## Использование данных орбитального дождевого радиолокатора Ки-диапазона для исследования изменения дисперсии наклонов крупномасштабного волнения в слике

#### М.А. Панфилова, В.Ю. Караев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия E-mail: marygo@mail.ru

В Мексиканском заливе на нефтедобывающей платформе DeepWater Horizon 20 апреля 2010 г. произошла авария, которая стала крупнейшей в истории. В результате на поверхности залива образовалась нефтяная пленка площадью порядка нескольких тысяч квадратных километров. Для мониторинга ситуации использовались данные спутников в оптическом диапазоне и радиолокационные изображения, полученные радиолокатором с синтезированной апертурой. Сформировавшееся в Мексиканском заливе нефтяное пятно было настолько большим, что впервые для исследования сликов можно было использовать данные орбитального дождевого радиолокатора с разрешением около 5 км. Построена зависимость контраста (отношения сечения обратного рассеяния в слике к сечению обратного рассеяния на чистой воде) от угла падения. В рамках двухмасштабной модели рассеивающей поверхности в приближении касательной плоскости определяются дисперсия наклонов крупномасштабного волнения и сечение обратного рассеяния при нулевом угле падения в полосе обзора радиолокатора. В работе проводится сопоставление пространственного распределения дисперсии наклонов крупномасштабного волнения, восстановленного в полосе обзора дождевого радиолокатора (Кu-диапазон), с оптическими и радиолокационными изображениями нефтяного слика. Построена зависимость дисперсии наклонов крупномасштабного волнения, восстановление об в слике, аналогичная известной зависимости для дисперсии наклонов в оптическом диапазоне.

Ключевые слова: нефтяное загрязнение, дисперсия наклонов, дождевой радиолокатор

Одобрена к печати: 25.09.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-187-194

#### Введение

В связи с относительно небольшими размерами сликов для их обнаружения и исследования обычно применяются орбитальные или самолетные радиолокаторы с синтезированной апертурой (PCA), которые работают при средних углах падения и обладают высоким пространственным разрешением, например (Лаврова, Костяной, 2010; Kudryavtsev et al., 2013; Zhang et al., 2011). Измерения при малых углах падения (до 12°) малочисленны, например (Johnson, Croswell, 1982).

В настоящей работе используются данные космического дождевого радиолокатора Кидиапазона, входившего в состав оборудования спутника миссии Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM). Радиолокатор сканирует в направлении, перпендикулярном направлению полета, причем угол зондирования меняется в пределах  $\pm 17^{\circ}$  и ширина полосы обзора составляет около 245 км. При этом происходит сплошная «засветка» полосы обзора. Размер пятна на поверхности моря составляет около 5 км (при вертикальном зондировании), а смещение радиолокатора за время скана — около 4 км. Данные радиолокатора содержат информацию о зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения, а также о наличии и интенсивности осадков. Данные дождевого радиолокатора были получены над Мексиканским заливом после аварии 20 апреля 2010 г. на нефтедобывающей платформе DeepWater Horizon. Площадь нефтяной пленки, образовавшейся на поверхности, составляла порядка нескольких тысяч квадратных километров, что позволяет использовать для анализа данные с разрешением 5 км. Для интерпретации рассеяния при малых углах падения широко используется приближение касательной плоскости в рамках двухмасштабной модели морской поверхности (Басс, Фукс, 1972). Согласно приближению касательной плоскости, сечение обратного рассеяния пропорционально плотности распределения наклонов морской поверхности, которое близко к Гауссову, и плотность распределения зависит от дисперсии наклонов крупномасштабного, по сравнению с длиной волны зондирующего излучения, волнения. Дисперсия наклонов крупномасштабного волнения является важным параметром в модели рассеяния волн CBЧдиапазона морской поверхностью, и в ходе натурных экспериментов проводились ее измерения, например (Данилычев, Кутуза, Николаев, 2006; Danilytchev, Kutuza, Nikolaev, 2009).

В данной работе проводится сопоставление пространственного распределения дисперсии наклонов крупномасштабного волнения, восстановленного в полосе обзора дождевого радиолокатора (Ки-диапазон), с оптическими и радиолокационными изображениями нефтяного слика. Построена зависимость дисперсии наклонов крупномасштабного волнения от скорости ветра в слике, аналогичная известной зависимости для дисперсии наклонов, полученной в эксперименте (Cox, Munk, 1956). Данные о скорости ветра брались с буя 42040 с координатами 29,208° с.ш., 88,226° в.д., расположенного в 54 км от нефтяной платформы с координатами 28,737° с.ш., 88,366° в.д.

#### 1. Сечение обратного рассеяния в районе нефтяного загрязнения

На *рис. 1* приведено радиолокационное изображение морской поверхности, полученное дождевым радиолокатором, в районе разлива нефти. Положение платформы и метеорологического буя обозначены на *рис. 1a.* Для сравнения на *рис. 1б* приводится оптическое изображение, полученное сенсором MODIS (Лаврова, Митягина, 2015).



Рис. 1. Распределение сечения обратного рассеяния в полосе обзора дождевого радиолокатора, полученное 17 мая 2010 г. в 12:38 UTC при скорости ветра 3,1 м/с (а). Фрагмент изображения MODIS Terra (б). Изображение получено в тот же день в 16:40 UTC. Зона солнечного блика (Лаврова, Митягина, 2015)

При малых углах падения механизм обратного рассеяния является квазизеркальным и отражение происходит от участков волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. Поверхностная пленка подавляет коротковолновую часть спектра волнения, что дает уменьшение дисперсии наклонов крупномасштабного волнения. Это приводит к росту сечения обратного рассеяния в центре полосы.

При больших углах падения (на краю полосы) «включается» брэгговский механизм рассеяния и мощность отраженного сигнала пропорциональна спектральной плотности резонансной ряби. При малых и средних ветрах в слике резко падает спектральная плотность резонансной ряби, что ведет к уменьшению сечения обратного рассеяния. Сильные ветра «разрывают» сликовую область на части, и слики перестают определяться в радиолокационном и оптическом диапазонах.

На *рис. 2* представлена зависимость сечения обратного рассеяния от расстояния вдоль трека для четырех углов падения: 1,5; 16,6; –16,6 и –9°. Видимая на оптическом изображении полоса «пересекается» под разными углами падения, разрезы для разных углов падения показаны на рисунке.



Рис. 2. Зависимость сечения обратного рассеяния от расстояния вдоль трека в области слика для угла падения: 1,5° (a); 16,6° (b); -9° (b); -16,6° (c)

При малых углах падения сечение обратного рассеяния превышает примерно на 8 дБ сечение обратного рассеяния от чистой воды, при средних — не «замечает» слик, а при больших углах падения наблюдается падение сечения рассеяния примерно на 30 дБ. На *рис. 1* видны два провала в сечении обратного рассеяния на нижнем краю полосы (разрез для него приведен на *рис. 2г*). При этом по данным в оптическом диапазоне слик наблюдается только в зоне солнечного блика, а второй провал не виден. Таким образом, в данном случае дождевой радиолокатор предоставляет данные о шероховатости морской поверхности на большей части акватории, чем оптические изображения.

Для двух скоростей ветра: 3 и 5,4 м/с, измеряемых буем, были вычислены средние значения сечения обратного рассеяния в области чистой воды  $\overline{\sigma}_0$  и в слике  $\overline{\sigma}_s$ . В качестве погрешности измерений были вычислены СКО измеренных на чистой воде  $\sigma_0$  от  $\overline{\sigma}_0$ , а также  $\sigma_s$  от  $\overline{\sigma}_s$ .

На *рис. 3* приведена зависимость величины контраста  $\overline{\sigma}_s/\overline{\sigma}_0$  (отношение сечения обратного рассеяния в слике к сечению обратного рассеяния на чистой воде) от угла падения, аналогичная той, что была получена в работе (Johnson, Croswell, 1982). Из рисунков видно, что контраст больше при меньшей скорости ветра.



Рис. 3. Зависимость отношения сечения обратного рассеяния в слике к сечению обратного рассеяния на чистой воде при скорости ветра: 3 м/с (a); 5,4 м/с (б)

#### 2. Дисперсия наклонов крупномасштабного волнения

Как известно, для малых углов падения сечение обратного рассеяния определяется в рамках приближения Кирхгофа:

$$\sigma(\theta) = \sigma(0) \frac{\exp\left[-\frac{\mathrm{tg}^2 \theta}{2\sigma_{xx}^2}\right]}{\cos^4 \theta}, \qquad (1)$$

где  $\theta$  — угол падения;  $\sigma(0) = |R_{eff}(0)|^2 / 2\sqrt{\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2}$  — сечения обратного рассеяния при нулевом угле падения;  $\sigma_{xx}^2$  — дисперсия наклонов вдоль направления зондирования;  $\sigma_{yy}^2$  — дисперсия наклонов поперек направления зондирования;  $R_{eff}(0)$  — эффективный коэффициент отражения, который вводится вместо коэффициента Френеля, чтобы учесть влияние мелкой ряби на мощность рассеянного сигнала.

По данным дождевого радиолокатора был разработан алгоритм определения сечения обратного рассеяния при нулевом угле падения  $\sigma_0(0)$  и  $\sigma_{xx}^2$  (Караев и др., 2012). Дисперсии наклонов  $\sigma_{xx}^2$  и  $\sigma_{yy}^2$  зависят от угла между направлением сканирования и направлением распространения волнения. Параметр  $\sigma_0(0)$  является более универсальным, не зависящим от направления волнения, и должен зависеть от полной дисперсии наклонов крупномасштабного волнения. Полная дисперсия наклонов крупномасштабного волнения определяется как  $\sigma_{tot}^2 = \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2$  и также является универсальным параметром, который зависит только от состояния морской поверхности.

В работе (Панфилова, Караев, 2016) был разработан алгоритм определения полной дисперсии наклонов крупномасштабного волнения по данным дождевого радиолокатора. Он сводится к тому, что для выбранной области в полосе обзора вычисляется  $\sigma_0(0)$ , а затем по регрессионной зависимости восстанавливается полная дисперсия наклонов. Регрессионная зависимость была получена по данным дождевого локатора Ки-диапазона со спутника TRMM и имеет следующий вид:

$$\sigma_{totKu}^2 = 0,47/\sigma_{0Ku}(0) \pm 0,0035.$$
<sup>(2)</sup>

Формула получена для сечений обратного рассеяния от 12 до 250 (не в децибелах). Обработка полосы обзора дождевого радиолокатора проводилась окном пять на пять ячеек (пять углов падения и пять измерений для каждого угла падения). При обработке использовались углы падения меньше 12°, где преобладает квазизеркальный механизм рассеяния. Полученное распределение  $\sigma_{tarKn}^2$  сглаживается медианным фильтром с окном 5×5 ячеек.

На *рис. 46* приведено полутоновое изображение полной дисперсии наклонов в полосе обзора дождевого радиолокатора, на *рис. 4а* — оптическое изображении того же участка. Видно, что дисперсия наклонов уменьшается в области слика примерно в четыре раза.



Рис. 4. Полутоновое изображение полной дисперсии наклонов крупномасштабного волнения в полосе обзора дождевого радиолокатора 24 мая 2010 г. в 9:23 UTC при скорости ветра 1,2 м/с (а). Фрагмент изображения MERIS Envisat (б). Изображение получено в тот же день в 16:16 UTC

Данные дождевого радиолокатора о  $\sigma_{totKu}^2$  были объединены с измерениями скорости ветра морским буем 42040 таким образом, чтобы интервал времени между измерениями составлял не более 10 мин, а  $\sigma_{totKu}^2$  определялась как среднее значение в радиусе 15 км вокруг буя.

Была проведена обработка данных дождевого радиолокатора вблизи нефтяной платформы и морского буя за май и июнь 2010 г. и построена зависимость дисперсии наклонов крупномасштабного волнения в слике от скорости ветра (*puc. 5a*):

$$\sigma_{tot\,Ku\,CJUK}^2 = 0,0075 + 0,0019U_{10} \pm 0,004. \tag{3}$$

В оптическом диапазоне аналогичная зависимость приведена в работе (Cox, Munk, 1956) (*рис. 5б*). Для сравнения на рисунке приведена зависимость дисперсии наклонов крупномасштабного волнения от скорости ветра в той же акватории, когда слика уже не было. Аналогичная зависимость для Ки-диапазона на чистой воде была получена в работе (Chu, He, Chen, 2012).



Рис. 5. Зависимость дисперсии наклонов от скорости ветра: а — по данным Ки-диапазона; б — в оптическом эксперименте (Cox, Munk, 1956)

Видно, что для чистой воды дисперсии наклонов, полученные по оптическим изображениям, существенно превышают дисперсии наклонов крупномасштабного волнения, измеренные в Ки-диапазоне, так как в последние коротковолновая часть спектра волнения не вносит вклада. В слике значения дисперсий наклонов крупномасштабного волнения в Кидиапазоне близки к оптическим, так как коротковолновая часть спектра волнения, которая вносит основной вклад в оптические наклоны, выглаживается в слике.

#### Заключение

Проведено исследование проявления нефтяного слика в радиолокационном изображении дождевого радиолокатора и получена зависимость радиолокационного контраста (слик/

не слик) от угла падения. При увеличении скорости ветра абсолютная величина контраста уменьшается. Проведена обработка данных, впервые построена зависимость дисперсии наклонов крупномасштабного волнения в Ки-диапазоне от скорости ветра в слике и выполнено сравнение с данными оптических измерений. Обработка радиолокационных данных показала, что полная дисперсия наклонов крупномасштабного волнения является информативным параметром при исследовании морского волнения, в частности, в районе нефтяного загрязнения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН по теме № 0035-2014-0022 «Разработка радиофизических методов исследования океана», Программы фундаментальных исследований ОФН РАН, проект «Развитие радиофизических методов исследования ветрового волнения и приповерхностного слоя океана и внутренних водоемов», а также при поддержке РФФИ (проекты № 16-35-00548мол\_а, 15-05-07726а и 15-45-02501p\_поволжье\_а).

#### Литература

- 1. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
- 2. Данилычев М.В., Кутуза Б.Г., Николаев А.Г. Развитие радиационной модели взволнованной морской поверхности на основе данных эксперимента по измерению рассеянного СВЧ радиоизлучения Солнца // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 2. № 3. С. 68–85.
- 3. *Караев В.Ю., Панфилова М.А., Баландина Г.Н., Чу К.* Восстановление дисперсии наклонов крупномасштабных волн по радиолокационным измерениям в СВЧ-диапазоне // Исследование Земли из космоса. 2012. № 4. С. 62–77.
- 4. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г.* Катастрофический разлив нефти в Мексиканском заливе в апреле-мае 2010 г. // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 67–72.
- Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Нефтяные загрязнения морской поверхности: взгляд из космоса // Природа. 2015. № 9. С. 83–89.
   *Панфилова М.А., Караев В.Ю.* Использование данных морских буев для оценки дисперсии наклонов
- 6. Панфилова М.А., Караев В.Ю. Использование данных морских буев для оценки дисперсии наклонов крупномасштабного волнения для Ки- и Ка-диапазонов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 119–134.
- 7. *Chu X.*, *He Y.*, *Chen G.* Asymmetry and anisotropy of microwave backscatter at low incidence angles // Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. Vol. 50. No. 10. P. 4014–4024.
- 8. *Cox C., Munk W.* Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter // Bull. Scripps Institution of Oceanography. 1956. Vol. 6. P. 401–488.
- 9. Danilytchev M.V, Kutuza B.G., Nikolaev A.G. The application of sea wave slope distribution empirical dependences in estimation of interaction between microwave radiation and rough sea surface // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2009. Vol. 47. P. 652–661.
- Johnson J.W., Croswell W.F. Characteristics of 13.9 GHz radar scattering from oil films on the sea surface // Radio science. 1982. Vol. 11. No. 3. P. 611–617.
- 11. Kudryavtsev V.N., Chapron B., Myasoedov A.G., Collard F., Johannessen J.A. On dual co-polarized SAR measurements of the ocean surface // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2013. Vol. 10. No. 4. P. 761–765.
- 12. Zhang B., Perrie W., Li X., Pichel W.G. Mapping sea surface oil slicks using Radarsat 2 quad-polarization SAR image // Geophysical Research Letters. 2011. Vol. 120. No. 9. P. 6164–6184.

# Using spaceborne precipitation radar data to investigate variations of slope variance of large-scale waves in a slick

## M.A. Panfilova, V.Yu. Karaev

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia E-mail: marygo@mail.ru

On 20 April 2010, the oil platform DeepWater Horizon exploded in the Gulf of Mexico, which was the biggest accident in history. As a result, oil film covered a sea surface area of several thousand square kilometers. Optical and microwave images with high resolutions were used for monitoring of the situation. The oil spill was so huge that, for the first time, data of a spaceborne precipitation radar with resolution of 5 km could be used to explore it. The dependence of contrast (the ratio of the backscattering cross section from oil-covered sea surface to the backscattering cross section from clean water surface) on viewing angle was calculated. Slope variance of large scale waves and backscattering cross section at nadir were obtained in the radar swath within the framework of the two-scale model of scattering surface using tangent plane approximation. In the paper, the distribution of total slope variance obtained from precipitation radar data (Kuband) was juxtaposed with optical and microwave images. The dependence of total slope variance on wind speed was obtained for slick area from Ku-band data, an analogue to the well-known dependence for slope variance in optical band.

Keywords: oil spill, slope variance, precipitation radar

Accepted: 25.09.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-187-194

## References

- Bass F.G., Fuks I.M., Rasseyanie voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti (Scattering of waves by statistically 1. rough surfaces), Moscow: Nauka, 1972, 424 p.
- Danilychev M.V., Kutuza B.G., Nikolaev A.G., Razvitie radiatsionnoi modeli vzvolnovannoi morskoi poverkhno-2. sti na osnove dannykh eksperimenta po izmereniyu rasseyannogo SVCh radioizlucheniya Solntsa, (Development of the radiation model of the sea surface by using the data of the experiment on the measurement of the scattered microwave radio emission of the Sun), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2006, Vol. 2, No. 3, pp. 68-85.
- 3. Karaev V.Yu., Panfilova M.A., Balandina G.N., Chu K., Vosstanovlenie dispersii naklonov krupnomasshtabnykh voln po radiolokatsionnym izmereniyam v SVCh-diapazone (Retrieval of slope variance by microwave measurements), Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2012, No. 4, pp. 62-77.
- Lavrova O.Yu., Kostyanoi A.G., Katastroficheskii razliv nefti v Meksikanskom zalive v aprele-mae 2010 g. (Cata-4 strophic oil spill in the Gulf of Mexico in April-May 2010), Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2010, No. 6, pp. 67-72.
- 5. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Neftyanye zagryazneniya morskoi poverkhnosti: vzglyad iz kosmosa (Oil pollution of the sea surface: a view from space), Priroda, 2015, No. 9, pp. 83-89.
- Panfilova M.A., Karaev V.Yu., Ispol'zovanie dannykh morskikh buev dlya otsenki dispersii naklonov krupno-masshtabnogo volneniya dlya Ku- i Ka-diapazonov (The use of the sea buoys data for estimating of the variance 6. of slopes of large-scale waves for Ku- and Ka-bands), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz, *kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 119–134. Chu X., He Y., Chen G., Asymmetry and anisotropy of microwave backscatter at low incidence angles, *Transac*-
- 7. tions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, Vol. 50, No. 10, pp. 4014-4024.
- Cox C., Munk W., Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter, Bull. Scripps Institution of 8. Oceanography, 1956, Vol. 6, pp. 401-488.
- Danilytchev M.V, Kutuza B.G., Nikolaev A.G., The application of sea wave slope distribution empirical depen-9. dences in estimation of interaction between microwave radiation and rough sea surface, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009. Vol. 47. pp. 652-661.
- 10. Johnson J.W., Croswell W.F., Characteristics of 13.9 GHz radar scattering from oil films on the sea surface, Radio
- science, 1982, Vol. 11, No. 3, pp. 611–617.
   Kudryavtsev V.N., Chapron B., Myasoedov A.G., Collard F., Johannessen J.A., On dual co-polarized SAR measurements of the ocean surface, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 761–765.
- 12. Zhang B., Perrie W., Li X., Pichel W.G., Mapping sea surface oil slicks using Radarsat 2 quad-polarization SAR image, Geophysical research letters, 2011, Vol. 120, No. 9, pp. 6164-6184.