

## ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА РСА-ИЗОБРАЖЕНИЙ МОРСКИХ ЛЬДОВ СПУТНИКА ENVISAT

В.Ю.АЛЕКСАНДРОВ<sup>1</sup>, Н.Ю.ПИОТРОВСКАЯ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена (Фонд Нансен-центр), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> – ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

*По калиброванным изображениям ENVISAT ASAR WS, полученным на ГГ-поляризации, определены значения УЭПР основных видов морских льдов при угле зондирования 23° и получены зависимости УЭПР молодого, однолетнего и многолетнего льдов от угла зондирования. Разработана методология приведения УЭПР морских льдов к одному углу зондирования, которая позволяет получить равноконтрастное изображение по всей полосе обзора. Представлен пример скорректированного изображения ENVISAT ASAR WS.*

Начиная с 2003 г. РСА-изображения спутника ENVISAT с широкой полосой обзора используются для обеспечения судоходства в морских льдах на трассе Северного морского пути [3, 6]. При их интерпретации определяются такие параметры морских льдов, как возраст и сплоченность, выделяются полыньи и разрывы, положение кромки льдов, границы припая и многолетнего льда [4, 12]. Основным дешифровочным признаком является яркость радиолокационного изображения морских льдов, которая зависит от их удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР). Характерными особенностями изменения УЭПР с возрастанием толщины льда являются низкие значения для начальных льдов и ниласа, их повышение для стадии серого льда и понижение для однолетнего льда [1, 2]. С началом замерзания рассеяние льда, пережившего стадию летнего таяния, значительно увеличивается [7, 10, 11]. УЭПР изменяется в зависимости от форм льда и шероховатости его поверхности, а также зависит от технических параметров радиолокатора, а именно частоты, поляризации и угла зондирования.

Для картирования морских льдов используются изображения ENVISAT ASAR WS на ГГ-поляризации. В то время как изменения УЭПР различных видов морских льдов на ВВ-поляризации достаточно подробно описаны в литературе [7, 8], их особенности на ГГ-поляризации изучены значительно меньше. Так, в работе [5] показаны поляризационные отличия УЭПР начальных видов льда и ниласа, а в работе [10] – однолетнего и молодого льдов. При изменении угла зондирования в диапазоне (16–43°) на изображениях отчетливо видно уменьшение яркости, обусловленное угловой зависимостью УЭПР подстилающей поверхности.

Целями данного исследования являются: 1) оценка УЭПР различных видов морских льдов по калиброванным РСА-изображениям спутника ENVISAT, 2) разработка методологии приведения УЭПР морских льдов к одному углу зондирования с целью получения равноконтрастного изображения независимо от дальности. Решение этих задач имеет большое значение для развития методологии интерпретации РСА-изображений морских льдов.

В работе анализировались калиброванные изображения ENVISAT ASAR WS полного разрешения (150 м при ширине полосы обзора 420 км) на ГГ-поляризации, полученные в различных районах Арктики зимой 2005 и 2006 гг. С использованием методологии Европейского космического агентства УЭПР морских льдов рассчитывалась по квадратам размером (5×5) пикселей с целью уменьшения спекл-шума. На изображениях были выбраны участки водной поверхности, начальных льдов, ниласа, молодого льда, однолетнего ровного и деформированного льдов, припая и многолетнего льда, расположенные под фиксированным углом зондирования (23°). Для получения угловой зависимости УЭПР данные снимались по всей полосе обзора с шагом один градус.

При появлении начальных видов льда на водной поверхности ее УЭПР уменьшалась. Значения УЭПР ледяного сала в начальной стадии его формирования изменялись от -7,43 до -6,15 дБ, в то время как у окружающей взволнованной водной поверхности составило -4,0 дБ. Для типичных зон ледяного сала значения его УЭПР изменялись в диапазоне от -17,5 до -12,0 дБ. Нилас, представляющий собой тонкую эластичную корку льда, характеризуется низким обратным рассеянием. Его УЭПР, вычисленная по характерным участкам изображений ENVISAT ASAR, изменялась в диапазоне от -18,7 до -17,2 дБ. Это несколько превышает приведенные в работе [5] значения УЭПР темного и светлого ниласа (-24 и -20 дБ соответственно), полученные при угле зондирования 35°. Более высокие значения УЭПР в наших данных можно объяснить различием в углах зондирования. Образование солевых цветов на поверхности ниласа и серого льда приводит к увеличению его УЭПР на 3–5 дБ на всех поляризациях [9]. Среднее значение УЭПР серого льда, вычисленное по изображениям ENVISAT ASAR, составило  $-7,4 \pm 0,8$  дБ. Со старением солевых цветов и накоплением между ними снега обратное рассеяние льда уменьшается. Так, по нашим данным, значения УЭПР ровного однолетнего льда изменялись в диапазоне от -16,4 до -11,6 дБ, а припая от -17,5 до -15,0 дБ. Значения УЭПР деформированного однолетнего льда значительно превышали значения для ровного льда и изменялись в диапазоне от -11,2 до -8,4 дБ. Среднее значение УЭПР многолетнего льда составило  $-7,4 \pm 0,7$  дБ, то есть практически не отличается от УЭПР серого льда.

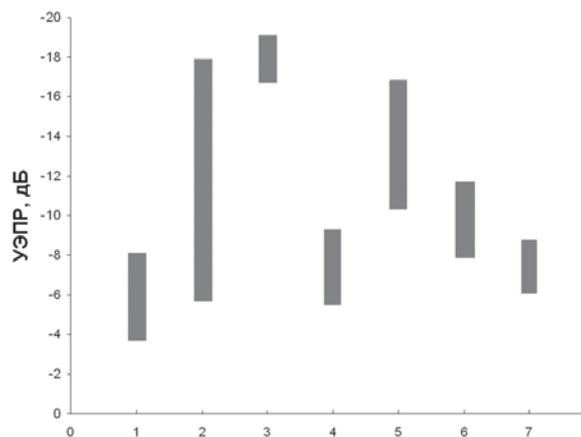


Рис. 1. УЭПР основных видов морских льдов, вычисленные по калиброванным изображениям ENVISAT ASAR (ГГ-поляризация, угол зондирования 23°): 1 – водная поверхность, 2 – начальные виды льда, 3 – нилас, 4 – молодой лед, 5 – однолетний лед, 6 – однолетний деформированный лед, 7 – многолетний лед

Диапазоны изменения УЭПР основных видов морских льдов для угла зондирования  $23^\circ$ , вычисленные по калиброванным изображениям ENVISAT ASAR на ГГ-поляризации, представлены на рис. 1. Характер изменения УЭПР морских льдов разного возраста, в общем, соответствует картине, наблюдаемой на ВВ-поляризации, а также в X-диапазоне.

Уменьшение УЭПР морских льдов с увеличением угла зондирования приводит к значительному уменьшению яркости РСА-изображения в дальней части полосы обзора относительно ближней. Для коррекции этого эффекта необходимо определить угловую зависимость УЭПР водной поверхности, а также молодого, однолетнего и многолетнего льдов. С этой целью на калиброванных изображениях ENVISAT ASAR выделялись относительно однородные участки этих льдов, расположенные по всей ширине полосы обзора, на которых выполнялись измерения с шагом  $1^\circ$ . Полученные угловые зависимости УЭПР для выбранных типов поверхности значительно различались. С увеличением угла зондирования максимальное уменьшение УЭПР  $0,82-1,05$  дБ/ $^\circ$  отмечалось у взволнованной водной поверхности, а минимальное  $0,14-0,20$  дБ/ $^\circ$  – у молодого льда. УЭПР однолетнего льда уменьшалась несколько больше  $0,18-0,42$  дБ/ $^\circ$ , чем многолетнего льда  $0,16-0,24$  дБ/ $^\circ$ .

Разработанный алгоритм приведения изображения к фиксированному углу зондирования включает в себя пересчет яркости РСА-изображения в значение УЭПР для данного угла зондирования, пересчет полученного значения для угла зондирования  $25^\circ$  и пересчет скорректированной УЭПР в новое значение яркости. На рис. 2а представлен фрагмент исходного РСА-изображения морских льдов в северо-вос-

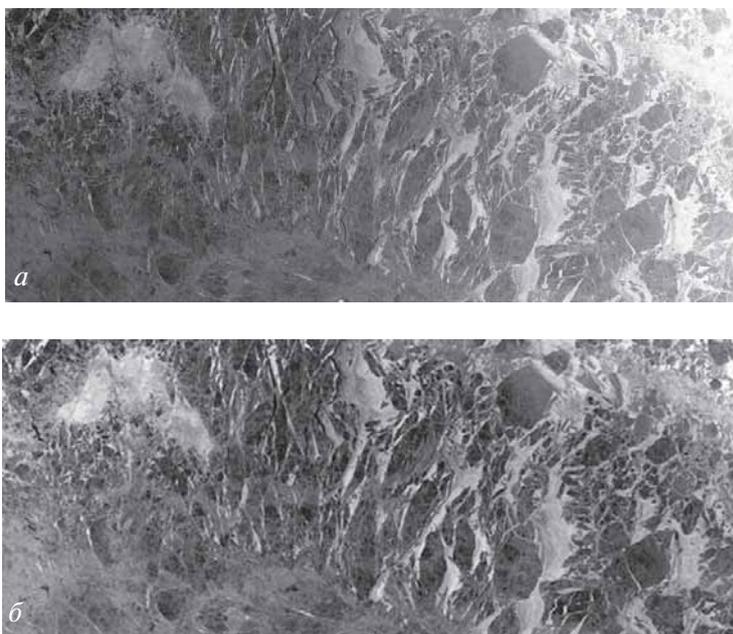


Рис. 2. Приведение УЭПР калиброванного изображения ENVISAT ASAR WS к углу зондирования  $25^\circ$ : а – исходное изображение за 31.03.2006 в районе к югу от Земли Франца-Иосифа в Баренцевом море, преобладает однолетний лед; б – то же изображение, скорректированное на угловое изменение УЭПР (приведенное к углу  $25^\circ$ )

точной части Баренцева моря, полученного 31 марта 2006 г. На нем преобладают гигантские поля однолетнего льда, которые изображаются темным тоном, а между ними выделяются широкие разрывы, покрытые молодым льдом. Для приведения УЭПР к углу зондирования  $25^\circ$  использовался коэффициент  $0,25 \text{ дБ}/^\circ$ . Обработанный таким образом фрагмент изображения имеет примерно одинаковый тон по всей полосе обзора, что значительно облегчает процедуру его дешифрирования (рис. 2б). В ближней и дальней частях полосы обзора значительно улучшился контраст между различными ледовыми объектами.

В работе получены оценки УЭПР различных видов морских льдов на ГГ-поляризации при угле зондирования  $23^\circ$  путем обработки калиброванных РСА-изображений спутника ENVISAT. Оценены угловые зависимости УЭПР взволнованной водной поверхности, серого, однолетнего и многолетнего льдов. Разработана методология приведения УЭПР ледяного покрова к углу зондирования  $25^\circ$ . В зависимости от преобладающего вида ледяного покрова используются коэффициенты изменения УЭПР с увеличением угла зондирования, характерные для водной поверхности, многолетнего и однолетнего льда. Полученное изображение имеет примерно одинаковый тон по всей полосе обзора, что значительно облегчает процедуру его дешифрирования.

*Данные ENVISAT ASAR были предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проекта АО № 1260.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бушуев А.В., Быченков Ю.Д., Лоцилов В.С., Масанов А.Д. Исследование ледяного покрова с помощью радиолокационных станций бокового обзора (РЛС БО): Методическое пособие. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 120 с.
2. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Ред. Л.М.Митник и С.В.Викторов. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 200 с.
3. Alexandrov V.Y., Johannessen O.M., Sandven S. Satellite SARs. SAR sea ice monitoring in the Arctic // Chapters 9.1.1, 9.1.2 in: A. Pasmurov, J. Zinoviev «Radar Imaging and Holography». Stevenage, Herts, UK: The Institution of Electrical Engineers, Michael Faraday House, 2005. P. 191–204.
4. Alexandrov V.Y., Sandven S., Kloster K., Bobylev L.P., Zaitsev L.V. Comparison of sea ice signatures in OKEAN and RADARSAT radar images for the northeastern Barents Sea // Canadian Journal of Remote Sensing. 2004. Vol. 30. № 6. P. 882–892.
5. Beaven S.G., Gogineni S.P., Shanableh M. Radar backscatter signatures in the Central Arctic // International Journal of Remote Sensing. 1994. Vol. 15. № 5. P. 1149–1154.
6. Johannessen O.M., Alexandrov V.Y., Frolov I.Y., Bobylev L.P., Sandven S., Miles M., Pettersson L.H., Kloster K., Smirnov V.G., Mironov Y.U., Babich N.G. Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route: Studies and Applications. Chichester, UK: Springer-Praxis, 2007. 472 p.
7. Kwok R., Cunningham G.F. Backscatter characteristics of the winter ice cover in the Beaufort Sea // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. № C4. P. 7787–7802.
8. Melling H. Detection of features in first-year pack ice by synthetic aperture radar (SAR) // International Journal of Remote Sensing. 1998. Vol. 19. № 6. P. 1223–1249.
9. Nghiem S.V., Martin S., Perovich D.K., Kwok R.M., Drucker R., Gow A.J. A laboratory study of the effect of frost flowers on C-band radar backscatter from sea ice // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. № C2. P. 3357–3370.
10. Onstott R.G. SAR and Scatterometer Signatures of Sea Ice // Ed. Carsey F.D. Microwave Remote Sensing of Sea Ice. Geophysical Monograph 68. Washington, DC: American Geophysical Union. 1992. P. 73–104.

11. *Onstott R.G., Shuchman R.A.* SAR Measurements of Sea Ice // Eds. Jackson C.R., Apel J.R. Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual. 2004. Washington, DC: U.S. Department of Commerce. P. 81–115.

12. *Sandven S., Dalen O., Lundhaug M., Kloster K., Alexandrov V.Y., Zaitsev L.V.* Sea Ice Investigations in the Laptev Sea Area in Late Summer Using SAR Data // Canadian Journal of Remote Sensing. 2001. Vol. 27. № 5. P. 502–516.

*V.Y.ALEXANDROV, N.Y.PIOTROVSKAYA*

#### **DIGITAL PROCESSING OF ENVISAT SAR IMAGES OF THE SEA ICE**

*The backscatter coefficients for major sea ice types at HH-polarization and 23° incidence angle, as well as angular dependencies of backscatter for young, first-year and multiyear ice types are derived from calibrated ENVISAT ASAR WS images. Elaborated methodology of backscatter recalculation to the predetermined incidence angle allows obtaining range independent contrast for the same ice types, as it is shown in an example of corrected ENVISAT ASAR WS image.*