О гребенчатой структуре границ сликов на морской поверхности

С.А. Ермаков¹, О.Ю. Лаврова², И.А. Капустин¹, А.В. Ермошкин¹, А.А. Мольков¹, О.А. Даниличева¹

 Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия E-mail: stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru
 Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

Представлены результаты анализа наблюдений гребенчатых структур на границах сликов на морской поверхности с использованием спутниковых радиолокационных изображений, а также данных натурных экспериментов с искусственными сликами с океанографической платформы на Чёрном море. Установлено, что эти структуры формируются на наветренной границе сликов и характерны как для плёнок нефтепродуктов, так и для биогенных плёнок. Гребенчатые структуры ориентированы практически параллельно ветру; для длинных сликовых полос, например сбросов с движущегося судна, направление которых близко к направлению ветра, структуры не наблюдаются. Характерные поперечные масштабы «гребёнок» близки к масштабам ветровых полос — ленгмюровских циркуляций. Предложено физическое объяснение механизма формирования гребенчатых структур, основанное на перераспределении вещества плёнки в поле течений, связанных с ленгмюровскими циркуляциями. Последние в поперечном к ветру направлении характеризуются наличием квазипериодических конвергентно-дивергентных течений, которые при определённых условиях приводят к разрыву плёнки у наветренной границы слика в зонах дивергенции и накоплению вещества плёнки в конвергентных зонах. Теоретические оценки масштабов изрезанности границ сликов показывают неплохое согласие с результатами наблюдений.

Ключевые слова: морская поверхность, плёночные слики, радиолокация океана, ленгмюровские циркуляции

Одобрена к печати: 05.12.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-208-217

Введение

Изучение геометрии сликов, связанных с наличием на морской поверхности как антропогенных загрязнений, в частности плёнок нефтепродуктов, так и поверхностно-активных веществ (ПАВ) биогенного происхождения, представляет значительный интерес, в том числе при решении задач дистанционного зондирования океана (Лаврова, Митягина, 2012; da Silva et al., 1998; Ermakov et al., 1992; Gade et al., 2013; Lavrova, Mityagina, 2013; Marmorino et al., 2008; Onstott, Rufenach, 1992). Форма сликов, их эволюция содержат информацию как о гидродинамических процессах в приповерхностных слоях океана и атмосферы, так и о природе и характеристиках плёнки. Эволюция сликов на сравнительно небольших временах (десятки минут) после попадания нефтепродуктов или ПАВ на водную поверхность и на масштабах порядка $10-10^2$ м определяется в значительной степени процессами растекания плёнки, которые, в свою очередь, сильно зависят от физических характеристик вещества плёнки — сил поверхностного натяжения и вязкости. Эти процессы изучались в ряде исследований (см., например (Fay, 1969; Phillips, 1997)), а также сравнительно недавно в работах (Ермаков и др., 2016, 2017; Ermakov et al., 2015, 2018), где учитывалось влияние ветрового волнения на растекание плёнок. Что касается динамики плёнок на больших временных и пространственных масштабах, то здесь важную роль в формировании формы сликов и их эволюции играют различные геофизические процессы, такие как внутренние волны, неоднородные течения, ветровой дрейф и др. (см. (Ермаков, 2010; da Silva et al., 1998; Ermakov et al., 1992) и цитированную литературу). В работе (Marmorino et al., 2008), в частности, описаны наблюдения плёночных сликов на морской поверхности (предположительно, биогенной природы) с использованием ИК- и радиолокационных средств с высоким пространственным разрешением, позволившие выявить некоторые особенности формы сликов и их трансформации вплоть до разрушения в условиях растущего ветра. Одной из таких особенностей является изрезанность границы слика и формирование на ней характерных «гребенчатых структур» (ГС). Заметим, что подобные структуры можно найти в целом ряде других оптических или радиолокационных панорам, в основном спутниковых, при достаточно высоком их пространственном разрешении. Однако до сих пор результаты сколько-нибудь детальных исследований характеристик и природы ГС в литературе не представлены и описание ГС ограничивается по сути лишь статьёй (Marmorino et al., 2008). Настоящая работа посвящена дальнейшему исследованию гребенчатых структур на границах плёночных сликов с использованием данных как спутниковых радиолокационных наблюдений сликов, так и дистанционных наблюдений ГС в ходе натурных экспериментов с искусственными сликами с океанографической платформы. Проведён анализ результатов выполненных наблюдений, предложено физическое объяснение механизма формирования ГС.

Спутниковые наблюдения

Рассмотрим вначале ряд примеров спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ), иллюстрирующих наличие ГС на границах сликов. В данной работе были использованы РЛИ, полученные радиолокаторами с синтезированной апертурой (SAR), установленными на спутниках Sentinel-1A, -1B. Пиксельное разрешение составляло 10 м.

На *рис. 1* представлено изображение сликовой полосы, очевидно образующейся в результате сброса вод, содержащих нефтепродукты, с движущегося судна. Судно двигалось в направлении, почти перпендикулярном восточному ветру, скорость которого составляла 3–4 м/с. Видна ГС на наветренной границе сликовой полосы. Отметим, что ГС отсутствует вблизи судна и далее развивается с расстоянием.



Рис. 1. Пример развития гребенчатых структур на сликовой полосе, образованной в результате сброса вод, содержащих нефтепродукты, с движущегося судна. Фрагмент РЛИ участка акватории западной части Чёрного моря, полученного SAR-C Sentinel-1В 5 октября 2018 г. в 04:13:37 GMT. Белые стрелки указывают направление устойчивого восточного ветра, скорость которого составляла 3–4 м/с. Белая точка в нижней части следа — судно, с которого осуществлялся сброс загрязнённых вод



Рис. 2. Пример отсутствия гребенчатых структур на сликовой полосе для случая, когда направление ветра совпадало с направлением движения судна. Фрагмент РЛИ участка акватории западной части Чёрного моря, полученного SAR-C Sentinel-1B 5 ноября 2018 г. в 04:05 GMT. Белые стрелки указывают направление северо-восточного ветра, скорость которого не превышала 3 м/с. Яркая белая точка — судно, ответственное за сброс



Рис. 3. Разлив нефти в районе нефтепромысла «Нефтяные камни» в Каспийском море. Жёлтая стрелка указывает на проявления гребенчатых структур. Белые стрелки показывают направление северо-западного ветра. Яркие белые точки — нефтедобывающие платформы и суда. Фрагмент РЛИ, полученного SAR-C Sentinel-1A 23 октября 2018 г. в 02:36 GMT

Другой пример судового сброса приведён на *рис. 2.* Здесь судно двигалось практически вдоль ветра и ГС в слике отсутствуют, наблюдается только некоторое растекание вод, содержащих нефтепродукты, по поверхности моря. Скорость ветра для данного случая составляла менее 3 м/с.

Ещё один характерный пример представлен на рис. 3.



Рис. 4. Проявление гребенчатых структур на наветренных границах спиралевидных биогенных сликов на радиолокационном изображении SAR-C Sentinel-1В акватории Гданьского залива Балтийского моря, полученном 10 августа 2017 г. в 07:31 GMT. Стрелки указывают направление ветра

На РЛИ, полученном в районе нефтепромысла «Нефтяные Камни» в Каспийском море, где постоянно наблюдаются обширные области нефтяных загрязнений, отчётливо проявляются ГС в области сужения нефтяного пятна (отмечены на *рис. 3* жёлтой стрелкой). Как и в первом рассмотренном случае, они образовались с наветренной стороны нефтяного разлива. Скорость северо-западного ветра составляла 4–5 м/с.

Гребенчатые структуры в сликах можно видеть не только на судовых сбросах или разливах нефти, но и в структуре биогенных сликов, образующихся, например, в зонах интенсивного размножения фитопланктона. Пример спиралевидных сликов, связанных с биогенными плёнками и маркирующих приповерхностные морские течения, приведён на *рис. 4*. Как видно из рисунка, на наветренной стороне наиболее контрастных и протяжённых сликовых полос видны ГС, ориентированные навстречу ветру и исчезающие по мере того, как спираль разворачивается параллельно скорости ветра.

Эксперименты с искусственными сликами

Эксперименты с искусственными сликами 2018 г. выполнялись со стационарной океанографической платформы (СОП) в октябре. В качестве ПАВ для формирования плёночных сликов использовалась олеиновая кислота. ПАВ разливалось с моторной лодки на расстоянии порядка 100—200 м от СОП с её наветренной стороны. Во время разлива ПАВ лодка двигалась по спиральной траектории для достижения более равномерного распределения ПАВ по слику. Фотография одного из сликов, включающая его наветренный край, приведена на *рис. 5*, где отчётливо видна гребенчатая структура границы. Скорость ветра в эксперименте составляла 8 м/с.

Оценка масштабов гребёнки показала характерную ширину зубцов порядка 5—8 м, периоды — 20–30 м.

Для получения радиолокационных изображений искусственных сликов использовался радар MPC1000, работающий на горизонтальной поляризации на длине волны 3 см. Пример проявления слика на радиолокационной панораме приведён на *рис. 6* (см. с. 212).



Рис. 5. Фотография искусственного слика олеиновой кислоты. Скорость ветра — 8 м/с



Рис. 6. Изображение слика OLE, полученное радаром MPC1000, установленным на СОП. Ветер восточный, скорость ветра — 6 м/с

На радиолокационной панораме достаточно контрастно изображается слик (тёмная область), на наветренной границе которого отчётливо видна гребенчатая структура. Оценка характерных периодов «гребёнки» даёт величины порядка 20—30 м.

Приведённые выше результаты наблюдений позволяют сделать следующие выводы:

- плёночные слики характеризуются сильной изрезанностью своей наветренной границы, что можно описывать как образование ГС на границе слика;
- подветренная граница слика остаётся достаточно резкой и ровной, по крайней мере при не слишком больших временах и высоких скоростях ветра, т.е. когда не наблюдается заметная фрагментация слика;
- особенности наветренной и подветренной границ сликов характерны как для сликов нефтепродуктов, так и для биогенных плёнок и квазимономолекулярных плёнок чистых ПАВ;
- зубцы ГС ориентированы практически параллельно ветру; для сликовых полос, направление которых близко к направлению ветра, гребёнки не образуются;
- на основе выполненных, пусть и немногочисленных, наблюдений можно полагать, что с ростом скорости ветра наблюдается увеличение характерных масштабов ГС.

Обсуждение результатов

Отметим прежде всего, что характерные масштабы изрезанности границы слика сравнимы с масштабами ветровых полос, или ленгмюровских циркуляций (ЛЦ), — это относится как к характерной ширине «зубцов» ГС, так и к расстоянию между ними. Сравним приведённые выше оценки характеристик ГС с данными (Marmorino et al., 2008). Гистограммы ширины зубцов ГС, наблюдавшихся в работе (Marmorino et al., 2008), приведены на *рис.* 7. Ширина зубцов ГС в несколько раз меньше, чем период (шаг) зубцов L, что весьма характерно для ЛЦ.

Для рассматриваемого случая при скорости ветра 4,5 м/с характерный период ГС составил примерно 10 м. Полученное значение имеет тот же порядок величины, хотя и несколько меньше, чем значение масштаба ЛЦ, даваемое известным эмпирическим соотношением L = 4,8V, где V — скорость ветра в метрах в секунду (Монин, Красицкий, 1985). Оценки периода ГС в наших экспериментах с искусственными сликами оказываются более близкими к оценкам согласно приведённой формуле. Таким образом, можно с большой уверенностью полагать, что формирование ГС связано с ЛЦ.

Для выявления физического механизма (или механизмов) образования сликовых гребёнок желательно получить ответы на ряд вопросов, в частности:

- почему формирование гребёнок происходит на наветренном краю сликов;
- являются ли гребёнки начальной стадией процесса фрагментации сликов;
- чем определяется ширина зубцов гребёнки и её шаг;
- как сказываются масштабы слика, а также физические характеристики плёнки на формировании ГС.

Ниже предлагается возможное физическое объяснение процесса формирования гребенчатых сликов. Оно основано на структуре ЛЦ — течений в виде роликов, которые ориентированы вдоль ветра и каждый из которых вращается в противоположном по отношению к соседнему направлении. Такие структуры вблизи поверхности можно характеризовать квазистационарными периодическими в поперечном направлении поверхностными течениями, в которых образуются области конвергенции и дивергенции горизонтальной компоненты течения, под этими областями возникают соответственно нисходящий от поверхности поток (downwelling) и восходящий поток (upwelling). В областях конвергенции обычно скапливаются плавающие предметы, водоросли, пена. Плёнки ПАВ также должны концентрироваться в зонах конвергенции. Вообще говоря, роликовые структуры несимметричны и области конвергенции более узкие, чем области дивергенции. Для простоты, однако, данную асимметрию можно не учитывать, полагая, что горизонтальную поперечную компоненту горизонтальной скорости в роликовых течениях можно записать как:

$$U = U_0 \cdot \sin \varkappa x, \tag{1}$$







Вариации Γ концентрации ПАВ в поле стационарного переменного течения со скоростью U(x) можно описать уравнением баланса:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \big[\Gamma \cdot U \big] = 0.$$

Если рассматривать плёнку как пассивную примесь, не оказывающую влияния на течение, то концентрация ПАВ неограниченно растёт во времени в окрестности точек конверген-

ции $x_c^* = (2n+1)\pi/\varkappa$ $(n = 0, \pm 1, \pm 2, ...)$, где $\frac{dU}{dx}|_{x=x_c^*} < 0$, и неограниченно уменьшается в точках дивергенции $x_c^* = 2n \cdot \pi/\varkappa$, где $\frac{dU}{dx}|_{x=x_c^*} > 0$ (Ермаков, 2010).

Следует, однако, учесть, что при обтекании течением поверхностной плёнки непосредственно под поверхностью формируется пограничный слой, скорость в котором существенно уменьшается от её значения вне пограничного слоя до малых значений на поверхности, в частности до нуля, если плёнка неподвижна. В последнем случае пограничный слой под плёнкой аналогичен случаю обтекания потоком неподвижной тонкой пластины. Плёнка остаётся неподвижной, только если сила вязкого трения τ_{visc} в пограничном слое уравновешивается упругой силой, возникающей в плёнке и равной градиенту поверхностного натяжения о, т.е. $d\sigma/dx$. Заметим, что, поскольку в точках $x = (\pi/2 + 2n\pi)/2\varkappa$ скорость потока вне погранслоя достигает максимума, а затем уменьшается, то возникает отрыв погранслоя. Приравнивая суммарную вязкую силу и силу поверхностного натяжения дайствующие на длине плёнки от x = 0 до точки отрыва, можно получить значение максимального давления Π_m плёнки (давление определяется как разность коэффициентов поверхностного натяжения чистой воды и воды с плёнкой), при котором плёнка может существовать как сплошная и неподвижная в присутствии поверхностного течения, а именно (Dysthe, 2006):

$$\Pi_m \approx 0.9 \rho \left(\nu U_m^3 / \kappa \right)^{1/2},$$

где ρ и ν — соответственно плотность и вязкость воды. Если давление в плёнке оказывается меньшим, то плёнка разрывается и переносится в область конвергенции, где накапливается и образует полосу, максимальная ширина L_{max} которой, согласно (Dysthe, 2006), равна:

$$L_{\rm max} \approx 2.4 \sqrt{\frac{\Pi_m}{\rho}} v^{-1/2} (\varkappa U_m)^{-3/2}.$$
 (2)

Для периодического течения (1) в результате будут формироваться периодические полосы плёнки ПАВ.

При объяснении процесса формировании ГС будем полагать, следуя (Phillips, 1977), что слики дрейфуют со скоростью несколько большей, чем скорость дрейфа поверхностного микрослоя в случае чистой поверхности воды. В результате подветренная часть слика как бы «упирается» в окружающую воду и поджимается ею. Концентрация ПАВ или (в случае достаточно толстой плёнки) её толщина возрастают, увеличивается и давление плёнки. Напротив, в наветренной части слика происходит некоторое уменьшение концентрации ПАВ (или уменьшение толщины плёнки). При этом будет уменьшаться давление плёнки и может реализоваться выполнение условия разрыва её поперечным течением в ЛЦ с последующим переносом и накоплением в зонах конвергенции. Таким образом, будет формироваться ГС на наветренном краю слика.

Если давление плёнки в основной части слика превышает Π_m , то она не разрывается, при этом формируется пограничный слой, в котором подавляется скорость на поверхности и нарушается структура ЛЦ. За подветренной границей слика происходит постепенное восстановление роликовых структур в ЛЦ и, соответственно, их проявление на поверхности в виде «ветровых полос». Подтверждение данного утверждения можно получить, анализируя рис. 15 работы (Marmorino et al., 2008), где видно, что сразу после сликовой полосы с её подветренной стороны ветровые полосы практически не видны и вновь проявляются на расстояниях порядка 70 м от границы слика.

Оценим, наконец, согласно выражению (2), характерную ширину полос (зубцов) в ГС для слика олеиновой кислоты. Физические характеристики плёнок OLE исследованы достаточно детально (Ермаков, 2010). Будем полагать, что величина Π_m для плёнки OLE вблизи наветренной границы слика меньше за счёт дрейфа, чем максимальное значение для насыщенного монослоя OLE, и примем величину $\Pi_m \approx 10$ мН/м. Положим далее вязкость воды при температуре 10 °C равной 0,012 см²/с, U - 3 см/с, период ЛЦ — 10 м. Тогда, согласно уравнению (2), получаем $L_{max} \approx 4$ м, что неплохо согласуется с данными наблюдений.

Заключение

Суммируем основные выводы работы.

- Как следует из анализа спутниковых наблюдений, а также натурных экспериментов с плёнками с известными физическими характеристиками, плёночные слики на морской поверхности характеризуются наличием гребенчатой структуры на наветренной границе слика. «Зубцы» ГС ориентированы практически навстречу ветру; для сликовых полос, направление которых близко к направлению ветра, ГС не наблюдаются.
- Формирование гребенчатых структур происходит как для плёнок, с большой долей вероятности связанных с разливами нефтепродуктов и обычно имеющих достаточно большие толщины (порядка 1 мкм и более), так и для плёнок биогенной природы, обычно рассматриваемых как квазимономолекулярные; последнее подтверждается наличием ГС для квазимономолекулярных плёнок олеиновой кислоты в выполненных натурных экспериментах.
- Объяснение природы ГС основано на перераспределении вещества плёнки под действием роликовых течений ленгмюровских циркуляций, оси которых ориентированы примерно вдоль ветра. В поперечном к ветру направлении ЛЦ характеризуются наличием квазипериодических конвергентно-дивергентых течений, которые приводят при определённых условиях к разрыву плёнки в зонах дивергенции и накоплению вещества плёнки в конвергентных зонах. Вероятность реализации этого существует вблизи наветренной границы слика, где плёнка может быть менее плотной за счёт ветрового дрейфа слика. В основной области слика плёнка более плотная и не разрывается в поле ЛЦ, при этом под ней формируется пограничных слой, в котором само поле течений в ЛЦ на поверхности частично подавлено. В результате на подветренной границе слика условия разрыва плёнки не выполнены и граница остаётся ровной. Теоретические оценки масштабов ГС показывают неплохое согласие с результатами наблюдений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-17-00224).

Литература

- 1. *Ермаков С.А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
- 2. *Ермаков С.А., Лаврова О.Ю., Капустин И.А., Макаров Е.В., Сергиевская И.А.* Исследование особенностей геометрии пленочных сликов на морской поверхности по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 97–105.
- 3. *Ермаков С.А., Ермошкин А.В., Капустин И.А.* Об эффекте сжатия пленочного слика // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 288–294.
- 4. Лаврова О. Ю., Митягина М. И. Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48–65.

- 5. Монин А. С., Красицкий В. П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 376 с.
- da Silva J. C., Ermakov S. A., Robinson I. S., Jeans D. R. G., Kijashko S. V. Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf. 1. Short-period internal waves // J. Geophysical Research. 1998. V. 103. No. C4. P. 8009–8031.
- Dysthe K. B. On surface renewal and sea slicks // Marine Surface Films: Chemical Characteristics, Influence on AirSea Interactions, and Remote Sensing. Berlin; Heidelberg; N. Y.: Springer-Verlag, 2006. P. 65–74.
- 8. *Ermakov S.A., Panchenko A. R., Salashin S. G.* Film Slicks on the Sea Surface and Some Mechanisms of Their Formation // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 1992. V. 16. P. 279–304.
- 9. *Ermakov S., Kapustin I., Sergievskaya I., da Silva J.* Spreading of oil films on the sea surface: radar/optical observations and physical mechanisms // Proc. SPIE 9638, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2015. 963807. DOI: 10.1117/12.2195004.
- Ermakov S., Kapustin I., Molkov A., Leshev G., Danilicheva O., Sergievskaya I. Remote sensing of evolution of oil spills on the water surface // Proc. SPIE 10784, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2018. 107840L. DOI: 10.1117/12.2325745.
- 11. *Fay J.A.* The spread of oil slicks on a calm sea // Oil on the Sea. Ocean Technology / ed. Hoult D.P. Boston: Springer, 1969. P. 53–63.
- 12. *Gade M., Byfield V., Ermakov S., Lavrova O., Mitnik L.* Slicks as indicators for marine processes // Oceano-graphy. 2013. V. 26(2). P. 138–149.
- 13. *Lavrova O. Yu.*, *Mityagina M. I.* Satellite monitoring of oil slicks on the Black Sea surface // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2013. V. 49. No. 9. P. 897–912.
- 14. *Marmorino G., Smith G. B., Toporkov J. V., Sletten M. A., Perkovich D., Frasier S. J.* Evolution of ocean slicks under a rising wind // J. Geophysical Research. 2008. V. 115. C04030.
- 15. *Onstott R., Rufenach C.* Shipboard active and passive microwave measurement of ocean surface slicks off the Southern Californian coast // J. Geophysical Research. 1992. V. 97. P. 5315–5323.
- 16. *Phillips O. M.* The dynamics of the upper ocean. 2nd ed. Cambridge University Press, 1977. 336 p.
- 17. *Phillips W.R.C.* On the Spreading Radius of Surface Tension Driven Oil on Deep Water // Applied Scientific Research. 1997. V. 57. P. 67–80.

On the "comb" structure of the edges of slicks on the sea surface

S.A. Ermakov¹, O. Yu. Lavrova², I.A. Kapustin¹, A.V. Ermoshkin¹, A.A. Molkov¹, O.A. Danilicheva¹

¹ Institute of Applied Physics RAS, Nizhniy Novgorod 603950, Russia E-mail: stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru
² Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

Analysis of observations of comb structures formed at the edges of marine slicks using satellite radar imagery and data of field experiments with artificial slicks carried out from an Oceanographic Platform on the Black Sea has been performed. It is shown that the structures appear at upwind boundaries of slicks and are typical both for mineral oil films and for biogenic films. Comb structures are practically parallel to the wind direction. For the case of oil spills from ships moving in the wind direction the structures are not formed. Characteristic cross-wind scales of the "combs" are similar to those for windrows, or so-called Langmuir circulations. A physical explanation of a mechanism of the comb structure formation based on the effect of redistribution of surfactants in the field of surface currents induced by Langmuir circulations is given. The latter are characterized by the existence of quasi periodic convergent/divergent currents in the cross wind direction. These currents under certain conditions result in film tearing in divergent zones and surfactant accumulation in convergent zones near upwind slick edges. Theoretical estimates of the comb scales demonstrate satisfactory consistency with observations.

Keywords: sea surface, film slicks, ocean radar probing, windrows, Langmuir circulations

Accepted: 05.12.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-208-217

References

- 1. Ermakov S.A., *Vliyanie plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln* (Impact of films on the dynamics of gravity-capillary waves), Nizhniy Novgorod: IPF RAN, 2010, 164 p.
- Ermakov S.A., Lavrova O.Yu., Kapustin I.A., Makarov E.V., Sergievskaya I.A., Issledovaniya osobennostei geometrii plenochnykh slikov na morskoi poverkhnosti po dannym sputnokovykh nabludenii (The study of peculiarities of the geometry of film slicks on the sea surface from data of satellite observations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 97–105.
- 3. Ermakov S.A., Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Ob effekte szhatiya plenochnogo slika (On the effect of film slick compression), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 288–294.
- 4. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sputnikovyi monitoring plenochnykh zagryaznenii poverkhnosti Chernogo morya (Satellite monitoring of surface film pollution of the Black Sea), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 3, pp. 48–65.
- 5. Monin A.S., Krasitskiy V.P., *Yavleniya na povekrhnosti okeana* (Phenomena on the ocean surface), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 376 p.
- da Silva J. C., Ermakov S. A., Robinson I. S., Jeans D. R. G., Kijashko S. V., Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf. 1. Short-period internal waves, *J. Geophysical Research*, 1998. Vol. 103, No. C4, pp. 8009–8031.
- Dysthe K. B., On surface renewal and sea slicks, In: *Marine Surface Films: Chemical Characteristics*, *Influence on AirSea Interactions, and Remote Sensing*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2006, pp. 65–74.
- 8. Ermakov S.A., Panchenko A.R., Salashin S.G., Film Slicks on the Sea Surface and Some Mechanisms of Their Formation, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1992, Vol. 16, pp. 279–304.
- 9. Ermakov S., Kapustin I., Sergievskaya I., da Silva J., Spreading of oil films on the sea surface: radar/optical observations and physical mechanisms, *Proc. SPIE 9638, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2015, 963807, DOI: 10.1117/12.2195004.
- Ermakov S., Kapustin I., Molkov A., Leshev G., Danilicheva O., Sergievskaya I., Remote sensing of evolution of oil spills on the water surface, *Proc. SPIE 10784*, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2018, 107840L, DOI: 10.1117/12.2325745.
- 11. Fay J.A., The spread of oil slicks on a calm sea, *Oil on the Sea*, *Ocean Technology*, Boston: Springer, 1969, pp. 53–63.
- 12. Gade M., Byfield V., Ermakov S., Lavrova O., Mitnik L., Slicks as indicators for marine processes, *Oceano-graphy*, 2013, Vol. 26(2), pp. 138–149.
- 13. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Satellite monitoring of oil slicks on the Black Sea surface, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, Vol. 49, No. 9, pp. 897–912.
- 14. Marmorino G., Smith G. B., Toporkov J. V., Sletten M. A., Perkovich D., Frasier S. J., Evolution of ocean slicks under a rising wind, *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 115, C04030.
- 15. Onstott R., Rufenach C., Shipboard active and passive microwave measurement of ocean surface slicks off the Southern Californian coast, *J. Geophysical Research*, 1992, Vol. 97, pp. 5315–5323.
- 16. Phillips O. M., *The dynamics of the upper ocean*, 2nd ed., Cambridge University Press, 1977, 336 p.
- 17. Phillips W. R. C., On the Spreading Radius of Surface Tension Driven Oil on Deep Water, *Applied Scientific Research*, 1997, Vol. 57, pp. 67–80.