Исследование особенностей геометрии пленочных сликов на морской поверхности по данным спутниковых радиолокационных наблюдений

С.А. Ермаков¹, О.Ю. Лаврова², И.А. Капустин¹, Е.В. Макаров¹, И.А. Сергиевская¹

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия ²Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru

Известно, что форма сликов является одним из информативных признаков при идентификации разливов загрязняющих веществ на морской поверхности. Настоящая работа посвящена анализу формы пленочных сликов на морской поверхности на основе данных спутниковых радиолокационных изображений сбросов загрязняющих веществ. Установлено, что такие слики характеризуются вытянутой формой, причем отношение продольного по отношению к направлению ветра и поперечного размеров пятен оказывается довольно близким для различных сликов, т.е. слабо зависит от характеристик пленок и времени их растекания и значительно возрастает с ростом скорости ветра. Данный вывод сделан на основе построенных гистограмм величины отношений осей сликов при слабом и умеренном ветрах и подтверждается результатами выполненных нами ранее натурных экспериментов по исследованию растекания поверхностных пленок с известными физическими характеристиками. На основе простой теоретической модели деформации сликов при их растекании, учитывающей средние напряжения, индуцируемые короткими ветровыми волнами при их затухании в области слика и приводящие к замедлению поперечного растекания пленок, даны оценки величин отношения осей, показано удовлетворительное согласие теоретических оценок с данными наблюдений.

Ключевые слова: пленки на морской поверхности, пленочные загрязнения, поверхностное волнение, гравитационно-капиллярные волны, дистанционное зондирование морской поверхности

Одобрена к печати: 11.03.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-97-105

Введение

Как известно, форма сликов является одним из информативных признаков при идентификации нефтяных разливов на морской поверхности (см., например, (Onstott, Rufenach, 1992; Marmorino et al., 2008, 2010; Gade et al., 2013; Лаврова, Митягина, 2012)). Для «мгновенных точечных» сбросов загрязняющих органических веществ в отсутствие таких факторов, как неоднородные течения (конвергентно-дивергентные или сдвиговые), ветровой дрейф и пр., растекание поверхностно-активных веществ (ПАВ) является аксиально-симметричным. На стадии, когда силы поверхностного натяжения уравновешиваются вязкими силами, растекание в отсутствие упомянутых выше факторов описывается законом Фэя, согласно которому радиус пятна пленки растет со временем как t⁴ (Fay, 1969; Phillips, 1997), см. также (Монин, Красицкий, 1985). В случае же отличной от нуля постоянной скорости ветра слик деформируется и вытягивается в направлении, близком к направлению ветра.

В работе (Ermakov et al., 2015) были приведены данные первых экспериментов с искусственными сликами – пленками ПАВ с известными физическими характеристиками, где было показано, что в присутствии ветра пленка растекается асимметрично, большая ось пятна ориентируется по ветру, а отношение большой и малой осей пятна медленно растет во времени. Была предложена простая физическая модель, в которой кроме сил вязкости и поверхностного натяжения были учтены и дополнительные напряжения, индуцированные ветровыми волнами, распространяющимися в область слика. В работе (Ермошкин, Капустин, 2015) описан натурный эксперимент по исследованию растекания искусственного слика с использованием панорамного берегового радиолокатора СВЧ-диапазона, показано, что полученные результаты, касающиеся асимметрии формы слика, неплохо согласуются с выводами (Егmakov et al., 2015).

Настоящая работа, являющаяся продолжением и развитием работ (Ermakov et al., 2015; Ермошкин, Капустин, 2015), посвящена анализу формы сликов на морской поверхности с использованием спутниковых радиолокационных изображений. В работе приведены гистограммы отношения осей и его средние значения для двух групп наблюдений: при слабом ветре (скорость ветра около 3 м/с) и при скорости ветра порядка 6 м/с. Дано сравнение данных спутниковых наблюдений с результатами эксперимента по растеканию искусственного слика. На основе модели, предложенной ранее в (Ermakov et al., 2015), даны оценки отношения осей слика и их сопоставление с результатами наблюдений.

Анализ радиолокационных изображений сликов

С целью выявления влияния ветрового волнения на изменение формы сликов был проведен анализ изображений, полученных спутниковыми радиолокаторами Envisat ASAR и ERS-2 в 2006-2007 гг. в северо-восточной части Черного моря. В данном районе находятся крупнейшие российские порты на Черном море, такие как Новороссийск, Туапсе и Сочи. Здесь проходят основные судоходные трассы, и здесь наблюдается наибольшее загрязнение морской поверхности, вызванное несанкционированными сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты. Одним из главных характерных признаков, помогающих выявить нефтяное пятно на радиолокационном изображении (РЛИ), является его форма. С этой точки зрения, сбросы с кораблей можно условно разделить на два класса – сбросы с судов во время их движения и сбросы с неподвижных судов (или однократный кратковременный сброс с движущегося судна). В обоих случаях на РЛИ пятна проявляются как аномалии на фоне общей структуры изображения (Лаврова, Митягина, 2012). При достаточно протяженном во времени сбросе с движущегося судна пятно нефтепродуктов в отсутствие сильного ветра, волнения и сильно неоднородных течений проявляется на РЛИ в виде узкой сликовой полосы с пониженной интенсивностью радиолокационного сигнала, обусловленной «выглаживанием» поверхностного волнения и повторяющей маршрут движения корабля. В случае же неподвижного судна растекание нефтяной пленки в указанных выше условиях происходит более или менее равномерно во все стороны, поэтому пятно принимает округлую форму. Наличие ветра, волнения и неоднородных течений может оказать существенное влияние на структуру пятна (Лаврова, Митягина, 2012). Для анализа были отобраны радиолокационные изображения, содержащие проявления сликов, образованных в результате растекания пленки нефтепродуктов, с большой вероятностью представлявших «мгновенные» сбросы загрязняющих веществ с судов. При этом анализировались слики сравнительно небольших размеров, меньших характерных масштабов неоднородностей течений в рассматриваемом районе, так что влияние последних на форму сликов можно было не учитывать. Некоторые примеры нефтяных разливов на радиолокационных изображениях представлены на *puc*. *1*.



Рис. 1. Слики, связанные предположительно с судовыми сбросами, содержащими нефтепродукты, на радиолокационных изображениях ASAR Envisat, при различных скоростях ветра

Уже из предварительного просмотра изображений сликов, формирующихся в результате сбросов загрязненных вод с судов, можно заключить, что слики вытянуты по ветру, при этом продольная ось пятен может в несколько раз превышать поперечный размер.

В качестве параметра, характеризующего форму слика, примем величину $R = \frac{l_i}{l_i}$,

где $l_{//}$ и l_{\perp} – размеры сликов соответственно в продольном и поперечном к ветру направлениях.

Всего было проанализировано более 30 сликовых пятен на радиолокационных изображениях спутника Envisat, по которым оценивалось значение величины R. Большая ось сликов всегда, за исключением одного случая, была направлена по ветру. Гистограммы величины R для сликов, наблюдаемых при малой скорости ветра порядка 3 м/с и при больших скоростях ветра около 6 м/с, представлены на *рис.* 2. Отметим, что при скоростях ветра выше 9-10 м/с слики, как правило, быстро разрушаются и обычно отсутствуют на морской поверхности. Из *рис.* 2 видно, что распределение величины R имеет хорошо выраженный максимум. Для случая слабого ветра, представленного 23 сликами, среднее значение R составило 2,23, стандартное отклонение от среднего – 0,478. Для более сильного ветра среднее значение для 8 сликов составило 4,15 со стандартным отклонением 0,8. Поскольку времена сбросов и характеристики разливаемых веществ в сликах были неизвестны и могли изменяться в широких пределах, то сравнительно небольшая ширина гистограммы свидетельствует о сравнительно слабой зависимости отношения осей от возраста (времени растекания) слика, а также от физических характеристик пленок.



Рис. 2. Гистограммы величины отношения продольного (по ветру) и поперечного размеров сликовых пятен при небольших (около 3 м/с) скоростях ветра (слева) и при скоростях ветра около 6 м/с (справа)

Натурные эксперименты по растеканию пленок ПАВ

Сравним данные спутниковых наблюдений с результатами специальных экспериментов, в ходе которых производились разливы ПАВ (олеиновой кислоты, OLE) с Океанографической платформы (ОП) Морского гидрофизического института (МГИ), расположенной в прибрежной зоне Черного моря. Информация о форме сликов при этом была получена в результате обработки данных фотосъемки (цифровая зеркальная камера Canon 350D), выполнявшейся с берега с высоты около 150 м. Зависимости отношения осей сликов от времени растекания показаны на *puc. 3*, здесь же приведен результат эксперимента, который выполнялся с ОП как подспутниковый: разлив OLE проводился приблизительно за 30 мин. до получения радиолокационного изображения со спутника ERS-2.



Рис. 3. Отношение осей сликов OLE как функция времени растекания при слабом ветре около 3 м/с. Данные получены в результате обработки фотоизображений, сделанных с берега в прибрежной зоне Черного моря. Показан также результат подспутникового эксперимента со сликом OLE, который был зарегистрирован на радиолокационном изображении

Основной вывод из экспериментов с ОП состоит в том, что отношение размеров слика достаточно медленно меняется со временем, поэтому в первом приближении можно рассматривать отношение осей для разных сликов на спутниковых изображениях (см. выше), пренебрегая возможными различиями во временах растекания сликов.

Теоретический анализ

Движение пленки пренебрежимо малой массы определяется балансом сил поверхностного натяжения, вязких напряжений и напряжений, индуцированных поверхностными волнами. Уравнение баланса этих сил, действующих на элемент поверхности единичной длины границы пленки, можно записать в виде:

$$\Delta \sigma - \alpha \frac{\mu \Delta x}{t \sqrt{vt}} \Delta x - F_{induced} \approx 0 , \qquad (1)$$

где $\Delta \sigma$ - разность коэффициентов поверхностного натяжения на чистой воде и в области пленки, μ и v – соответственно динамическая и кинематическая вязкости воды, α – некоторый эмпирический коэффициент, определяемый сложной структурой погранслоя под пленкой вблизи границы слика, Δx – длина элемента поверхности, отсчитываемая от границы пленки внутрь слика и пропорциональная масштабу последнего. Первое слагаемое

в уравнении (1) описывает силу поверхностного натяжения, действующую на единичный элемент длины границы слика, второе слагаемое приближенно описывает вязкое напряжение, третье слагаемое – сила *F*_{induced}, связанная с индуцированным волнами напряжением.

Напряжение, индуцированное волной с частотой ω , волновым числом k_0 и амплитудой А, которая распространяется в область, занятую пленкой с упругостью Е, согласно (Foss, 2000), может быть описано выражением:

$$\overline{\tau}_{wave} = \frac{\mu \omega k_0 \left| A \right|^2 \exp\left(-2\kappa x\right)}{\delta} \frac{\beta_0^2}{\left| \beta - 1 + i \right|^2} \left[\frac{1}{\beta_0^2} - 2\left(\frac{\kappa}{k_0} + k_0 \delta\right) \frac{1}{\beta_0} + 4k_0 \delta \right] \equiv$$

$$\equiv T_0 \left| A \right|^2 \exp\left(-2\kappa x\right),$$
(2)

где $\beta = \frac{2\mu\omega}{Ek^2\delta}$, $k = k_0 + i\kappa$, κ – коэффициент затухания волны, $\delta = \sqrt{2\mu/\omega\rho}$ – толщина

вязкого погранслоя, ρ – плотность воды. Слагаемое $4k_0\delta$ в (2) отвечает компоненте напряжения на чистой воде (E = 0) и обусловлено Стоксовым дрейфом и дрейфом из-за вязкого затухания. Другие слагаемые в (2) описывают напряжение на воде с пленкой. Сила, обусловленная индуцированным напряжением и действующая на элемент поверхности $\Delta x \cdot 1$ с единичной длиной вдоль границы пленки, может быть получена интегрированием (2). Учитывая, что в случае ветровых волн необходим учет вклада в индуцированное напряжение различных компонент спектра волнения $F(k, \varphi)$, можно представить компоненту силы $F_{induced}$, действующей перпендикулярно границе слика, как

$$\overline{F}_{induced} = \iint \frac{T_0}{2\kappa} (1 - e^{-2\kappa\Delta x}) F(k,\varphi) k dk \sin\varphi d\varphi \approx \Delta x \cdot 1 \cdot \tau_w^0,$$
(3)

здесь $\tau_w^0 = \iint T_0 F(k, \varphi) k dk \sin \varphi d\varphi$, φ – угол между направлением волнового вектора волны и скоростью ветра; полагается, что $\kappa \Delta x \ll 1$.

Нормальные компоненты напряжения, индуцированные ветровыми волнами, распространяющимися под углами к направлению ветра, направлены внутрь слика, одинаковы с обеих его сторон и приводят к замедлению скорости растекания пятна в поперечном направлении. Продольная компонента индуцированного напряжения на наветренном крае слика не уравновешивается соответствующим напряжением на подветренном крае, где волны сильно подавлены пленкой, и, видимо, дает основной вклад в увеличение скорости дрейфа слика как целого; рост продольной оси слика определяется балансом вязкой силы и силы поверхностного натяжения.

Не сложно записать, как меняется со временем поперечный масштаб слика на малых и на больших временах:

$$l_{\perp} \approx \begin{cases} \left(\frac{\Delta\sigma}{\alpha\rho\sqrt{\nu}}\right)^{1/2} t^{3/4} - \frac{\tau_{w}^{0}}{2\alpha\rho\sqrt{\nu}} t^{3/2}, & \Delta\sigma \cdot \alpha\sqrt{\nu}\rho \ t^{-3/2} \gg \tau_{w}^{0} \\ \Delta\sigma/\tau_{w}^{0} & , & \Delta\sigma \cdot \alpha\sqrt{\nu}\rho \ t^{-3/2} \ll \tau_{w}^{0} \end{cases}$$
(4)

Соответственно, отношение осей слика на малых и больших временах имеет вид:

$$R(t \to 0) \approx \left(1 - \frac{\tau_w^0 t^{3/4}}{2\sqrt{\alpha\rho} v^{1/2} \Delta\sigma}\right)^{-1}, \tag{5}$$

$$R(t \to \infty) \approx \frac{\tau_w^0 t^{3/4}}{\sqrt{\alpha \rho v^{1/2} \Delta \sigma}},$$
(6)

откуда видно, что величины R с учетом действия индуцированных волновых напряжений существенно возрастают со скоростью ветра из-за роста интенсивности волнения.

Оценим по порядку величину индуцированного напряжения для ветровых волн, которые испытывают заметное влияние пленки ПАВ, т.е. для см-дм-волн. Поскольку спектр волнения быстро спадает с ростом волнового числа, доминирующий вклад в изменение индуцированного волнового напряжения дадут наиболее длинные волны, которые, однако, еще испытывают заметное гасящее действие со стороны пленки. Такому условию отвечают волны с длинами порядка 10 см, поэтому проведем оценки для волны с k=0.6 рад/см. Примем амплитуду волны для условий слабого ветра (~3 м/с) равной А~0,2 см, крутизна волны kA при этом составляет 0,12. Полагая упругость пленки 20 мН/м, коэффициент поверхностного натяжения 40 мН/м, что типично для насыщенных пленок OLE (Ermakov, Kijashko, 2006), вязкость воды $0,01 \, \text{г/(см} \cdot \text{c}^2)$, получим величину индуцированного напряжения порядка 0,1 г/(см·с²). Результаты модельных расчетов величины R для малых и больших возрастов слика приведены на рис. 4. Полагая, что спектральные интенсивности ветровых волн см-дм-диапазона длин растут как квадрат скорости ветра V, легко построить зависимость R от возраста слика, например, при скорости ветра около 6 м/с. Эта зависимость также приведена на *рис.* 4, откуда следует, что оценки в рамках развитой нами данной модели неплохо согласуются с данными как наших натурных экспериментов, так и результатами спутниковых наблюдений.



Рис. 4. Модельные расчеты зависимости отношения осей сликов в рамках модели с учетом действия индуцированных волновых напряжений на растекание пленок ПАВ при слабом ветре 3 м/с (1) и ветре 6 м/с (2)

Заключение

Сформулируем основные выводы работы.

В результате обработки спутниковых радиолокационных изображений пленочных сликов получено, что слики в условиях слабого влияния неоднородных течений вытянуты по ветру. Как следует из построенных гистограмм величины R отношения продольной к ветру и поперечной осей сликов, это отношение слабо зависит от возраста и физических характеристик пленок и достаточно быстро растет с ростом скорости ветра. Так, при скорости ветра около 3 м/с среднее значение R≈2,2, при скорости ветра порядка 6 м/с среднее значение R составило 4,15.

Результаты натурных экспериментов, в том числе подспутниковых, с искусственными сликами (пленками ПАВ с известными физическими характеристиками) показали, что по крайней мере при слабом ветре отношение осей изменялось от величины 1,6 до 2 при увеличении возраста слика от 10 мин до 1,5 час, что подтверждает вывод о сравнительно медленной зависимости R от времени. Сама измеренная величина R хорошо согласуется со значением R при слабом ветре, полученном по данным спутниковых наблюдений.

Сравнение с простой моделью деформации сликов при их растекании, учитывающей дополнительные средние напряжения, индуцируемые короткими ветровыми волнами при их затухании в области слика и приводящими к замедлению поперечного растекания пленок, показало удовлетворительное согласие теоретических оценок с данными наблюдений.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №, 14-05-00876-а, 15-35-20992мол а вед. Радиолокационные изображения спутников ASAR Envisat и ERS-2 предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проектов С1Р.6342 и АОВЕ 2775.

Литература

- 1. Ермошкин А.В., Капустин И.А. Исследование особенностей растекания пленок поверхностно-активных веществ на поверхности внутренних водоемов морским навигационным радиолокатором // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 136–142.
- Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48–65. 2.
- 3.
- *Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 376 с. *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. 2015. Vol. 9638. Id 963807. DOI: 10.1117/12.2195004. 4
- *Ermakov S.A., Kijashko S.V.* Laboratory study of the damping of parametric ripples due to surfactant films // Marine surface films. Springer, 2006. P.113–128. 5.
- Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea // Oil on the Sea. New York: Plenum, 1969. P. 53-63. 6.
- Foss M. Manifestation of momentum transfer in case of ocean surface waves being damped by an elastic film or 7. a viscous layer. Dr. sci. thesis. Norway: University of Tromso, 2000. 128 p.
- Gade M., Byfield V., Ermakov S., Lavrova O., Mitnik L. Slicks as indicators for marine processes. Oceanography. 8. 2013. 26(2). P. 138-149.
- Marmorino G., Holt B., Molemaker M.J., DiGiacomo P.M., Sletten M.A. Airborne synthetic aperture radar observations of "spiral eddy" slick patterns in the Southern California Bight // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. 9. C05010.
- 10. 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. Geophys. Res. 2008. V. 115. C04030.
- 11. Onstott R., Rufenach C. Shipboard active and passive microwave measurement of ocean surface slicks off the Southern Californian coast // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 5315-5323.
- 12. *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.

Investigation of geometry of film slicks on the sea surface from satellite radar observations

S.A. Ermakov¹, O.Yu. Lavrova², I.A. Kapustin¹, E.V. Makarov¹, I.A. Sergievskaya¹

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

It is well known that the shape of marine slicks is one of important signs of pollutant spills on the sea surface. This paper is focused on the analysis of marine slick signatures using data of satellite radar observations of polluting 'instant" emissions. It is shown that such slicks are characterized by an elongated shape, and the ratio of longitudinalto-cross wind slick sizes is obtained to be quite similar for different slicks, i.e. seems to be weakly dependent on film characteristic and the spreading time, but dramatically depends on wind speed. This conclusion is based on histograms of the slick axis ratio values related to gentle and moderate wind conditions, and is consistent with results of our previous field experiments on spreading of films with known physical characteristics. Estimates of the axis ratio are obtained based on a simplified physical model of slick spreading accounting for mean stresses induced by short wind waves due to their damping when propagating into slicks, the stresses result in reduced cross wind film spreading, the theoretically estimated axis ratio values are found to be consistent with observations.

Keywords: surfactants, oil spills, surface waves, gravity-capillary wave, radar remote sensing of sea surface

Accepted: 11.03.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-97-105

References

- 1. Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Issledovanie osobennostey rastekaniya plenok poverkhnostno-aktivnykh veschesty na poverkhnosti vnutrennikh vodovemov morskim navigatsionnym radiolokatorom (Investigation of spreading of surfactants on a surface of internal reservoir using marine navigation radar), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 136–142. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I. Satellite monitoring of oil slicks on the Black Sea surface, *Izvestiya, Atmospheric*
- 2. and Oceanic Physics, 2013, Vol. 49, No. 9, pp. 897-912.
- Monin A.S., Krasitsky V.P., Yavleniya na poverkhnosti okeana (Phenomena on the surface of the ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 376 p. 3.
- 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*, 2015, Vol. 9638, Id. 963807. DOI: 10.1117/12.2195004. Ermakov S.A., Kijashko S.V. Laboratory study of the damping of parametric ripples due to surfactant films, 4.
- 5. Marine surface films, Springer, 2006, pp.113-128.
- Fay J.A., The spread of oil slicks on a calm sea, Oil on the Sea, Plenum New York, 1969, pp. 53-63. 6
- Foss M., Manifestation of momentum transfer in case of ocean surface waves being damped by an elastic film 7 or a viscous layer, Dr. sci. thesis. Norway: University of Tromso, 2000, 128 p.
- 8. Gade M., Byfield V., Ermakov S., Lavrova O., Mitnik L., Slicks as indicators for marine processes, *Oceanography*, 2013, 26(2), pp. 138-149.
- Marmorino G., Holt B., Molemaker M.J., DiGiacomo P.M., Sletten M.A. Airborne synthetic aperture radar observations of "spiral eddy" slick patterns in the Southern California Bight, J. Geophys. Res., 2010, Vol.115, 9 C05010.
- 10. 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. Geophys. Res.*, 2008, Vol.115, C04030.
- 11. Onstott R., Rufenach C., Shipboard active and passive microwave measurement of ocean surface slicks off the Southern Californian coast, J. Geophys. Res., 1992, Vol. 97, pp. 5315-5323.
- 12. 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.