

## Оценка параметров нефтяной пленки на морской поверхности методом многочастотного радиолокационного зондирования

А. Г. Боев<sup>1)</sup>, Г. Э. Карвицкий<sup>1)</sup>, А. Я. Матвеев<sup>2)</sup>, В. Н. Цымбал<sup>2)</sup>

1) Радиоастрономический институт НАН Украины,  
Украина, 310002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4

2) Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАН и НКА Украины,  
Украина, 310085, Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12

Статья поступила в редакцию 24 марта 1998 г.

Проведен сравнительный анализ данных одновременного трехчастотного радиозондирования акватории Нефтяных Камней (Каспий) и теории радиолокационного контраста развитого морского волнения при наличии пленки поверхностно-активного вещества.

Оценена поверхностная активность и концентрация нефтяной пленки, информативность использованных в эксперименте радиоволн, сформулированы рекомендации по постановке оптимального эксперимента и ближайшие задачи развития теории.

Проведено порівняльний аналіз даних одночасного трьохчастотного радіозондування акваторії Нафтових Камнів (Каспій) та теорії радіолокаційного контрасту розвинутого морського хвильовання при наявності плівки поверхнево-активної рідини.

Оцінено поверхневу активність та концентрацію нафтової плівки, інформативність використаних в експерименті радіохвиль, сформульовано рекомендації про постановку оптимального експеримента та найближчі задачі розвитку теорії.

Работа посвящена задаче определения характеристик загрязнений морской поверхности пленками поверхностно-активных веществ (ПАВ) по данным многочастотного радиозондирования. Для этого используются результаты экспериментального исследования акватории района добычи нефти Нефтяные Камни в Каспийском море самолетным многочастотным (Ka, X, L) радиолокационным комплексом "МАРС" и теории радиолокационного контраста развитого морского волнения при наличии пленки ПАВ.

Сравнение теории с экспериментом позволило оценить поверхностную активность нефтяной пленки, поверхностную концентрацию нефти, информативность использованных в эксперименте радиоволн и сформулировать рекомендации по постановке оптимального эксперимента и ближайшие задачи развития теории.

### Введение

Экологические катастрофы, возникающие в терминалах при перекачке и неаккуратном хранении нефтепродуктов, при их добыче на шельфе и морских перевозках, стимулируют работы по оперативному обнаружению загрязнений морской поверхности, оценке количества и вида разлитых нефтепродуктов, выявлению наиболее загрязненных участков и источников загрязнения.

К решению этих задач привлекаются интенсивно развиваемые в последние десятилетия методы дистанционного зондирования (ДЗ) с аэрокосмических носителей [1,2]. Независимость от погодных условий и условий освещенности делают наиболее перспективными для оперативного мониторинга морской поверхности радиолокационные методы ДЗ [3,4]. Экспериментальные исследования по радиозондированию загрязнений поверхности моря нефтепродуктами и другими поверхностно-активными веществами (ПАВ) проводятся уже давно (см., например, [5-7]). Основным результатом этих исследований является подтверждение эффекта надежного обнаружения ПАВ на морской поверхности при зондировании в X и L диапазонах длин волн. При этом наблюдается отсутствие корреляции результатов ряда экспериментов по радиозондированию даже на одних и тех же или близких по значению длинах волн [6,8]. К тому же в экспериментальных работах обычно (см., например, [6]) для объяснения влияния пленки используется лишь коэффициент затухания свободных капиллярных поверхностных волн при наличии так называемой "нерастяжимой" пленки, полученный еще О. Рейнольдсом [9].

Такое состояние экспериментальных исследований безусловно связано с отсутствием достаточно полного понимания как механизма влияния ПАВ на морское волнение, так и теории этого явления.

Первая работа, посвященная теории радиолокационного контраста развитого морского волнения при наличии пленки ПАВ, появилась сравнительно недавно [10]. В ней используется общее выражение для коэффициента затухания поверхностных волн, полученное В. Г. Левичем [11]. Однако влияние пульсаций ветрового давления в ней учтено некорректно, что привело к неверной зависимости радиоконтраста от параметров пленки. Более поздние теоретические работы [12] свободны от этого недостатка, но в них не учитывается ряд важных факторов (разрушение пленки при волнении и конечность ее толщины, изменение степени шероховатости морской поверхности под воздействием пленки и др.), влияющих в условиях реального эксперимента на величину радиоконтраста.

Приведенный анализ состояния работ по диагностике пленок ПАВ на морской поверхности методом дистанционного радиозондирования показывает, что для повышения достоверности диагностики необходимо на базе имеющихся экспериментальных данных расширить существующие теоретические представления о механизме влияния пленок ПАВ на морское волнение, а затем сравнить теоретические данные с результатами эксперимента по одновременному многочастотному зондированию участка морской поверхности с высокой вероятностью загрязнения пленками ПАВ.

Такая задача была решена в рамках данной работы. Для эксперимента по многочастотному (Ka, X, L) радиолокационному зондированию был выбран район добычи нефти Нефтяные Камни в Каспийском море. Экспериментальные данные сравнивались с результатами теории, что позволило оценить основные параметры нефтяной пленки и информативность используемых для зондирования диапазонов длин радиоволн.

#### Описание эксперимента

Радиолокационные съемки района Нефтяные Камни в Каспийском море были проведены 19 июля 1990 года многочастотным радиолокационным комплексом "МАРС", установленным на борту самолета ИЛ-18 [13]. Съемки проводились одновременно 3-мя радиолокаторами (Ka-SLAR, X-SLAR и L-SAR) с высоты 7200 м. Основные

характеристики комплекса "МАРС" приведены в табл. 1.

Погодные условия: легкая облачность, скорость ветра у поверхности моря 5-10 м/с. Достоверность результатов обеспечивалась повторной съемкой в идентичных условиях с интервалом 2-3 часа.

В качестве примера на рис. 1 приведено радиолокационное изображение исследуемого района в X-диапазоне длин волн, на котором в виде темных пятен видны покрытые нефтяной пленкой площади как вблизи источников загрязнения – нефтедобывающих вышек (яркие линии), так и вдали от них. Также на рисунке указаны горизонтальными стрелками строки изображения с чистым морем (а) и морем, покрытым нефтяной пленкой (б), и номера зон 1, 2, данные которых использованы при дальнейшем анализе.

Как видно из рис. 1, выбранная для экспериментов акватория Нефтяных Камней характеризуется сильной неоднородностью загрязнения, связанной с различием толщин и активности нефтяных пленок. Это дает возможность для более глубокого изучения эффекта влияния нефтяных пленок на морское волнение. Зоны 1 и 2 расположены достаточно далеко от эстакады (~5-7 км) и нефтяная пленка в них, по-видимому, близка по своим параметрам к свободной пленке.

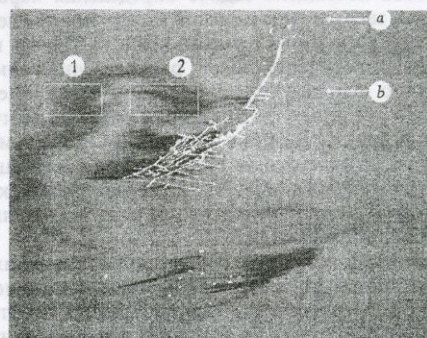


Рис. 1. Радиолокационное изображение ( $\lambda_E = 3,2$  см) района добычи нефти Нефтяные Камни в Каспийском море

Таблица 1

Тип радиолокатора	Длина волны, см	Средняя излучаемая мощность, Вт	Поляризация	Ширина полосы обзора, км	Пространственное разрешение, м	Вид обработки данных
РБО	0,8	4,5	VV, HH	15	30...50	бортовая
РБО	3,2	8,3	VV	45	20...50	бортовая
РСА	23	11,2	VV, HH VH, HV	30	2,5...25 25 ... 50	на земле бортовая

Оценка степени загрязнения велась по величине контраста, который определялся по формуле:

$$D = 10 \lg \left( \frac{V_r^2 - V_N^2}{V_S^2 - V_N^2} \right), \quad (1)$$

где  $D$  – контраст, дБ;  $V_r = \sqrt{U_r^2 + U_n^2}$  – среднеквадратичное значение амплитуды сигнала, принятого от загрязненного участка морской поверхности;  $V_S = \sqrt{U_S^2 + U_n^2}$  – среднеквадратичное значение амплитуды сигнала, принятого от чистой морской поверхности;  $V_N = \sqrt{U_n^2}$  – среднеквадратичное значение амплитуды шумов приемника.

#### Результаты эксперимента

На рис. 2 приведены примеры записи амплитуд радиолокационных сигналов X-SLAR по дальности (углу падения  $\Theta$ ), соответствующих строкам изображения, указанных стрелками на рис. 1 (а – отраженных от чистой морской поверхности, б – от загрязненной морской поверхности и с – шумов приемника). Статистически однородный по всей дальности сигнал, отраженный от чистого моря (см. рис. 2, а), свидетельствует об идентичности метеоусловий в пределах полосы обзора. Различия в зависимости ослабления сигнала, отраженного загрязненной морской поверхности, от угла падения  $\Theta$  (см. рис. 2, б) указывают на неоднородность нефтяной пленки в исследуемом районе. Уровень шумов приемника (см. рис. 2, в) контролировался регулярно после каждой серии измерений, а также при разворотах самолета.

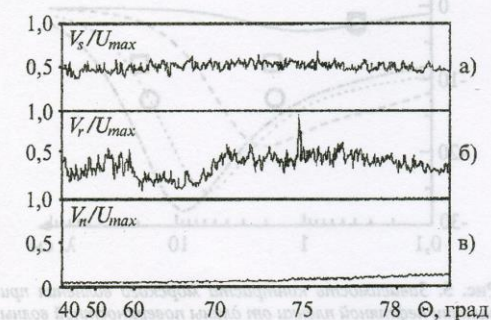


Рис. 2. Записи амплитуд радиосигналов при  $\lambda_E = 3,2$  см; а – принятых от чистой поверхности моря; б – принятых от загрязненной поверхности; в – шумы приемника

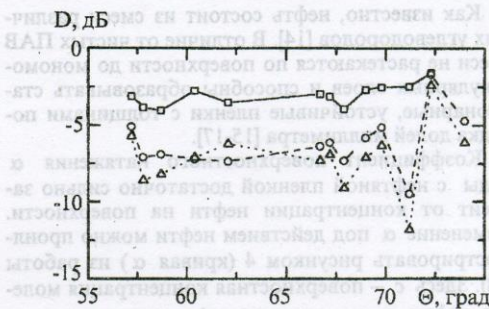


Рис. 3. Зависимость контраста морского волнения  $D$  от угла падения  $\Theta$  для различных зондирующих радиоволн:

—□—  $\lambda = 0,8$  см;  
 ---○---  $\lambda = 3$  см;  
 .....△.....  $\lambda = 23$  см

На рис. 3 приведены вычисленные по формуле (1) значения контрастов при различных углах падения  $\Theta$  для трех зондирующих волн ( $\lambda_E = 0,8$  см, 3,2 см, 23 см). Для расчетов были выбраны данные с участков загрязненной морской поверхности, в пределах которых не наблюдалось существенных изменений средних значений интенсивности радиолокационных сигналов. Поскольку измерения интенсивности сигналов, отраженных от чистой и загрязненной поверхностей, проводились практически одновременно, влияние аппаратных ошибок и ошибок, связанных с погодными условиями, при вычислении контраста исключалось. При этом среднеквадратичная ошибка вычисления контраста определялась только неоднородностью исследуемой поверхности и была менее 1 дБ.

Отметим, что, как видно из таблицы 1, все радиолокаторы комплекса имеют примерно одинаковое пространственное разрешение (размер ячейки разрешения не более  $50 \times 50$  м<sup>2</sup>) и, следовательно, ошибка определения контраста не зависит от частоты.

Обращают на себя внимание сравнительно небольшие значения контрастов ( $\leq -12$  дБ) и наличие точек пересечения кривых контрастов для длин волн 3,2 см и 23 см. Сравнительно слабая зависимость “миллиметрового” контраста от угла падения  $\Theta$  свидетельствует в пользу модели резонансного рассеяния радиоволн этого диапазона.

#### Теоретический анализ результатов экспериментов

Переходя к теоретическому анализу результатов экспериментов, остановимся прежде всего на свойствах нефтяных пленок.

Как известно, нефть состоит из смеси различных углеводородов [14]. В отличие от чистых ПАВ смеси не растекаются по поверхности до мономолекулярных слоев и способны образовывать стационарные, устойчивые пленки с толщинами порядка долей миллиметра [15-17].

Коэффициент поверхностного натяжения  $\alpha$  воды с нефтяной пленкой достаточно сильно зависит от концентрации нефти на поверхности. Изменение  $\alpha$  под действием нефти можно проиллюстрировать рисунком 4 (кривая  $\alpha$ ) из работы [18]. Здесь  $c$  – поверхностная концентрация молекул нефти, а  $c_0$  – минимальная концентрация, с которой начинается изменение  $\alpha$ . При  $c \ll c_0$  коэффициент поверхностного натяжения  $\alpha \approx 73$  дин/см (чистая вода), а при  $c \gg c_0$   $\alpha$  стремится к значению  $\alpha \approx 60$  дин/см, соответствующему границе раздела нефть-воздух.

Обсуждение приведенных выше экспериментальных данных проведено в рамках физической модели гашения поверхностных волн тонкой (в электродинамическом и гидродинамическом смысле) нефтяной пленкой. Для этого было использовано выражение из работы [12] для радиоконтраста  $D_0$  морского волнения под пленкой ПАВ в условиях резонансного рассеяния:

$$D_0 = 10 \lg \frac{\omega_0^2 \left( 1 - 2 \frac{\gamma_s}{\omega_s} \sqrt{\frac{\omega_s}{\gamma_0}} + 2 \frac{\gamma_s^2}{\omega_s^2} \left( \frac{\omega_s}{\gamma_0} \right)^2 \right)^2 \delta(k - 2k_E \sin \Theta)}{\omega_s^2 \left( 1 - \frac{\gamma_0}{\omega_s} \sqrt{\frac{\omega_s}{\gamma_0}} + \frac{\gamma_s^2}{\omega_s^2} \left( \frac{\omega_s}{\gamma_0} \right) + \frac{1}{2} \frac{\gamma_s^2}{\omega_s^2} \left( \frac{\omega_s}{\gamma_0} \right)^{3/2} \right)^2}, \quad (2)$$

где  $\omega_0$  и  $\gamma_0$  – частота и коэффициент затухания поверхностных волн для “чистого” моря;  $k$  – волновое число поверхностной волны.

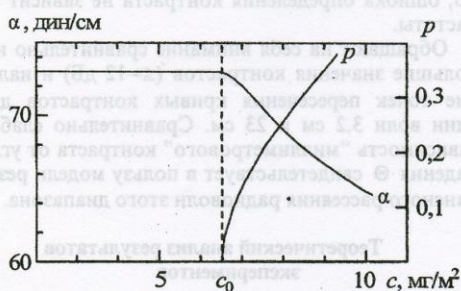


Рис. 4. Зависимость контраста морского волнения при наличии нефтяной пленки от длины поверхностной волны при различных значениях  $p$

Свойства поверхности с пленкой описываются ее коэффициентом поверхностного натяжения –  $\alpha$ , концентрацией ПАВ на поверхности –  $c$  и безразмерной поверхностной активностью (в дальнейшем просто – поверхностной активностью):

$$p = \frac{c}{\alpha} \frac{d\alpha}{dc} \quad (3)$$

Зависимость этой величины для воды с нефтяной пленкой от концентрации нефти представлена на рис. 4 (кривая  $p$ ).

Контраст  $D_0$  зависит от свойств пленки ПАВ через частоту поверхностных волн:

$$\omega_s = \left( gk + \frac{\alpha k^3}{\rho} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

и параметр

$$\gamma_s = p \frac{\omega_s^2}{\omega_s} \quad \left( \omega_s^2 = \frac{\alpha k^3}{\rho} \right), \quad (5)$$

учитывающий эффект растяжения пленки волной.

Волновое число поверхностной волны  $k$  связано с волновым числом  $k_E$  радиоволны и углом ее падения  $\Theta$  резонансным соотношением

$$k = 2k_E \sin \Theta, \quad (6)$$

что отражено в (2) наличием  $\delta$ -функции.

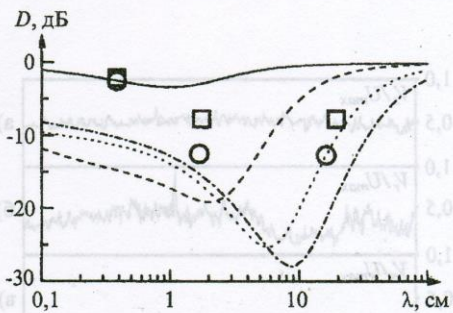


Рис. 5. Зависимость контраста морского волнения при наличии нефтяной пленки от длины поверхностной волны при различных значениях  $p$ :

- $p=0,02$ ;
- - -  $p=0,1$ ;
- · ·  $p=0,3$ ;
- · —  $p=0,5$
- – зона 1; ○ – зона 2

Для определения параметров пленки по данным эксперимента и проверки теоретической модели строились различные семейства зависимостей радиоконтраста  $D_0$ , задаваемого формулой (2), от угла падения радиоволны  $\Theta$ , от длины резонансной поверхностной волны  $\lambda$  и от поверхностной активности  $p$ . Рассчитанные зависимости контраста сопоставлялись с экспериментальными (см. рис. 3).

На рис. 5 представлены зависимости контраста  $D_0$  от длины поверхностной волны для диапазона изменения параметра  $p$ , оказавшегося наиболее подходящим для сравнения с экспериментом. Там же приведены характерные значения экспериментальных контрастов, рассчитанные в зонах 1 и 2 (рис. 1). Видно, что значения контраста для радиоволны  $\lambda_E = 23$  см в обеих зонах укладываются на теоретическую кривую, соответствующую поверхностной активности  $p = 0,3$ . При выборе этого значения оказалось важным то, что резонансные поверхностные волны, соответствующие радиоволне  $\lambda_E = 23$  см, являются гравитационными и, следовательно, экспериментальные точки должны укладываться на возрастающую ветвь контраста. Кроме того, вблизи этого значения активности теоретические кривые радиоконтрастов для радиоволны с длинами 3,2 см и 23 см могут "перемешаться", как это и наблюдается в эксперименте (рис. 3). Наличие пленки с такой поверхностной активностью на морской поверхности позволяет объяснить различие экспериментальных контрастов в зонах 1 и 2 (рис. 1) угловой зависимостью контраста морского волнения. Согласно рис. 4 этой активности соответствует поверхностная концентрация нефти  $c \approx 9$  мг/м<sup>2</sup>.

Характерные экспериментальные значения контрастов для радиоволн  $\lambda_E = 3,2$  см в зонах 1, 2 лежат выше теоретической кривой с параметром  $p = 0,3$ . Анализ показывает, что их нельзя совместить с какой-либо теоретической кривой, соответствующей одному значению  $p$ . Значения контрастов для зоны 1 (рис. 1) соответствуют параметру  $p = 0,05$ , для зоны 2 —  $p = 0,04$  с отклонением от теоретически рассчитанных значений на 3 и 7 дБ соответственно.

Экспериментальные значения контрастов для радиоволны  $\lambda_E = 0,8$  см укладываются на теоретическую кривую с  $p = 0,02$  и еще значительно (на 10 дБ) в обеих зонах отличаются от расчетных.

Таким образом, допуская возможное, но небольшое различие в концентрации в зонах 1 и 2, необходимо отметить заметное, увеличивающееся с уменьшением длины радиоволны  $\lambda_E$ , отклонение экспериментальных значений от теоретических (см. рис. 6).

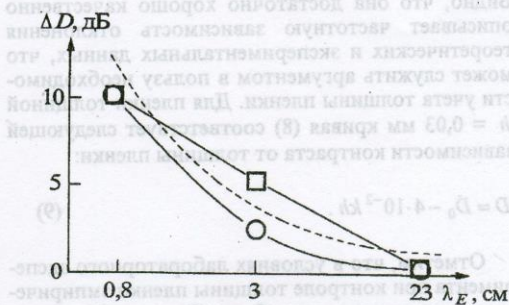


Рис. 6. Зависимость разности  $\Delta D$  между теоретическими и экспериментальными значениями контраста от длины волны;  $\square$  — зона 1;  $\circ$  — зона 2

Наблюдаемое расхождение теории с экспериментом может быть связано с эффектами, не учтенными теорией. Вместе с тем, характер зависимости отклонения наблюдаемого контраста от теоретического указывает прежде всего на влияние толщины пленки. В пользу этого говорят и данные экспериментов [7], проводившихся на растекающихся пятнах ПАВ, из которых следует, что с уменьшением толщины пленки величина контраста увеличивается. Исходя из этого и проведенного выше анализа, можно предположить, что толщина пленки, покрывающей акваторию, такова, что она незначительна для радиоволны длиной  $\lambda_E = 23$  см и начинает проявляться на более коротких радиоволнах. Это возможно, если толщина пленки становится сравнимой с глубиной затухания вязкой волны [12]:

$$\delta \sim \sqrt{\frac{2\nu_1}{\omega}}, \quad (7)$$

где  $\nu_1$  — коэффициент кинематической вязкости ПАВ;  $\omega$  — частота поверхностной волны. Оценки показывают, что для  $\nu_1 \approx 3 \cdot 10^{-1}$  см<sup>2</sup>/с, характерного для нефти [19], толщина пленки будет незначительной для радиоволн длиной  $\lambda_E = 23$  см и будет оказывать возрастающее влияние на контраст более коротких радиоволн, если ее величина порядка  $h \sim 0,1 \div 0,3$  мм.

Дальнейшее уточнение этой оценки возможно только в рамках более строгой теории, учитывающей влияние гидродинамической толщины пленки на контраст. Тем не менее, используя данные рис. 6, можно и сейчас указать некоторые полезные зависимости контраста от толщины пленки.

На рис. 6 пунктиром изображена зависимость

$$\Delta D = D_0 - D = 0,5/\delta. \quad (8)$$

Видно, что она достаточно хорошо качественно описывает частотную зависимость отклонения теоретических и экспериментальных данных, что может служить аргументом в пользу необходимости учета толщины пленки. Для пленки толщиной  $h = 0,03$  мм кривая (8) соответствует следующей зависимости контраста от толщины пленки:

$$D = D_0 - 4 \cdot 10^{-2} kh. \quad (9)$$

Отметим, что в условиях лабораторного эксперимента при контроле толщины пленки эмпирическая зависимость, подобная (8) или (9), может быть построена с необходимой точностью.

#### Выводы

Проведенный анализ данных трехчастотного эксперимента и теоретической модели может рассцениваться только как предварительный.

Вместе с тем, уже сейчас можно сделать некоторые выводы о постановке оптимального эксперимента и задач, связанных с дальнейшим развитием модели механизма влияния пленок ПАВ на радиоконтраст.

Зондирующая радиоволна длиной  $\lambda_E = 23$  см, которая рассеивается поверхностными волнами гравитационного интервала, может служить как бы "опорной" для обнаружения пленки с заметным контрастом и определения ее поверхностной активности.

Более короткие волны (особенно миллиметровые) чувствительны к детальной структуре пленки и процессам взаимодействия ее с ветром и волнами. Однако для получения с их помощью необходимой информации нужна хорошо разработанная модель, которая позволяла бы достоверно восстанавливать параметры пленки по данным эксперимента. И здесь необходимо прежде всего развитие теории по линии учета толщины пленки и влияния изменения резонансной частоты поверхностных волн на чистой и загрязненной поверхностях.

Количество радиоволн, требующихся для оптимального эксперимента, может быть определено лишь в рамках хорошей теоретической модели. Сейчас же на стадии ее отработки проведение многочастотных одновременных радиоизмерений является необходимым.

#### Литература

1. П. Кронберг. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии. Москва, Мир, 1988, 343 с.

2. D. L. Croom, D. T. Lecwellyn-Jones. Appl. Space Technol. 1986, 6, No. 1, pp. 97-100.  
 3. C. Elachi, J. Cimino, J. Crauser. Monit. Earth's Ocean, Land, and Atoms. Space Sens., Syst., and Appl. New York, N.Y., 1985, pp. 634-683.  
 4. K. Tomiyasu. Proc. IEEE. 1978, 66, No. 5, pp. 563-583.  
 5. K. Krishen. J. Geophys. Res. 1973, 78, pp. 1952-1963.  
 6. Ю. М. Галаев, А. И. Калмыков, А. С. Курекин, Ю. А. Лемент, Б. А. Нелепо, И. Е. Островский, А. П. Пичугин, В. В. Пустовойтенко, Ю. В. Терехин. Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1977, 13, № 4, с. 406-414.  
 7. S. P. Kraus, J. E. Estes, S. G. Atwater, J. R. Jensen, and R. R. Vollmers. Photogrammetric Eng. Remote Sensing. 1977, 43, pp. 1523-1531.  
 8. J. W. Johnson and W. F. Crosswell. Radio Science. 1982, 17, No. 3, pp. 611-617.  
 9. Г. Ламб. Гидродинамика. Москва-Ленинград, ГИТТЛ, 1953, 928 с.  
 10. F. G. Bass, S. A. Pusenko. Journal of Electromagnetic Waves and Application. 1994, 8, No. 7, pp. 859-870.  
 11. В. Г. Левич. Физико-химическая гидродинамика. Москва, ГИТТЛ, 1959, 669 с.  
 12. А. Г. Боев, Г. Э. Карвицкий. Радиофизика и радиоастрономия. 1997, 2, № 3, с. 281-291.  
 13. А. И. Калмыков, В. Н. Цымбал, А. Н. Блинков, А. С. Курекин, Г. П. Кулемин. Препринт АН УССР. Харьков, 1990, № 90-21, 35 с.  
 14. А. Ф. Добрянский. Химия нефти. Гостехиздат, 1961, 211 с.  
 15. Н. К. Адам. Физика и химия поверхностей. Гостехиздат, 1947, 552 с.  
 16. А. Адамсон. Физическая химия поверхностей. Москва, Мир, 1979, 568 с.  
 17. Д. А. Фридрихсберг. Курс коллоидной химии. Ленинград, Химия, 1984, 368 с.  
 18. С. А. Ермаков, Е. Н. Пелиновский, Т. Г. Талипова. Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана. 1980, 16, № 10, с. 1068-1076.  
 19. Е. П. Субботина. Сборник физических констант и параметров. Изд. ЛГУ, 1967, 148 с.

#### Estimate of Oil Film Parameters on Sea Surface by Means of Multifrequency Radaring

A. G. Boev, G. E. Karvitsky, A. Ya. Matveev, V. N. Cimbal

Comparative analysis of data obtained by simultaneous three-frequency radaring in the region of Oil Stones (the Caspian Sea) and the theory of radar sea contrast in the presence of surface active agent film was performed.

The surface activity, concentration of the oil film and the information that radiowave can carry were estimated. Recommendations on performing optimized experiment and the nearest tasks of the theory development are formulated.