

## Экспериментальное исследование разрушения поверхностных пленок обрушивающимися гравитационными волнами. Предварительные результаты

С.А. Ермаков<sup>1,2</sup>, И.А. Капустин<sup>1</sup>, Т.Н. Лазарева<sup>1</sup>, О.В. Шомина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия*  
*E-mails: stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru, kia@hydro.appl.sci-nnov.ru*

<sup>2</sup>*Волжский государственный университет водного транспорта,  
Нижний Новгород, 603950, Россия*

Изучение механизмов разрушения нефтяных разливов, а также естественных биогенных пленок в условиях сильного ветра и интенсивного волнения является весьма важным для задач дистанционного зондирования океана. Устойчивость пленок к разрушению при ветроволновом воздействии должна зависеть от их физических характеристик, поэтому наличие или отсутствие сликов на морской поверхности может дать информацию о характеристиках и природе пленок. В работе представлены результаты натуральных и лабораторных исследований механизма разрушения пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ) интенсивными поверхностными волнами. Получено, что для пленок биогенной природы в областях обрушений волн имеет место уменьшение концентрации ПАВ, проявляющееся в увеличении коэффициента поверхностного натяжения, по крайней мере, при сравнительно невысоких уровнях концентрации биомассы (фитопланктона) в воде. Механизм разрушения пленки в зоне обрушений гравитационных волн промоделирован в условиях контролируемого лабораторного эксперимента с искусственными поверхностными пленками. Аналогично результатам натуральных наблюдений показано, что в областях обрушающихся гребней волн происходит увеличение коэффициента поверхностного натяжения, свидетельствующее о разрушении пленки за счет вертикального перемешивания, связанного с генерацией турбулентности при обрушении.

**Ключевые слова:** пленки поверхностно-активных веществ, ветровые волны, слики, турбулентность, дистанционное зондирование

### Введение

Исследование динамики нефтяных разливов, а также естественных биогенных пленок в условиях сильного ветра и интенсивного волнения представляется весьма важным для задач дистанционного зондирования океана. В литературе, однако, не удается найти сколько-нибудь детальных количественных исследований механизмов вырождения сликов с ростом скорости ветра (см. обширную библиографию в Scott, Thomas, 1999; Gade, Huehnerfuss, Korenowski, 2006), кроме утверждений, что при больших скоростях ветра (5-7 м/с, а иногда и меньше) пленка обычно рвется. Следует отметить, что концентрация поверхностно-активного вещества модулируется в поле орбитальных скоростей гравитационных волн, данный эффект наблюдался экспериментально для волн достаточно малой амплитуды (см. Lange, Huehnerfuss, 1984), сильные же вариации концентрации ПАВ, тем более разрывы пленки, при этом не изучались. Как показывают натурные наблюдения (см., например, Монин, Краицкий, 1985), пленочные слики биогенной природы, связанные, например, с цветением фитопланктона (Ермаков et al., 2013), разрушаются обычно при скоростях ветра, превышающих 5-6 м/с, большие нефтяные разливы могут наблюдаться и при скоростях порядка 10 м/с и выше. Одной из причин разрушения сликов могут быть флуктуации скорости ветрового дрейфового течения из-за ветровых порывов на масштабе слика, приводящие к разрывам пленки. Другими возможными механизмами являются компрессия слика индуцированными течениями от ветровых волн, в результате чего может происходить “конденсация” пленки в микрокапли (для мономолекулярных пленок – Ермаков, 2010), и вертикальное перемешива-

ние образовавшейся эмульсии приповерхностной турбулентностью в слое ветрового дрейфа, а также турбулентное перемешивание поверхностно-активных веществ (ПАВ) в областях обрушений ветровых волн, зонах сильной турбулентности в следе надводного судна (Ермаков, Капустин, 2009) и прочее. Следует заметить, что поскольку устойчивость пленок к разрушению при ветроволновом воздействии должна зависеть от их физических характеристик, то наличие или отсутствие сликов на морской поверхности может дать информацию о характеристиках и природе пленок. Поэтому анализ физических механизмов разрушения пленочных сликов представляет значительный интерес в задачах дистанционного зондирования морской поверхности.

В настоящей работе представлены результаты первых исследований механизма разрушения пленок ПАВ интенсивными (обрушающимися) поверхностными волнами. Приведены результаты натуральных исследований воздействия обрушений поверхностных волн на биогенные пленки. Описаны лабораторные модельные исследования разрушения пленок ПАВ интенсивными гравитационными волнами. Дан качественный анализ результатов экспериментов.

## **Натурные исследования**

### *Методика исследований*

Натурные исследования пленочных сликов проводились в 2014 г. на Горьковском водохранилище с борта судна-лаборатории ИПФ РАН, специально сконструированного для выполнения широкого круга гидрометеорологических измерений, в том числе взятия и анализа проб пленок на поверхности воды. Поскольку обрушения ветровых волн не в ураганных условиях представляют собой сравнительно редкие события (доля обрушающихся гребней волн мала), пробы пленок брались в области обрушений носовой корабельной волны на ходу судна, а также практически одновременно в невозмущенных (“фоновых”) участках водной поверхности, отстоящих на 1-1,5 м от области обрушений. При взятии проб использовалась разработанная ранее сеточная методика (см., например, Ермаков, 2010). Ранее (Ermakov et al., 2013) была установлена корреляция между характеристиками биогенных пленок и концентрацией биомассы, в связи с чем представлялось интересным проводить измерения концентрации фитопланктона в приповерхностном слое воды одновременно с взятием проб биогенных пленок. Измерения концентрации фитопланктона проводились при помощи зонда YSI6600, оснащенного датчиком концентрации сине-зеленых водорослей.

### *Результаты*

Как показали обработка и анализ проб пленок, в области обрушений волн в целом имеется тенденция увеличения коэффициента поверхностного натяжения (КПН) при сравнительно невысоких уровнях концентрации биомассы в воде (см. рис. 1), что указывает на перенос ПАВ с поверхности в подповерхностные слои воды. При больших концентрациях

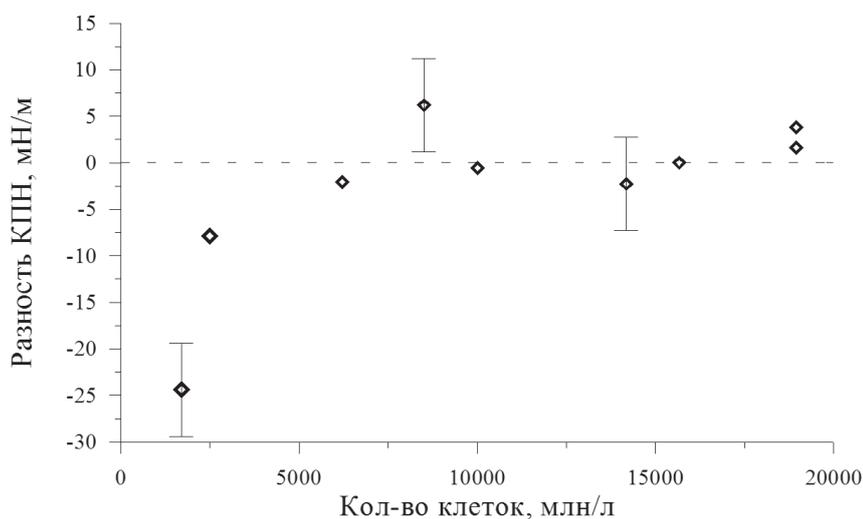


Рис. 1. Разность КПН поверхности воды с “фоновой” пленкой и с пленкой в обрушающихся волнах при различных концентрациях фитопланктона

фитопланктона различия величин КПН для проб пленок вне и внутри зон обрушений оказываются существенно меньшими и сопоставимы с ошибками измерений. Данный результат пока является предварительным, для получения более статистически обоснованных выводов требуются дальнейшие измерения.

### Лабораторные эксперименты

#### Методика экспериментов

Лабораторные исследования влияния обрушающихся волн на пленки ПАВ проводились в кольцевом ветроволновом бассейне ИПФ РАН. Для возбуждения волн с сильным обрушением гребня использовался эффект дисперсионного сжатия волнового пакета с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). По мере распространения такого пакета в силу зависимости скорости спектральных компонент гравитационных волн от частоты на некотором расстоянии от волнопродуктора происходит фокусировка волны (см., например, Ermakov, Kapustin, Sergievskaya, 2012). Выбором диапазона и скорости изменения частоты можно добиться значительного увеличения амплитуды отдельных колебаний в ЛЧМ пакете в области дисперсионной фокусировки. В экспериментах частота колебания волнопродуктора менялась от 1,95 Гц (амплитуда волны при этом составляла 2,5 см) до 1,22 Гц (амплитуда 1,5 см). При этом амплитуда волны в точке фокусировки достигала 5 – 6 см, что отвечает значениям крутизны, при которых происходит сильное обрушение волны. На рис. 2а показаны примеры записей профилей ЛЧМ пакета в области его генерации и вблизи области максимальной фокусировки, полученные по данным измерений струнными волнографами. В условиях экспериментов за счет выбора скорости изменения частоты в пакете достигалось регулярное обрушение волны на заданном расстоянии от точки генерации пакета (в эксперименте это расстоя-

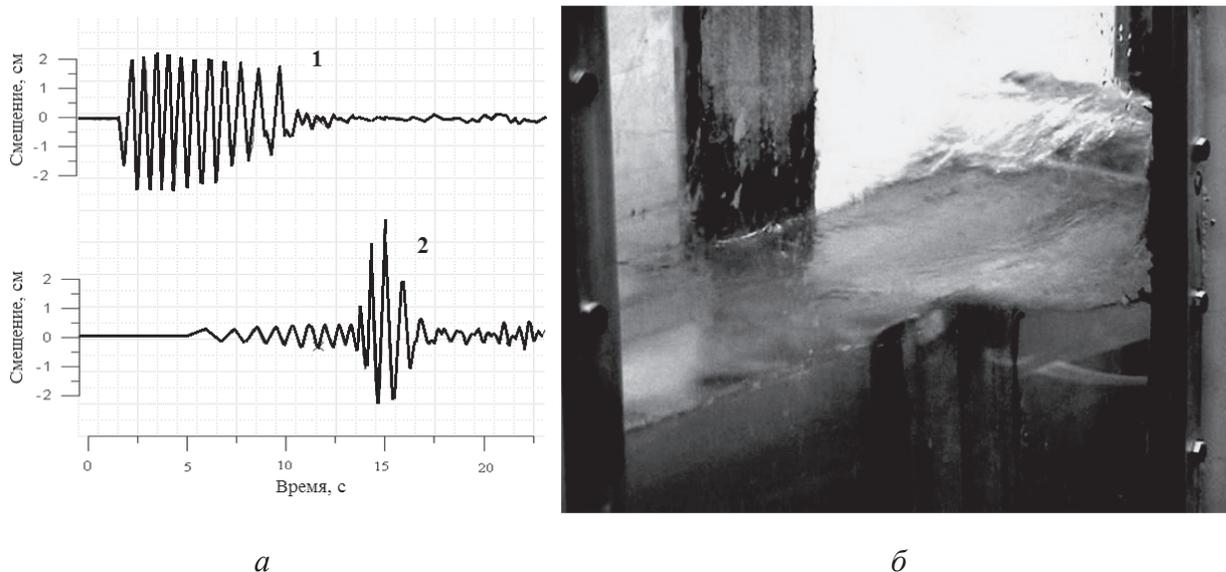


Рис. 2. а – Профили ЛЧМ-волны вблизи волнопродуктора (1) и в области максимальной фокусировки (2); б – фотография волны м-диапазона с обрушением гребня, соответствующая (2)

ние составляло 9-10 м). В силу особенностей экспериментальной установки, связанных с ограничениями на длительность возбуждаемого ЛЧМ пакета и на скорость модуляции его частоты, волновой цуг в области фокусировки содержал два колебания достаточно большой амплитуды и, соответственно, одно – два следующих друг за другом сильных обрушения. Фотография обрушающегося гребня показана на рис. 2б. Оценка крутизны обрушающихся волн дала величину, близкую к 0,25, что характерно для обрушений типа “spilling” (см., например, Rapp, Melville, 1990).

Взятие проб пленок ПАВ производилось с использованием сеточной методики (см. выше), модифицированной для возможности одновременного использования нескольких сеток. Сетки (общим числом 5 штук) закреплялись на длинной штанге через каждые 20 см. В момент обрушения штанга опускалась к поверхности воды так, чтобы положение средней сетки соответствовало участку сильного обрушения волны, а остальных – соответствующим расстояниям по обе стороны от обрушения. Это позволяло, учитывая, что общая область взятия проб сетками по величине сравнима с длиной обрушающихся поверхностных волн, фактически проследить вариации характеристик пленки по профилю волн. За время взятия проб (0,2 – 0,3 с) профиль волны смещается на расстояние около 20-25 см, такого же порядка составляет и ошибка в привязке положения пробы к профилю волны. После взятия пробы ПАВ с сеток растворялись в спирте высокой степени очистки и затем переносились на поверхность дистиллированной воды в специальной кювете. Далее для каждой сеточной пробы методом параметрических волн определялся коэффициент поверхностного натяжения (КПН) воды, покрытой пленкой. Важно отметить, что площадь сеток и размеры кюветы были подобраны так, чтобы концентрация ПАВ в реконструированной в лабораторных условиях пленке отвечала концентрации ‘in situ’.

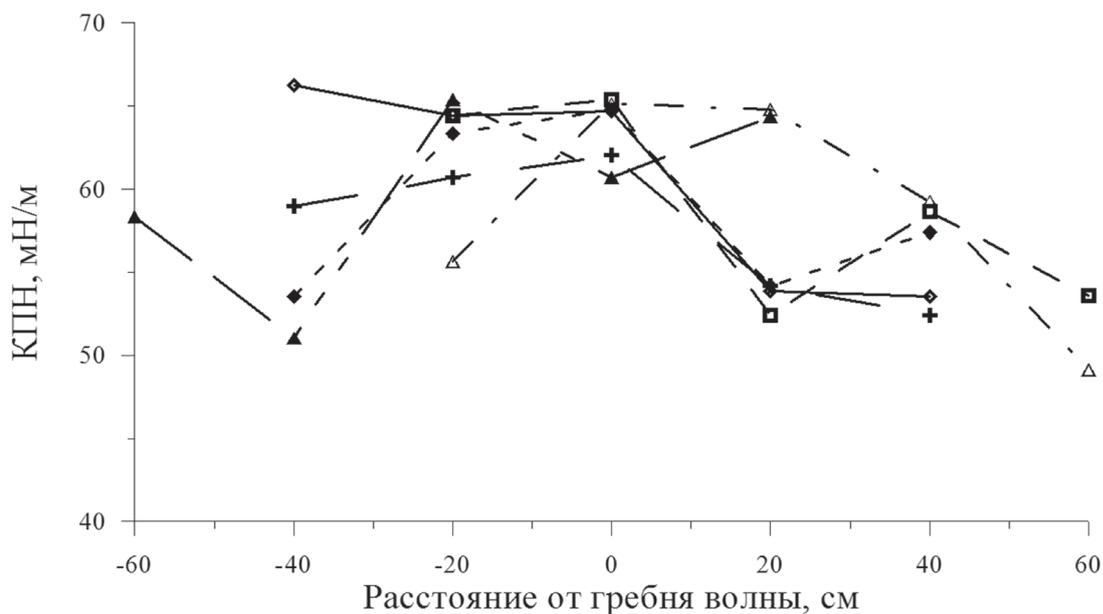


Рис. 3. КПП воды с пленкой ПАВ на профиле обрушающейся поверхностной волны. Положение обрушающегося гребня отвечает  $t.0$  на горизонтальной оси, волна распространяется справа налево

### Результаты

Результаты измерений КПП вдоль профиля обрушающихся волн с использованием методики одновременного взятия проб пятью сетками приведены на рис. 3. Видно, что на гребне обрушающейся волны величины КПП возрастают, что указывает на уменьшение концентрации ПАВ на поверхности воды вблизи этой точки. Полученный результат качественно согласуется с данными натуральных наблюдений.

### Обсуждение результатов

Вариации ПАВ в поле поверхностной волны можно описать на основе уравнения баланса для концентрации, которое в пренебрежении релаксационными и диффузионными процессами принимает в одномерном случае следующий вид:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [\Gamma \cdot U] = 0, \quad (1)$$

где  $U(x, t)$  – орбитальная скорость частиц жидкости на поверхности воды,  $\Gamma$  – концентрация ПАВ. Для стационарной поверхностной волны  $U(x, t) = U(x - Ct)$ , бегущей с фазовой скоростью  $C$ , из (1) получаем:

$$\frac{\Gamma}{\Gamma_0} = \left[ 1 - \frac{U(x - Ct)}{C} \right]^{-1}. \quad (2)$$

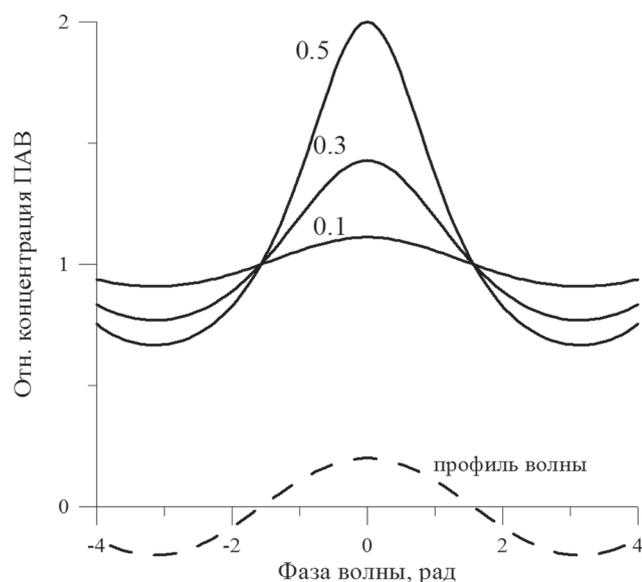


Рис. 4. Относительная концентрация Г/Г0 ПАВ в разных фазах синусоидальной поверхностной волны. Числа у кривых отвечают значениям величины максимума ( $U/C$ )

Поскольку орбитальная скорость максимальна на гребнях волны, то, как следует из (2), концентрация ПАВ должна возрастать на гребнях волны и уменьшаться во впадинах. Это схематически показано на рис. 4.

Отметим, что для волны даже синусоидального профиля вариации концентрации несимметричны – рост концентрации на гребне превышает падение на впадине, причем асимметрия растет с ростом амплитуды волны. Эта асимметрия еще сильнее выражена, если профиль волны сам несимметричен и величины скорости на гребне больше, чем их абсолютные значения во впадинах. Учитывая, что коэффициент поверхностного натяжения уменьшается с ростом концентрации, можно ожидать его существенного снижения на гребнях волны.

Следует учесть, однако, что для волн при достаточно большой их крутизне возникает обрушение гребня, последнее сопровождается генерацией турбулентной области (Rapp, Melville, 1990). Этот процесс может приводить к вертикальному перемешиванию ПАВ и, соответственно, к разрушению пленки. Поскольку при этом поверхность “очищается” от ПАВ, можно ожидать роста КПН, что и продемонстрировали описанные выше эксперименты.

### Заключение

В ходе натурных наблюдений исследовано влияние обрушений интенсивных поверхностных волн на характеристики биогенных пленок. Установлено, что в области обрушения волн происходит увеличение коэффициента поверхностного натяжения воды, что указывает на разрушение пленки и перенос ПАВ за счет турбулентного перемешивания в подповерхностные слои воды. Отмечено, что эффект изменения КПН при обрушениях волн зависит от уровня биогенного загрязнения (концентрации фитопланктона) и уменьшается с ее увеличением.

В условиях контролируемого лабораторного эксперимента с искусственными пленками ПАВ промоделирован механизм разрушения пленки в зоне обрушений гравитационных волн. Показано, что в отличие от предсказываемого теорией эффекта возрастания концентрации ПАВ на гребнях для необрушающихся волн, при обрушении наблюдается возрастание КПН и, следовательно, уменьшение концентрации ПАВ в области обрушивающихся гребней. Обнаруженный в лабораторном эксперименте эффект согласуется с данными натурных наблюдений.

Важность полученного результата обусловлена необходимостью развития моделей проявлений на морской поверхности динамических процессов в приповерхностных слоях океана и атмосферы, в первую очередь в приложении к развитию методов дистанционного зондирования океана из космоса.

В дальнейшем предполагается продолжение данных исследований с целью более надежного статистического обоснования сделанных выводов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 14-05-00876а, 14-05-10075к, 14-05-31535 мол\_а).

## Литература

1. *Ермаков С.А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н.Новгород: ИПФ РАН. 2010. 164 с.
2. Ермаков С.А., Капустин И.А., О законе расширения турбулентного следа за надводным судном // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 1. № 6. С. 364-372.
3. *Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 376 с.
4. *Ermakov S.A., Kapustin I.A., Lazareva T.N., Sergievskaya I.A., Andriyanova N.V.* On the possibilities of radar probing of eutrophication zones in water reservoirs // *Izvestiya atmospheric and oceanic physics*. 2013. V. 49. № 3. P. 307-314
5. *Ermakov S.A., Kapustin I.A., Sergievskaya I.A.* On peculiarities of scattering of microwave radar signals by breaking gravity-capillary waves // *Radiophysics and quantum electronics*. 2012. T. 55. № 07. P. 500-509.
6. *Lange P., Huehnerfuss H.* Horizontal surface tension gradients induced in monolayers by gravity water wave action // *J. Phys. Oceanogr.* 1984. V. 14. P. 1620-1629.
7. *Gade M., Huehnerfuss H., Korenowski G.* Marine surface films. Springer, 2006. 341 p.
8. *Rapp R.J., Melville W.K.* Laboratory measurements of deep-water breaking waves // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1990. V. A311. P. 735 – 800
9. *Scott J.C., Thomas N.H.* Sea surface slicks - surface chemistry and hydrodynamics in radar remote sensing // *Wind-over-wave couplings. Perspectives and prospects*. Clarendon Press, Oxford. 1999. P. 221-229.

# Experimental investigation of surfactant film destruction due to breaking gravity waves. Preliminary results

S.A. Ermakov <sup>1,2</sup>, I.A. Kapustin <sup>1</sup>, T.N. Lazareva <sup>1</sup>, O.V. Shomina <sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia*

*E-mails: stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru, kia@hydro.appl.sci-nnov.ru*

<sup>2</sup>*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod 603950, Russia*

Investigation of the destruction processes of oil spills, as well as natural biogenic films under strong wind wave conditions is very important for the problem of ocean remote sensing. Stability of slicks to the impact of wind and waves is supposed to depend on their physical characteristics, that is why the presence or absence of slicks on the sea surface can provide information about characteristics and origin of films. This paper presents results of field and laboratory studies of destruction of surfactant films due to intensive surface waves. It is found that the concentration of biogenic surfactants is reduced in the wave breaking areas which is indicated by higher values of the surface tension coefficient, at least at moderate biomass (phytoplankton) concentrations. A film destruction mechanism in wave breaking zones has been investigated in laboratory experiment with artificial surface films. Similar to the results of the field studies, it is shown that the surface tension coefficient grows in the areas of breaking wave crests demonstrating vertical film mixing due to turbulence generated by wave breaking.

**Keywords:** surfactants, slicks, wind waves, breaking, turbulence, remote sensing

## References

1. Ermakov S.A. *Vliyanie plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln* (Influence of films on the dynamics of gravity-capillary waves), N.Novgorod: IPF RAN, 2010, 164 p.
2. Ermakov S.A., Kapustin I.A. O zakone rasshireniya turbulentnogo sleda za nadvodnym sudnom (On the law of turbulent ship wake expansion), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 1, No. 6, pp. 364-372.
3. Monin A.S., Krasitskii V.P. *Yavleniya na poverkhnosti okeana* (Phenomena on the ocean surface), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 376 p.
4. Ermakov S.A., Kapustin I.A., Lazareva T.N., Sergievskaya I.A., Andriyanova N.V. On the possibilities of radar probing of eutrophication zones in water reservoirs, *Izvestiya atmospheric and oceanic physics*, 2013, Vol. 49, No. 3, pp. 307-314.
5. Ermakov S.A., Kapustin I.A., Sergievskaya I.A. On peculiarities of scattering of microwave radar signals by breaking gravity-capillary waves, *Radiophysics and quantum electronics*, 2012, Vol. 55, No. 07, pp. 500-509.
6. Lange P., Huehnerfuss H. Horizontal surface tension gradients induced in monolayers by gravity water wave action, *J. Phys. Oceanogr*, 1984, Vol. 14, pp. 1620-1629.
7. Gade M., Huehnerfuss H., Korenowski G. *Marine surface films*. Springer, 2006, 341 p.
8. Rapp R.J., Melville W.K. Laboratory measurements of deep-water breaking waves, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1990, Vol. A311, pp. 735 – 800.
9. Scott J.C., Thomas N.H. Sea surface slicks - surface chemistry and hydrodynamics in radar remote sensing, *Wind-over-wave couplings. Perspectives and prospects*. Clarendon Press, Oxford, 1999, pp.221-229.