 \div 20$ км за $3 \div 5$ суток. За это время она испытает на себе многократное воздействие ветра и с большой ве-

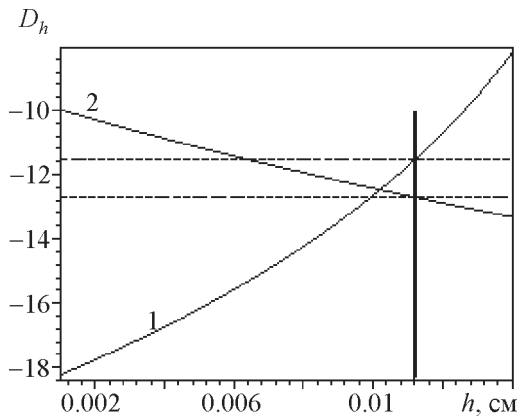


Рис. 5. Зависимость теоретических контрастов D_h от толщины пленки h : 1 – $\lambda \approx 3$ см, 2 – $\lambda \approx 23$ см. Штриховыми линиями показаны экспериментальные значения контрастов D_E . Жирная вертикальная линия указывает на искомую толщину нефтяной пленки, активность пленки $p = 0.21$

роятностью будет разорвана. В этих условиях радиосигнал будет отражаться от “пятнистой” поверхности моря и параметры, описывающие ее свойства, будут иметь промежуточные значения между значениями для пленки и воды. Поэтому при анализе участков группы 1 в уравнения (7) и (8) вместо коэффициентов поверхностного натяжения α_1 и кинематической вязкости ν_1 были введены следующие величины:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_1(t) &= \alpha_1 + t(\alpha + \alpha_1), \\ \bar{\nu}_1(t) &= \nu_1 + t(\nu - \nu_1), \\ 0 \leq t &\leq 1, \end{aligned} \tag{9}$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения на границе вода–воздух и ν – кинематическая вязкость воды. Параметр t характеризует отношение площадей поверхности воды и пленки на элементе радиолокационного разрешения. Для непрерывной пленки $t = 0$ и $\bar{\alpha}_1 = \alpha_1$, $\bar{\nu}_1 = \nu_1$. Уравнения (7) и (8) решались для различных значений t , начиная с $t = 0$. Оказалось, что решение существует для всех участков рассматриваемой группы при $0.04 \leq t \leq 0.11$. При увеличении параметра t наблюдается тенденция к уменьшению толщины пленки, ее активности и контраста. Приведенные значения параметра t указывают на сравнительно малую роль разорванности пленки в формировании радиолокационного изображения.

4. Результаты

На рис. 6 приведены гистограммы толщин пленки для различных участков акватории. Вертикальная развертка рисунков соответствует строкам (б-ж) радиолокационных изображений на рис. 1. Горизонтальная развертка характеризует зависимость толщины пленки от расстояния, которое отсчитывается от левого края соответствующего радиолокационного изображения. Активность пленки показана различной штриховкой.

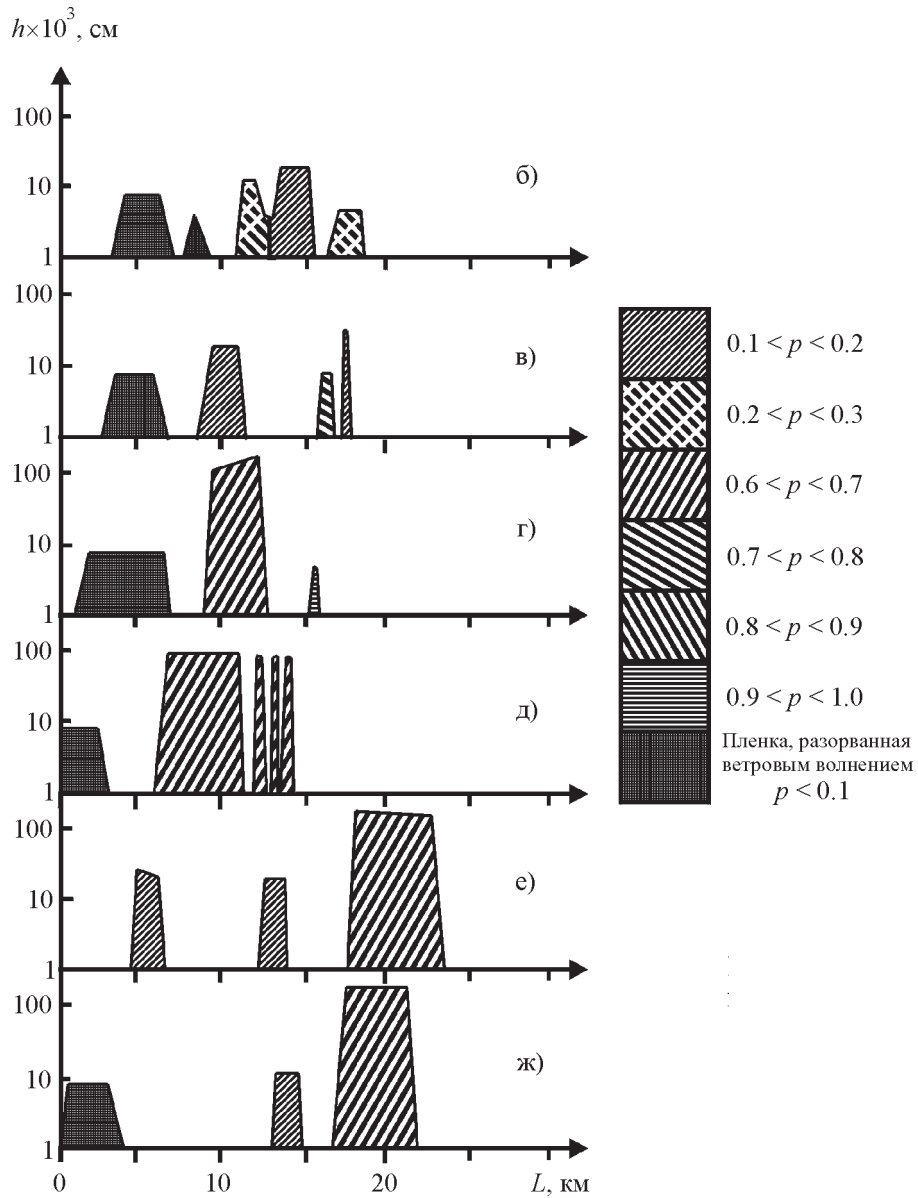


Рис. 6. Гистограммы толщин h и активностей p нефтяной пленки в акватории нефтепромысла “Нефтяные Камни” в строках б, в, г, д, е, ж радиолокационного изображения (рис. 1)

Анализ рис. 6 показывает, что поверхностная активность пленки изменяется в акватории в широких пределах: почти от нуля до единицы. На кривой сжатия поверхностной пленки такому диапазону изменения активности соответствует практически весь спектр состояний пленки в процессе ее эволюции из объемного состояния в поверхностное, газообразное [2]. Гистог-

раммы толщин участков, расположенных непосредственно у эстакад и вышек, представлены на четырех последних графиках рис. 6 ($10 \text{ км} < L < 20 \text{ км}$). Пленка этих участков характеризуется большой активностью ($0.6 < p < 0.7$) и большой, почти одинаковой, толщиной ($h = 1.3 \cdot 10^{-1} \text{ см}$). Этот результат представляется достаточно естественным. Вблизи вышек свежая разливаю-

щаяся нефть претерпевает фазовый переход из объемного состояния в поверхностное. На кривой сжатия этому состоянию соответствует участок “жидкой пленки”, обладающей повышенной активностью. Пленка в этом состоянии еще достаточно конденсирована, обладает высокой поверхностной концентрацией и слабо подвержена сжатию под действием внешних воздействий. При дальнейшей эволюции со временем жидкая пленка превращается в “газообразную”, обладающую меньшей активностью и концентрацией. В этой фазе она больше подвержена внешним воздействиям ветра и волнения, что и определяет неоднородность ее толщины в пределах исследованной акватории. На рис. 6 эта качественная картина прослеживается по гистограммам толщины при удалении от вышек и эстакад.

В итоге, анализ радиолокационных изображений и данных рис. 6 приводит к следующей качественной картине загрязнения акватории нефтепромысла. Загрязнение определяется источниками нефти, динамикой процесса ее распространения, влиянием ветра, морского волнения и течения. Как видно из рис. 1, в верхней части эстакады работы, по-видимому, прекращены, основное пятно нефти отошло от эстакады, ветер и течение вытягивают его в длинный шлейф. Максимальная толщина нефти в этом пятне $h \leq 0.02$ см, а общий вес нефти около 4350 т. В нижней части эстакады добыча нефти только начата и нефть, не успев разлиться, находится вблизи вышек. Пленка здесь на порядок толще ($h \sim 0.15$ см), вес разлитой нефти составляет около 11600 т. Представляет опасность мощное пятно в нижней части радиоизображений – у автономных вышек. Толщина пленки в нем $h \sim 0.173$ см, а его вес почти 16200 т. По результатам съемок суммарный вес нефти, разлитой в исследуемой акватории, составил около 32000 т. Загрязненность района характеризуется средней поверхностной концентрацией нефти 62 т/км².

Проведенная оценка загрязнения акватории каспийского промысла “Нефтяные Камни” свидетельствует о том, что в момент съемки, по-видимому, была зафиксирована аварийная ситуация, безусловно принесшая большой урон экологии Каспийского моря.

Кроме того, выполненный качественный и количественный анализ нефтяного загрязнения по результатам синхронного многочастотного радиолокационного мониторинга показал, что СМ и ДМ радиодиапазоны являются оптимальными для определения толщин нефтяных пленок. Радиоволны ММ диапазона более чувствительны к движениям в пленке и ее толщине, но характеризуются более сложными условиями рассеяния. Влияния нефтяных пленок с толщинами, реально наблюдаемыми на морской поверхности, на рассеяние радиоволн М диапазона для количественных оценок недостаточно.

Литература

1. Трансграничный диагностический анализ Каспийского моря. Каспийская экологическая программа. – Баку (Азербайджан), 2002. – Т. 2. – 139 с.
2. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии. – Л.: Химия, 1984. – 368 с.
3. Krishen K. Detection of Oil Spills Using a 13.3-GHz Radar Scatterometer // J. Geophys. Res. – 1973. – Vol. 78, No. 12. – P. 1952-1963.
4. Pilon R. O., Purves C. G. Radar Imagery of Oil Slicks // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 1973. – Vol. AES-9, No. 5. – P. 630-636.
5. Галаев Ю. М., Калмыков А. И., Курекин А. С. и др. Радиолокационные обнаружения нефтяных загрязнений морской поверхности // Известия АН СССР. ФАО. – 1977. – Т. 13, №4. – С. 406-414.
6. Боев А. Г., Карвицкий Г. Э., Матвеев А. Я., Цымбал В. Н. Оценка параметров нефтяной пленки на морской поверхности методом многочастотного радиолокационного зондирования // Радиофизика и радиоастрономия. – 1998. – Т. 3, №1. – С. 43-48.
7. Боев А. Г., Ясницкая Н. Н. Коэффициент затухания поверхностных волн под пленкой по-

- верхностно – активного вещества конечной гидродинамической толщины // Прикладна гідромеханіка. – 2002. – Т. 4, №4. – С. 14-22.
8. Боев А. Г., Ясницкая Н. Н. Гашение морского волнения пленкой поверхностно-активного вещества конечной толщины // Известия РАН. ФАО. – 2003. – Т. 39, №1. – С. 132-141.
 9. 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.
 10. Методические указания по комплексному использованию спутниковой информации для изучения морей. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 143 с.
 11. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации. – М.: Сов.радио, 1973. – 496 с.
 12. 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.
 13. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.:Физматгиз, 1959. – 700 с.
 14. Добрянский А. Ф. Химия нефти. – М.: Гостехиздат, 1961. – 211 с.
 15. Субботина Е. П. Сборник физических констант и параметров. – Л.: Изд. ЛГУ, 1967. –148 с.
 16. Ермаков С. А., Пелиновский Е. Н., Талипова Т. Г. О влиянии пленок поверхностно-активных веществ на изменения спектров ветрового волнения под действием внутренних волн // Известия АН СССР. ФАО. – 1980. – Т. 16, №10. – С. 1068-1076.

Оцінка кількості розливої нафти на акваторії каспійського промислу “Нафтові камені” за даними багаточастотного радіолокаційного зондування

А. Г. Боев, О. Я. Матвеев

У роботі за даними радіолокаційного зондування одержано оцінки кількості нафти, що забруднює акваторію каспійського промислу “Нафтові Камені”. Оцінки виконано в рамках теорії гашення морського хвилювання плівкою поверхнево-активної речовини кінцевої товщини. Порівняння теоретичних і експериментально спостережених на різних довжинах хвиль радіоконтрастів морської поверхні дозволили оцінити просторову неоднорідність товщини нафтової плівки та визначити середню поверхневу густину розливої нафти – 62 т/км². Знайдена оцінка забруднення акваторії промислу свідчить, що аерозйомка зафіксувала момент аварійного розливу нафти.

The Amount Estimation of Oil Pollutants in the Oil-Producing Area “Oil Stones” in the Caspian Sea Using Multifrequency Radar Data

A. G. Boev and A. Ya. Matveyev

The amount of oil pollutants in the oil-producing area “Neftyanе Kamni” (“Oil Stones”) in the Caspian Sea is estimated using multifrequency radar data. The estimates are made within the theory of the sea roughness damping by the surfactant films of finite width. The theoretical and experimental radar contrasts on the sea surface at different wavelengths compared have allowed to estimate spatial inhomogeneities of the oil film width and to determine the average oil spill density of 62 t/km². The estimated pollution regions in the oil-producing area suggest that aerial survey witnessed just the event of emergency oil spillage.