

Пленки на морской поверхности и их дистанционное зондирование

С.А. Ермаков, И.А. Сергиевская, Л.А. Гуцин

*Институт прикладной физики РАН
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
Email: stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru*

Представлены данные лабораторных исследований физических характеристик пленок - коэффициентов поверхностного натяжения и упругости как для мономолекулярных пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ), так и для “толстых” нефтяных пленок. Проанализированы результаты натурных исследований оптическими и радиолокационными методами эффекта гашения ветровых гравитационно-капиллярных волн пленками (ПАВ) и нефтепродуктов. Приведены данные измерений, свидетельствующих об изменении доплеровских сдвигов радиолокационного сигнала в пленочных слайках. Даны теоретические оценки эффектов гашения волн пленками.

Введение

Изучение воздействия пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ) и нефтепродуктов (НП) на характеристики ветровых волн на морской поверхности в настоящее время представляет значительный интерес прежде всего в связи с задачами спутниковой диагностики океана, в том числе, с обнаружением и анализом антропогенных загрязнений, а также зон повышенной биологической продуктивности. При этом наибольший интерес представляет исследование спектров коротких волн с длинами порядка и менее 10 см, поскольку волны этого диапазона в значительной мере определяют сигналы обратного рассеяния как оптических систем, так и спутниковых радиолокаторов L-C-X-K-диапазонов. Несмотря на важность проблемы число контролируемых натурных экспериментов с пленками с известными физическими характеристиками, и, соответственно, полученные результаты весьма ограничены. В частности, пока отсутствует надежная количественная связь между степенью гашения (контрастом) в разных диапазонах спектра ветровых волн и характеристиками пленок, а также скоростью и направлением ветра, температурой воды и воздуха и т. д., поэтому задача дистанционной диагностики пленок в настоящее время не может считаться решенной.

Ниже дан краткий анализ результатов лабораторных исследований физических характеристик пленок ПАВ и НП, а также натурных экспериментов по дистанционному зондированию коротких ветровых гравитационно-капиллярных волн в присутствии пленок ПАВ и НП.

Исследование физических характеристик поверхностных пленок

Физические свойства пленок ПАВ и НП – коэффициент поверхностного натяжения (КПН) и упругость-исследовались на основе разработанного в ИПФ РАН метода, в котором указанные характеристики определяются по измерениям длины и коэффициента затухания параметрически возбуждаемых стоячих гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) [1, 2]. Как уже отмечалось выше, знание физических характеристик пленок необходимо для анализа результатов натурных экспериментов с искусственными слайками (см., например, [3-6]). Отметим, что ранее изучались лишь характеристики пленок ПАВ, свойства же пленок нефтепродуктов практически не исследовались, что существенно снижало ценность натурных экспериментов с НП.

Пленки ПАВ

Рассмотрим вначале результаты лабораторных исследований характеристик пленок ПАВ. Изучались пять различных ПАВ: олеиловый спирт (oleyl alcohol, OLA), додециловый спирт (dodecyl alcohol, DA), олеиновая кислота (oleic acid, OLE), растительное масло (vegetable oil, VO), жирный полимер ПАВ

(polyoxyalkylene glykol – “Emkarox”). В качестве примера на рис.1 приведены зависимости давления пленки (разности между КРН на чистой воде и на воде, покрытой пленкой), а на рис. 2 - упругости как функций концентрации ПАВ для OLE и Emkarox. Упругость мономолекулярных пленок рассчитывалась на основе теоретического выражения для коэффициента затухания (см. [7]) по измерениям последнего на частотах 15, 20, 25, 30 Гц.

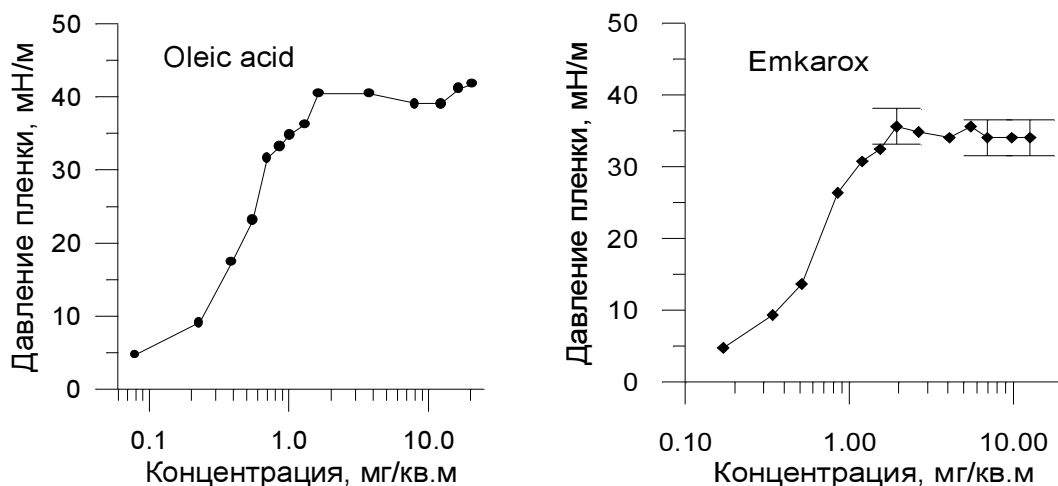


Рис. 1. Зависимости давления пленки от концентрации для мономолекулярных пленок ПАВ

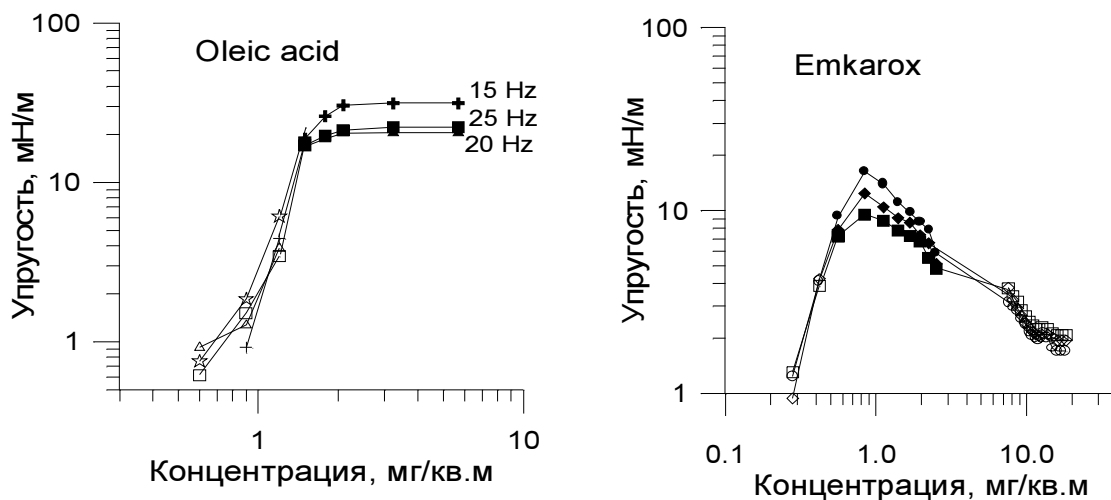


Рис. 2. Зависимости упругости от концентрации для мономолекулярных пленок ПАВ

Как следует из приведенных зависимостей, давление пленки монотонно растет, а КРН, соответственно, уменьшается с увеличением концентрации и достигает предельных постоянных значений при концентрациях порядка 1-2 мг/м², что отвечает состоянию насыщенным мономолекулярным слоям. Схожее поведение обнаруживает и упругость пленок жирных ПАВ за исключением полимера. При концентрациях более 1-2 мг/м² пленки VO, OLA, OLE и DA являются двухфазной системой, образуемой насыщенным

мономолекулярным слоем с плотной упаковкой молекул (соответствующие таким слоям предельные концентрации имеют значения 1-2 мг/м²) и микрокаплями, в которые “конденсируется” избыток ПАВ. Динамическая упругость таких двухфазных пленок на частотах, соответствующих частотам см-мм поверхностных волн, имеет максимальные значения, которые, при достаточно малой относительной площади поверхности капельной фазы, отвечают упругостям насыщенных монослоев и практически не меняются с ростом средней концентрации ПАВ. Упругость полимерной пленки Emkгох максимальна при концентрациях порядка 1 мг/м² и далее монотонно убывает, не превышая при больших концентрациях величин 2-5 мН/м. Возможные физические механизмы такого поведения довольно сложны и здесь не обсуждаются.

В натуральных экспериментах пленки ПАВ являются, как правило, насыщенными и, как следует из результатов лабораторных измерений, характеризуются постоянными значениями коэффициентов поверхностного натяжения и упругости (см. Таблицу 1).

Таблица 1. Параметры насыщенных пленок некоторых ПАВ

ПАВ	Emk	VO	OLA	OLE	DA
КПН, мН/м	39	40	36	32	22
Упругость, мН/м	2-5	12	15	22	70

Отметим, что пленки в сляках биогенного происхождения, видимых на морской поверхности, характеризуются достаточно большими значениями параметра упругости – обычно порядка 10-30 мН/м (см. [3]). Поэтому, пленки VO, OLA, OLE могут использоваться в натурном эксперименте для моделирования морских биогенных пленок.

Пленки нефтепродуктов

В отличие от чистых ПАВ, образующих мономолекулярные пленки, пленки нефтепродуктов многослойные и имеют значительную толщину. Толстые пленки характеризуются целым рядом параметров, в числе которых коэффициенты поверхностного и межфазного натяжений, поверхностная и межфазная упругости, объемная вязкость вещества пленки (поверхностная и межфазная вязкости, по-видимому, играют второстепенную роль, по крайней мере, при анализе эффектов воздействия пленок на волны гравитационно-капиллярного диапазона). Анализ затухания волн при наличии “толстых” (немономолекулярных) пленок выполнен в [8], где анализировалось дисперсионное уравнение и, в частности, коэффициент затухания линейных гравитационно-капиллярных волн на поверхности воды, покрытой слоем вязкой жидкости конечной толщины. Для не слишком толстых пленок (с толщиной меньше толщины вязкого поверхностного слоя в ГКВ) в выражение для дисперсионного соотношения входит суммарный коэффициент поверхностного и межфазного натяжений, именно он и определялся в ходе измерений параметрическим методом. Для определения же поверхностной и межфазной упругостей на основе измерения коэффициента затухания необходимы дополнительные предположения (например, независимость этих упругостей от частоты). Этот вопрос в настоящее время требует дальнейшего изучения.

В ходе лабораторных экспериментов исследовались пленки сырой нефти, дизельного топлива и керосина. Часть полученных результатов показана на рис. 3-6. Коэффициент затухания нормирован на величину затухания на чистой воде. Указаны значения частот ГКВ, на которых проводились измерения, а также температура воды.

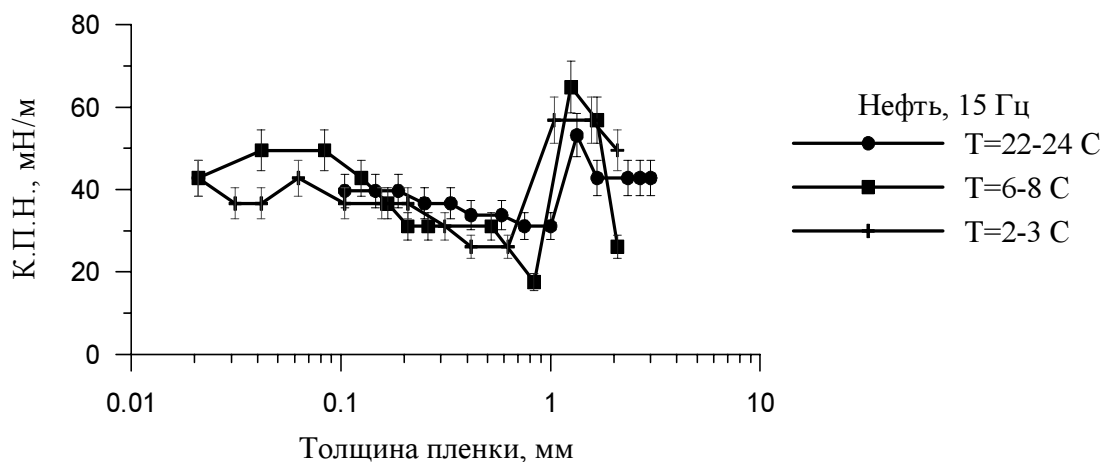


Рис. 3. Зависимости КПН от толщины для пленки сырой нефти

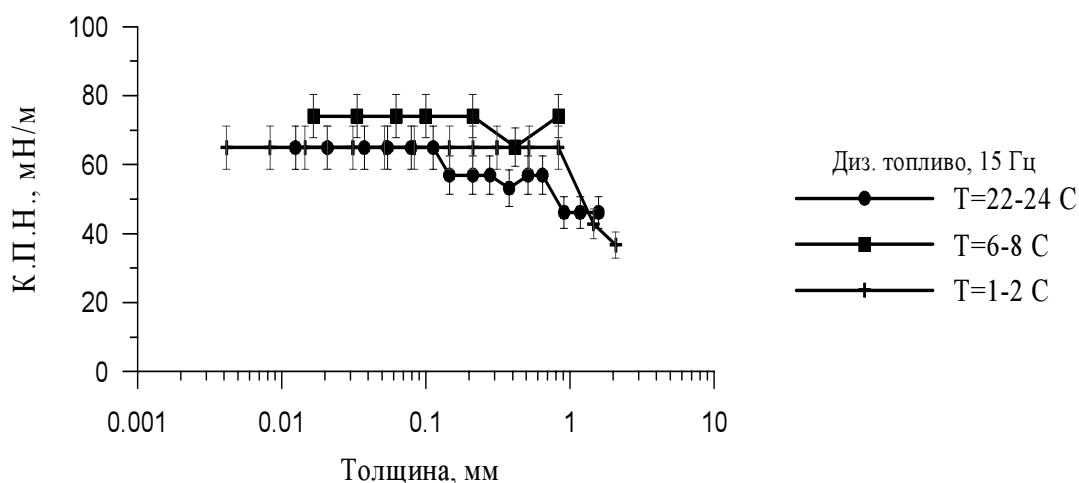


Рис. 4. Зависимости КПН от толщины для пленки дизельного топлива

Как следует из зависимостей, приведенных на рис.3 и рис.4, для дизельного топлива КПН монотонно уменьшается с увеличением толщины пленки, а для нефти изменение КПН носит немонотонный характер. Для обоих веществ КПН достигает предельных постоянных значений при толщинах плёнки порядка 2-3 мм.

В области значений толщины 0.001 мм - 0.3 мм КПН как функцию толщины h пленки можно аппроксимировать следующими эмпирическими зависимостями

$$\text{Сырая нефть } \sigma = \sigma_0 - 40 - 5.3 * \ln(h)$$

$$\text{Дизельное топливо } \sigma = \begin{cases} \sigma_0, & h < 0.01 \text{ mm} \\ \sigma_0 - 15 - 3.2 * \ln(h), & h > 0.001 \text{ mm} \end{cases}$$

$$\text{Керосин } \sigma = \begin{cases} \sigma_0 - 6 - 1.3 * \ln(h), & h < 0.1 \text{ mm} \\ \sigma_0 - 23 - 8.8 * \ln(h) \end{cases}$$

$$\sigma_0 = 70 \text{ мН/м.}$$

Относительный коэффициент затухания ГКВ имеет максимум при толщинах плёнок порядка 1 мм, и далее уменьшается, достигая предельного значения при толщинах пленок порядка 3 мм. Отметим, что, как показывает эксперимент, температура воды сравнительно слабо сказывается на величине относительного затухания. Сопоставление полученных экспериментальных результатов с моделью [8] (соответствующие кривые приведены на рис. 5 и 6) позволяет оценить основные физические характеристики пленок НП (см. таблица 2). Поверхностная и межфазная вязкость и упругость пленок при расчетах по модели [8] полагались равными нулю.

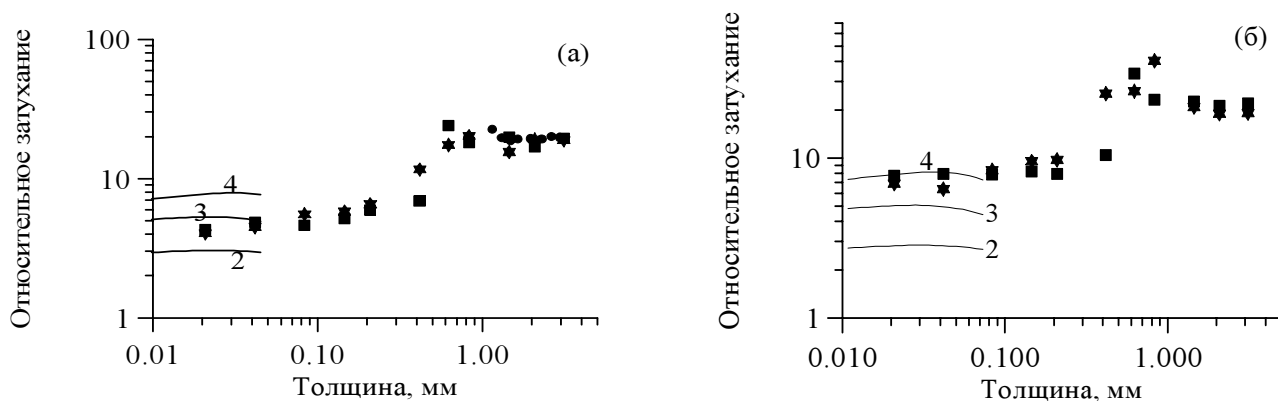


Рис. 5. Относительный коэффициент затухания для пленки сырой нефти на частотах ГКВ 27,5 Гц (а) и 15 Гц (б). Кривые – расчеты по модели [8] при относительной (нормированной на вязкость воды) вязкости пленки 22, цифры у кривых - поверхностная упругость пленки в мН/м

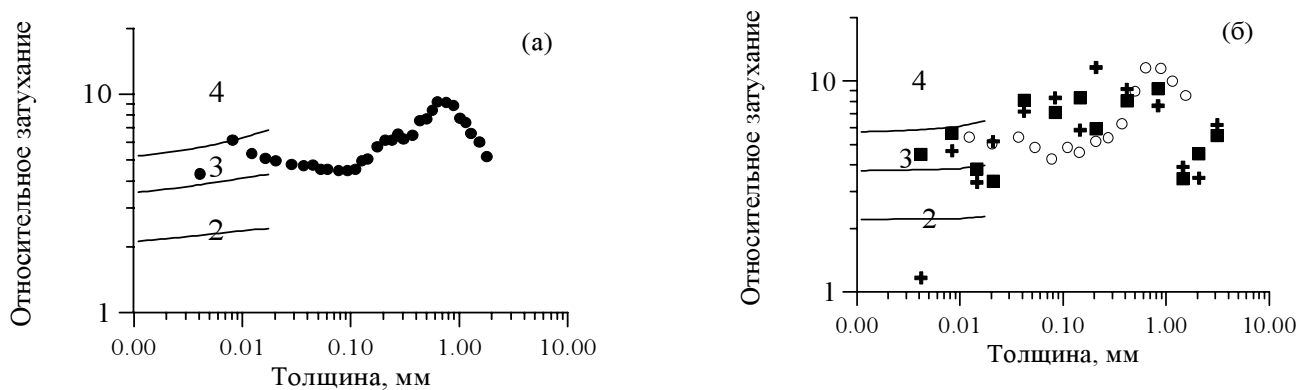


Рис. 6. То же, что на рис. 5, но для пленки дизельного топлива

Таблица 2. Характеристики пленок нефтепродуктов

Пленка	Поверхностное и межфазное натяжение	Межфазное натяжение, мН/м	Относительная вязкость	Поверхностная упругость, мН/м
Сырая нефть	См. рис. 3а	0-10	22	3-4
Дизельное топливо	См. рис. 4а	0-10	8	3-4

Гашение коротких ветровых волн пленками ПАВ и НП

Рассмотрим теперь результаты систематических экспериментов по исследованию ветрового волнения в слайках, выполненных в течение ряда лет в ИПФ РАН как со свайных оснований, так и с судна, с использованием скаттерометров X- и Ka-диапазонов (рабочие длины волн 3,2 см и 8,7 мм соответственно), а также оптических анализаторов спектра, позволяющих исследовать гашение ветрового волнения в широком диапазоне длин волн от единиц мм до десятка см. Представлены результаты как для мономолекулярных ("квазибиогенных") пленок ПАВ, так и для нефтяных разливов.

Пленки ПАВ

Радиолокационные наблюдения в экспериментах проводились в области углов падения, отвечающих брэгговскому (резонансному) механизму рассеяния, который хорошо описывает данные наблюдений морской поверхности в широком диапазоне углов падения электромагнитных волн θ от $20-25^\circ$ до $75-80^\circ$. При брэгговском рассеянии, как известно, интенсивность радиолокационного сигнала пропорциональна спектральной интенсивности ветровых волн с волновым числом

$$k_B = 2 k_{пл} \sin \theta \quad (1)$$

(волновой вектор k_B лежит в плоскости падения РЛ сигнала)

Из полученных в [3,6,9,10] результатов следует, что степень гашения волн в слике возрастает с ростом волнового числа поверхностных волн. Определим контраст как отношение интенсивности радиолокационного сигнала, отраженного от чистой поверхности, или спектральной интенсивности волн измеренной оптическим анализатором вне слика к соответствующим величинам сигналов в слике. На рис. 7 показана величина контраста для пленок растительного масла, при этом представлены вместе данные как оптических, так и радиолокационных измерений, для последних контрасты отнесены к значениям волнового числа, рассчитанным согласно (1).

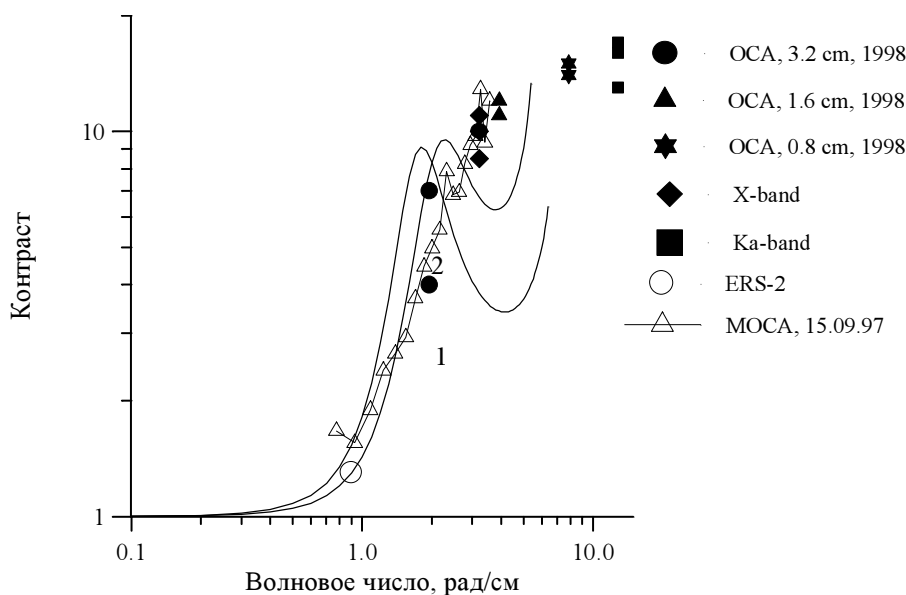


Рис. 7. Контрасты для слика растительного масла. Скорость ветра 7-8 м/с. Сплошная кривая – модельный расчет. Кривая 1 - упругость 12 мН/м, КППН - 40 мН/м, кривая 2 - упругость 10 мН/м, КППН - 44 мН/м

Значение контраста, отвечающего волновому числу 0,9 рад/см на рис.7 получено в ходе эксперимента, выполнявшегося синхронно с пролетом спутника ERS-2. При этом наряду с измерениями волнения оптическими анализаторами и радиоскаттерометрами X- и Ka- диапазонов с океанографической платформы МГИ было получено спутниковое PCA-изображение искусственного слика в C-диапазоне (рис.8), на основе которого и рассчитан соответствующий контраст.

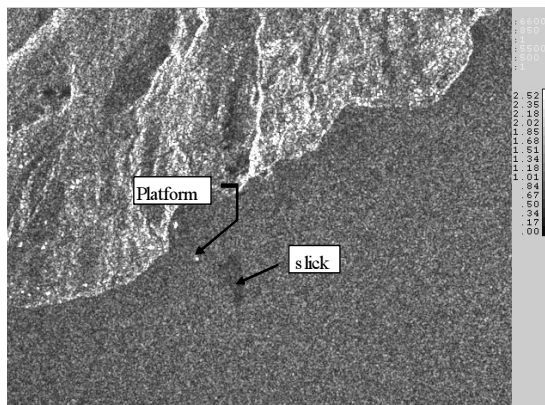


Рис. 8. PCA-изображение масляного слика со спутника ERS-2

Из полученных данных следует, что контраст растет с уменьшением длины ветровых волн и достигает максимума для волн мм-диапазона (Ka-диапазон радиолокаторов).

Что касается зависимости контраста от характеристик пленок, в частности, от параметра упругости пленки, то, согласно имеющимся данным, в диапазоне сантиметровых волн контраст растет с ростом упругости (см. рис. 9). Следует отметить, однако, что этот вывод основан на довольно ограниченном объеме данных и, возможно, применим лишь в ограниченном диапазоне упругостей.

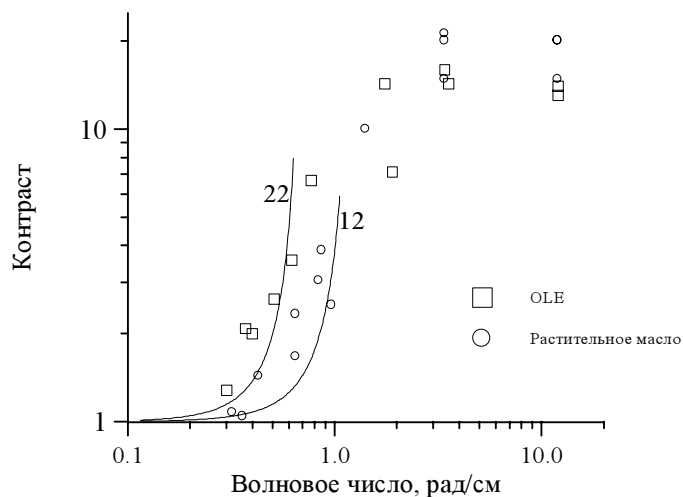


Рис. 9. Контрасты для волн см-диапазона для пленок олеиновой кислоты и растительного масла. Скорость ветра 6 м/с. Сплошные линии – расчет по формуле (6). Цифры у кривых – упругость пленки в мН/м, КПН 40 мН/м

Что касается волн миллиметрового диапазона, то, хотя контрасты, измеренные радиоскаттерометром Ka-диапазона весьма велики (см. рис.10), зависимость их от упругости пленок ПАВ по имеющимся данным пока установить не удастся: различие в измеренных величинах контрастов для пленок с различной упругостью оказалось, во всяком случае, сравнимым с разбросом в экспериментальных данных. Можно

лишь полагать, что эта зависимость является сравнительно слабой. Очевидно, что контраст зависит также от скорости ветра, однако количественно эта зависимость пока не изучена.

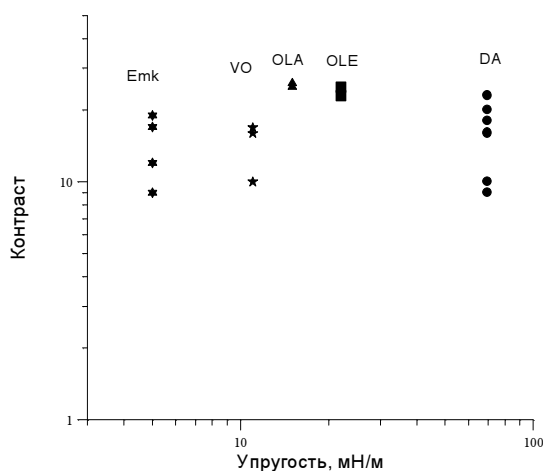


Рис. 10. Контрасты в Ка-диапазоне для пленок с различной упругостью. Скорость ветра 6-8 м/с

Пленки нефтепродуктов

Результаты измерений контрастов оптическими анализаторами спектра, а также скаттерометрами X- и Ка –диапазонов, полученные в ходе экспериментов ИПФ РАН с разливами нефти и дизельного топлива представлены на рис.11. Здесь же для сравнения показаны контрасты для мономолекулярных пленок OLE и VO.

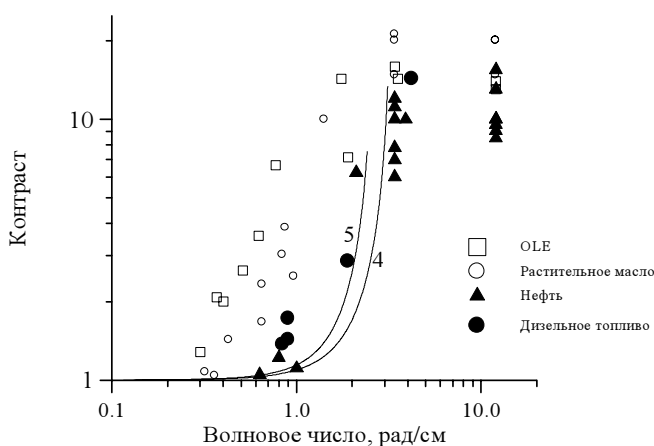


Рис. 11. Спектральный контраст для пленок ПАВ и нефтепродуктов. Скорость ветра 6-7 м/с. Сплошные линии – расчет по формуле (6). Цифры у кривых – упругость пленки в мН/м. КПП=40 мН/м

Несмотря на большой разброс полученных в ходе экспериментов величин контрастов, видно, что контраст растет с уменьшением длины волн радиолокатора и что гашение волнения пленками нефтепродуктов слабее, чем мономолекулярными пленками органических ПАВ. По нашим оценкам, толщины пленок НП в экспериментах находились в диапазоне 1-10 мкм, что отвечает области сравнительно тонких вязкоупругих пленок, для которых и проводились оценки параметра упругости, приведенные в предыдущем разделе.

Приведенные на рис.11 контрасты определялись по интенсивностям сигналов, усредненных по масштабу слайка. Однако, следует отметить, что, в отличие от слайков, образуемых мономолекулярными пленками ПАВ и характеризующихся довольно высокой степенью однородности гашения и резкими

границами, слики нефтепродуктов весьма неоднородны. В разливах НП можно выделить две характерные части: область с плавно растущей степенью гашения волнения и область сильного почти постоянного гашения, при этом последняя соответствует видимой глазом радужной пленке. Область радужной пленки, однако, наблюдалась не всегда; гашение здесь велико и сравнимо с гашением волн мономолекулярными пленками ПАВ (см. рис.12).

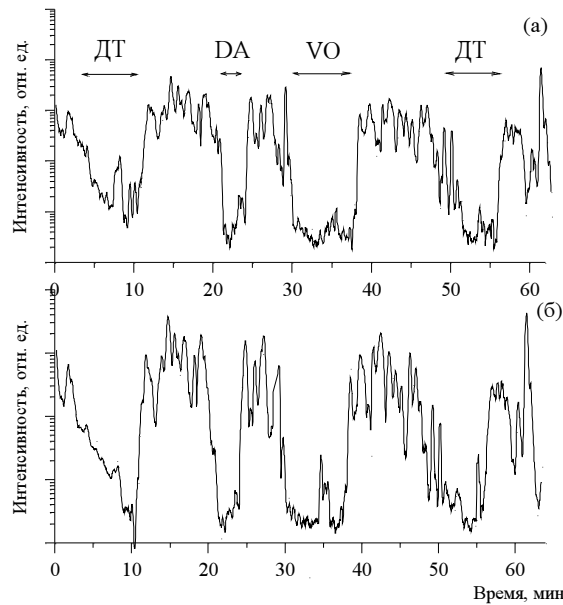


Рис. 12. Пример записи интенсивность сигнала обратного рассеяния в экспериментах 11.10.03 на Черном море (ИОО ИО РАН) с мономолекулярными пленками DA и VO и дизельного топлива (ДТ)

Измеренные контрасты приведены в таблице 3. Контраст в сликах ДТ рассчитывался усреднением по всей области слика, контрасты в областях с радужной пленкой обычно порядка и более 100. Отметим, что такие контрасты соответствуют уровням радиолокационного сигнала, сравнимым с уровнем шумов, поэтому погрешность при определении их величины очень велика.

Таблица 3. Контрасты в разливах дизельного топлива и для мономолекулярных ПАВ

Вещество	Контраст, Ка-диапазон	Контраст, X-диапазон	
ДТ1(13.10.03)	7	4	
ДТ2(13.10.03)	10	5	
ДТ3(13.10.03)	9	10	Радуга
ДТ4 (13.10.03)	10	6	Радуга
ДТ5(11.10.03)	20	13	Радуга
ДТ7 (11.10.03)	35	16	Радуга
ДТ8 (12.10.03)	8	6	
OLE(13.10.03)	25	39	
OLE(13.10.03)	20	12	
VO(13.10.03)	30	30	
VO(13.10.03)	>100	>100	
VO(11.10.03)	>100	>100	
DA.(11.10.03)	>100	40	

Как отмечено выше, наибольшие контрасты в разливах НП соответствуют центральным зонам с радужными границами. Оценки толщины пленки, соответствующей появлению интерференционной радужной картины, дают величины порядка 150 – 200 нм. Можно заключить, поэтому, что разлив НП состоит из области толстой пленки (оценка на основе величины площади, ограниченной радужной областью и количества вылитого вещества дает значения толщины порядка 1 – 10 мкм) и области тонкой пленки с толщиной порядка и менее 0,1 мкм. Качественно эффект сильного гашения в области “толстой” пленки объясняется приведенными выше данными лабораторных измерений. Сопоставление результатов показывает, что коэффициенты затухания для толстых пленок НП и для мономолекулярных пленок ПАВ имеют сравнимые величины, соответственно, и контрасты имеют близкие значения. Как следует из приведенных в предыдущем разделе данных лабораторных экспериментов, имеется тенденция к уменьшению коэффициента затухания для пленок НП с толщинами меньше 10 мкм. Естественно ожидать, что и контрасты для пленок НП будут уменьшаться с уменьшением толщины. К сожалению, в лабораторных экспериментах пленки НП малой толщины (порядка и менее 1 мкм), однако, в дальнейшем предполагается исследовать и эту область толщин и дать объяснение различию в величинах контрастов в разных частях разливов НП.

Теоретический анализ.

При анализе воздействия ПАВ на ветровые волны необходимо учитывать приток энергии от ветра, стоки энергии из-за вязкости, обрушений и т.д., а также нелинейные волновые взаимодействия. Анализ показывает, однако, что для ветровых волн сантиметровых и миллиметровых длин волн характерные времена нелинейных волновых взаимодействий больше, чем инкременты роста из-за ветра и декременты затухания из-за вязкости, так что в первом приближении взаимодействия волн можно не учитывать и полагать, что спектр ветровых волн формируется в результате локального по спектру баланса источников и стоков энергии волн. Выражение для спектрального контраста волн (отношения спектральных интенсивностей волнения на чистой воде и в слике) может быть при этом записано в виде (см. [3, 6]

$$K(k) = \left[\frac{\beta(u_{*nsl}, k) - \gamma(0, \sigma, k)}{\beta(u_{*sl}, k) - \gamma(E, \sigma, k)} \right]^n, \quad n=1 \text{ при } \beta > \gamma, \quad n=-1 \text{ при } \beta < \gamma \quad (2)$$

где β - инкремент роста ветровых волн, γ - коэффициент затухания волн, E - упругость, u_* - “скорость трения”, зависящая от скорости ветра. При расчете контрастов согласно приведенному выражению использовалась эмпирическая аппроксимация для инкремента роста волн см-мм-диапазона [11], коэффициент затухания волн на тонких (мономолекулярных) упругих пленках вычислялся согласно [7]; для нефтяных пленок - по модели [8]. Спектральные контрасты, рассчитанные по формуле (6) приведены на рис. 7, 11 сплошными линиями. Рассчитанные в рамках рассмотренной модели контрасты передают общий закон гашения пленками ветровых волн см-диапазона. Что касается диапазона мм-волн, то здесь необходимо дальнейшее развитие модели с учетом, в частности, эффекта гашения паразитной ряби в сликах.

Доплеровские сдвиги частоты радиолокационных сигналов в сликах

Остановимся еще на результатах исследований эффекта изменения доплеровских сдвигов частоты радиолокационных сигналов в сликах, который впервые был обнаружен в [12] для пленок ПАВ. В [12] было установлено, что доплеровские сдвиги радиолокационных сигналов Ка- и X – диапазонов в присутствии мономолекулярных пленок изменяются, причем величина изменения доплеровского сдвига зависит от упругости пленки, скорости ветра и длины радиоволн. Объяснение данного эффекта основано на селективном гашении вынужденной ряби см-мм-диапазона (в частности, паразитной капиллярной ряби), возбуждаемых нелинейными гравитационными волнами дм-см-диапазона, что приводит к изменению результирующей фазовой скорости брэгговских волн и соответствующему изменению радиолокационных доплеровских сдвигов.

В ходе дополнительных экспериментов проведенных в августе 2004 г. на Черном море в ЮО ИО РАН, а также на Горьковском водохранилище в 1999-2001 гг. данный эффект изучался также и для пленок НП. В ходе обработки данных доплеровский сдвиг определялся как средняя частота “центра тяжести” текущего частотного спектра радиолокационного сигнала, рассчитываемого на временах, меньших периодов длинных ветровых волн, если таковые наблюдались на морской поверхности. Примеры записи текущих доплеровского сдвига и интенсивности сигнала 8,7 мм и 3.2 см скаттерометров в двух разных экспериментах представлены на рис.13. На рис.14,15 представлены контрасты и изменения доплеровских сдвигов в сликках, полученные в разных экспериментах. Видно, что разность доплеровских сдвигов в сликке и фоне различается для разных ПАВ.

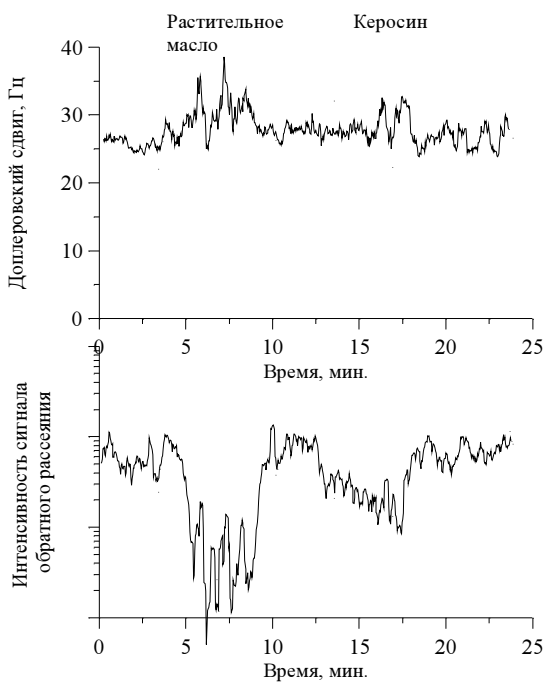


Рис. 13. Зависимость текущих доплеровского сдвига и интенсивности сигнала скаттерометра X-диапазона в эксперименте с искусственными сликками 30.09.04. Скорость ветра 3 м/с

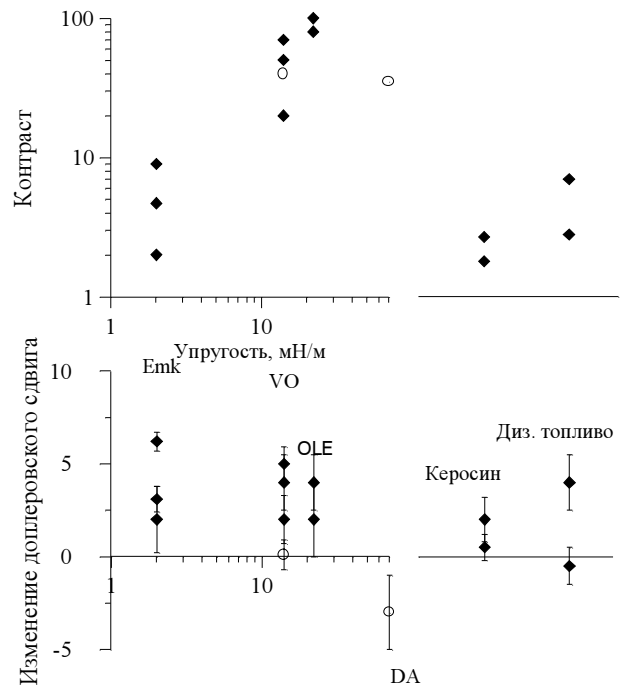


Рис. 14. Контрасты и доплеровские сдвиги для скаттерометра X-диапазона для пленок ПАВ с различной упругостью и для нефтепродуктов эксперименты 2004г. Скорость ветра 2-3 м/с. Точки без заполнения – додециловый спирт (скорость ветра 7 м/с) и растительное масло (скорость ветра 5 м/с), 1997 г

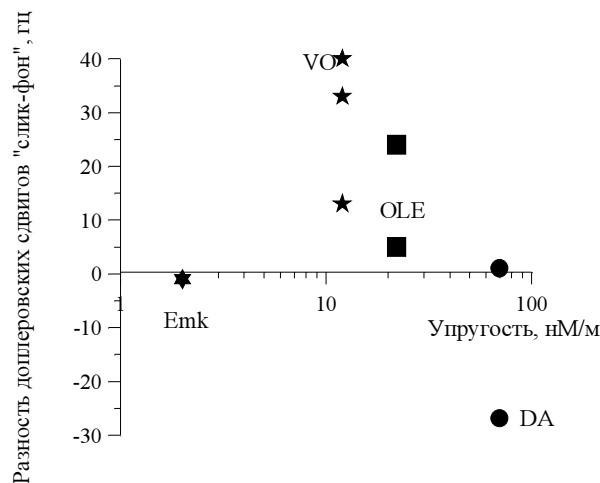


Рис. 15. Зависимость доплеровского сдвига скаттерометра Ka-диапазона от упругости пленки в экспериментах на Горьковском море 1999-2001 гг. Скорость ветра 6-8 м/с

Заметим, что при анализе как контрастов, так и доплеровских сдвигов весьма интересно проанализировать не только средние, но и текущие их значения. Если упругость используемых в экспериментах пленок монотонно растет с концентрацией ПАВ (или толщиной для пленок НП), как для большинства пленок, то естественно полагать, что гашение волн будет возрастать в направлении к центру слика, а доплеровский сдвиг, соответственно, монотонно изменяться, что обычно и наблюдается в экспериментах. Однако, упругость полимерной пленки Emkarox, как было показано в первом разделе, максимальна при сравнительно небольших концентрациях (порядка 10 мН/м при 1 мг/кв.м) и убывает до величины 2 мН/м. Следует ожидать тогда, что степень гашения волн а, следовательно, и доплеровский сдвиг будут немонотонно меняться при прохождении слика Emkarox. Это и наблюдается в эксперименте, как показано на рис. 16, где представлена зависимость текущих доплеровского сдвига и интенсивности сигнала 3.2 см скаттерометров при прохождении слика Emkarox (скорость ветра 2 м/с). Видно, что на краю слика наблюдается сильное гашение, соответствующее, видимо, большим значениям упругости, а в центре слика гашение слабое, видно также, что изменение доплеровского сдвига р.л. сигнала на краю слика и в его центре различно.

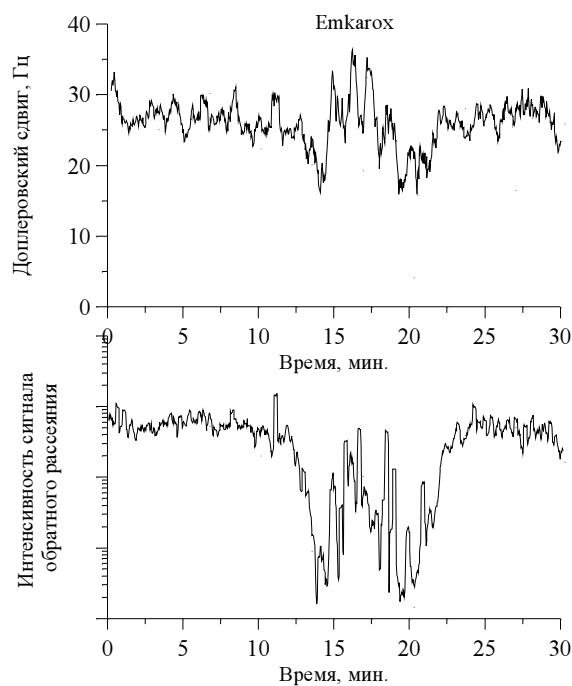


Рис. 16. Зависимость текущих доплеровского сдвига и интенсивности сигнала 3.2 см скаттерометров в сликe Emkarox. Скорость ветра 2 м/с

Заключение

Основные выводы работы

Лабораторные исследования физических характеристик пленок ПАВ и нефтепродуктов показали, что величины упругости пленок НП небольшой толщины (< 10 мкм) существенно меньше, чем у пленок ПАВ, имитирующих типичные морские биогенные пленки, вязкость пленок НП с такой толщиной слабо влияет на коэффициент затухания гравитационно-капиллярных волн.

Контраст для мономолекулярных пленок ПАВ растет с уменьшением длины ветровых волн и имеет максимум в мм-диапазоне, при этом контраст для см-волн в целом увеличивается с ростом упругости пленок, зависимость контраста от упругости пленок ПАВ для мм-волн является достаточно слабой.

Зависимость контраста от длины волны для пленок нефтепродуктов небольшой толщины аналогична случаю мономолекулярных пленок, контрасты же для пленок НП меньше чем для “биогенных” пленок.

Основным физическим механизмом воздействия пленок на ветровые волны см-диапазона является затухание волн, обусловленное упругостью мономолекулярных пленок, и вязкоупругостью пленок НП. Имеющиеся теоретические модели, а также результаты лабораторных измерений характеристик пленок позволяют провести расчеты (по крайней мере, оценочные) эффекта гашения волн и соответствующих радиолокационных контрастов в пленочных слайках.

В слайках происходит изменение доплеровских сдвигов радиолокационных сигналов как Ка-, так и Х-диапазонов, эффект существенно зависит от параметра упругости пленок и определяется различными механизмами гашения вынужденных и свободных поверхностных волн.

Из анализа результатов экспериментов можно заключить, что для повышения эффективности радиолокационной диагностики пленок, включающей обнаружение, оценку физических характеристик пленок и различение “биогенных” пленок и нефтяных разливов, целесообразно использование многочастотных РЛ систем. При этом для некогерентных РЛ систем измерения интенсивности обратного рассеяния в Ка-диапазоне (как наиболее чувствительном к эффекту гашения волнения пленками) позволит эффективно обнаруживать пленки, а измерения в более длинноволновых РЛ каналах (в частности, в L-, C- и X-диапазонах) – дать оценку величин характеристики пленок, в частности, их упругости. Результаты измерений доплеровских сдвигов радиолокационных сигналов при использовании когерентных радиолокаторов можно использовать для повышения надежности оценок упругости пленки.

Авторы благодарят Ю.Б.Щеголькова и Н.И.Василиненко за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 05-05-64137, 04-05-64763), ИИТАС (проект 03-51-4987), а также проекта Научной школы акад. В.И. Таланова.

Литература

1. Ермаков С.А., Кияшко С.В., Коннов И.Р. О возможности определения параметра упругости поверхностно-активных пленок по измерению затухания стоящих капиллярно-гравитационных волн Изв.АН. ФАО. 1996. Т.32. № 4. С. 544-547.
2. DaSilva J.C., S.A. Ermakov, I.S. Robinson, D.R.G. Jeans and S.V. Kijashko, Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf. 1. Short-period internal waves. Journal of Geophys. Research., vol. 103, C4, 8009-8031, 1998.
3. Ermakov, S.A., A.M.Zujkova, A.R. Panchenko, S.G.Salashin, T.G.Talipova, V.I.Titov, Surface film effect on short wind waves, Dyn. Atmos. Oceans, v10, 31-50, 1986.
4. Gade, M., W.Alpers, H. Huehnerfuss, H. Masuko, and T. Kobayashi, Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR, J.Geophys.Res., v.103, No.C9, pp.18,851-18,866, 1998.
5. Gade, M., W.Alpers, H.Huehnerfuss, V.Wismann, and P.Lange, On the reduction of the radar backscatter by oceanic surface films: Scatterometer measurements and their theoretical Interpretation, Rem.Sens. Environ., v.66 (1): 52-70, 1998.
6. Ermakov, S.A., S.G. Salashin, and A.R.Panchenko, Film slicks on the sea surface and some mechanisms of their formation, Dyn. Atmos. Oceans, 16 (3-4), 279-304, 1992.
7. Lucassen-Reynders E.N., Lucassen J. Properties of capillary waves // Adv.Colloid Interface Sci. 1969. V. 2. N 4. P.347-395.
8. Jenkins A., S. Jakobs, Wave damping by a thin layer of viscous fluid, Phys. Fluids, 9(5), 1256-1254, 1997.
9. Ермаков С.А., Зуикова Э.М., Салашин С.Г., Трансформация спектров коротких ветровых волн в пленочных слайках, Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, т.23, N7, 707-715, 1987
10. Ermakov,S.A., E.M. Zuikova, I.A. Sergievskaya, Yu.B. Shchegolkov, S.V. Kijashko, A.G. Luchinin, J.C. da Silva, N. Stapleton, and J.C. Scott, Radar and Optical Measurements of Damping of Small-Scale Wind Waves in Artificial Slicks, in Proc.IGARSS'97, pp.1323-1327, IEEE, Piscataway, N.J., USA, 1997.
11. Plant W.J., A relationship between wind stress and wave slope, J.Geophys. res., 1961-1967.
12. Ермаков, И.А. Сергиевская, Э.М. Зуикова, С.В. Кияшко, Ю.Б. Щегольков, Об эффекте изменения доплеровских сдвигов частоты радиолокационных сигналов в присутствии органических пленок на морской поверхности, Доклады АН, 2003, т.388, №1, с.109-112.