

Ю. В. Гончаренко^{1,2}, Г. Фаркухарсон², В. Н. Горобец¹¹*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины**12, ул. Ак Проскуры, Харьков, 61085, Украина*E-mail: gorobets777@mail.ru²*Applied Physics Laboratory, University of Washington, Seattle, USA*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИБРЕЖНОГО ВОЛНЕНИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМ РАДИОЛОКАТОРОМ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Прибрежные зоны морей и океанов всегда были и остаются особенно значимыми в жизнедеятельности большинства людей. Наряду со стабилизирующим фактором погоды и климата, обусловленным близостью воды, на границе суши и моря возникают специфические градиенты и потоки тепла, влаги, давления и др., что порождает чрезвычайные ситуации и приводит к необходимости их диагностики и прогнозирования. Основой целенаправленного изучения воздействия природных и антропогенных факторов на прибрежные зоны и, в частности, на морские берега является мониторинг береговых процессов. Среди современных методов мониторинга состояния окружающей среды особенно перспективными являются дистанционные методы зондирования. В работе представлены результаты радиолокационного зондирования прибрежной зоны в дельте реки Нью Ривер (штат Северная Каролина, США) с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА). Проведена оценка параметров прибрежного волнения, таких как высота волны, фазовая скорость, длина гребня и т. д., по РСА изображениям. Разработан алгоритм определения ширины и формы спектра радиальной компоненты скорости частиц жидкости в обрушивающейся волне и получена зависимость диапазона радиальных скоростей частиц от значительной высоты волн. Ил. 9. Табл. 1. Библиогр. 15 назв.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радар с синтезированной апертурой, обрушивающиеся волны.

За последнее время разработка и развитие методов дистанционного зондирования прибрежной зоны при помощи радиолокаторов, размещенных на легких самолетах или беспилотных летательных аппаратах, становятся все более актуальными.

Прибрежная морская зона (ПЗ) – зона взаимодействия моря и суши, состоящая из морского берега, береговой линии и берегового подводного склона. Ширина ПЗ изменяется от нескольких десятков метров до нескольких километров. В пределах этой зоны развиваются абразия берегов и аккумуляция порождаемых ею осадков. На формирование ПЗ влияет ряд факторов – морские течения, волнение, климат, наличие рек и т. д. [1].

В мониторинге процессов, происходящих в ПЗ, заинтересовано большое количество естествоиспытателей, инженеров, экологов, рыбаков, моряков и др.

Исследование процессов, происходящих в ПЗ, является сложной задачей. Значительная часть знаний о динамике таких зон получена с использованием дрейфующих или неподвижных сенсоров. Датчики давления применяются для определения высоты волны, СВЧ-измерители скорости и ультразвуковые измерители вертикального профиля скорости используются для определения скорости прибрежных течений. Однако использование таких датчиков при мониторинге больших пространств требует больших финансовых затрат. Поэтому разработка радиолокационных методов зондирования морской поверхности для проведения измерений динамики ПЗ является актуальной задачей. Основным недостатком радиолокационных методов является то, что измерение

гидродинамических параметров ПЗ производится косвенно, что требует привлечения специальных вычислительных алгоритмов для получения этих параметров. Кроме того, большинство радиолокационных методов позволяют получать информацию только о процессах, происходящих на морской поверхности (так как СВЧ-радиоволны не проникают в толщу воды). Тем не менее, в настоящее время существует несколько методик, позволяющих определить некоторые океанографические параметры, такие как поверхностные течения [2–4] и батиметрические изменения в мелководной зоне [5] по радиолокационным измерениям. Одна из таких методик заложена в основу построения измерительного комплекса на базе двух малогабаритных двухлучевых продольных (*along track*) интерферометрических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) [6], разработанного для построения высокоточных карт течений в ПЗ [7]. Наименее изученной проблемой, возникшей при решении этой задачи, является влияние отражений от обрушивающихся волн на качество РСА-изображений. За счет большой эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) и высоких скоростей отражателей обрушивающиеся волны хорошо заметны на изображениях, полученных при помощи РСА. Несмотря на значительное количество экспериментов по изучению прибрежной зоны при помощи РСА [8, 9], до настоящего времени не уделялось достаточно внимания исследованию обрушивающихся волн.

Целью данных исследований является анализ РСА-изображений обрушивающихся волн для дальнейшего использования полученной ин-

формации при оценке параметров прибрежного волнения, таких как высота волны, фазовая скорость, длина гребня и т. д.

Описание измерительной системы. Экспериментальные исследования проводились с помощью измерительного комплекса (рис. 1), состоящего из двух малогабаритных двухлучевых продольных интерферометрических РСА, антенной системы, двухчастотного GPS-приемника, инерциального навигационного блока и вычислительного устройства.

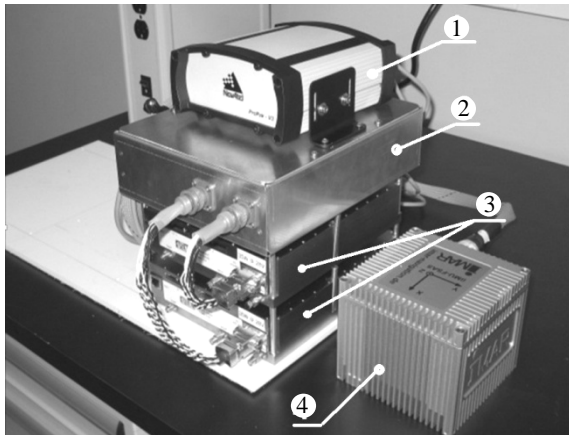


Рис. 1. Измерительный комплекс: 1 – GPS-приемник; 2 – блоки питания; 3 – двухканальный РСА; 4 – инерциальный навигационный блок

Измерительный комплекс установлен на небольшом самолете (рис. 2). Ширина спектра излучаемого сигнала каждого из радиолокаторов системы составляет 80 МГц, что соответствует разрешению по дальности радиолокатора 1,88 м.



Рис. 2. Антенны РСА, смонтированные на легком самолете «Цессна-172»: 1 – передающая антенна; 2 – приемные антенны

В представленной серии экспериментов использовался один РСА с тремя полосковыми антеннами (рис. 2). Для определения положения

самолета и его направления движения, компонент вектора скорости и ускорения использовались данные двухчастотного GPS-приемника и инерциального навигационного блока. Это позволило определять координаты самолета с точностью до 5 см и компоненты вектора скорости с точностью до 0,05 м/с. Расстояние между фазовыми центрами антенн – 1 м, средняя скорость самолета 50 м/с. Детальное описание интерферометрических РСА и методика проведения измерений приведены в работах [6, 7]. Основные тактико-технические характеристики этих локаторов представлены в таблице.

Тактико-технические характеристики РСА

Характеристики	Параметры
Количество каналов (передача/прием)	2/4
Диапазон рабочих частот, ГГц	4,3...4,5
Излучаемая мощность	1 Вт
Тип сигнала	непрерывный
Рабочая полоса, МГц	80
Разрешение по дальности, м	1,88
Ширина диаграммы направленности в горизонтальной/вертикальной плоскости, градусы	7/25
Угол между направлением движения и направлением впередсмотрящей/назадсмотрящей антенны, градусы	30/150

Методика проведения эксперимента. Представленные данные получены в ходе серии экспериментов, проведенных 1–20 мая 2012 г. в дельте реки Нью Ривер (штат Северная Каролина, США) Лабораторией прикладной физики Университета Вашингтона (*Applied Physics Laboratory, University of Washington*) в рамках программы RIVET. Эксперименты проводились в различных погодных условиях, при различной высоте и направлении волн, разной скорости ветра, во время высокой и низкой фазы прилива. Для сбора данных о состоянии прибрежной мелководной зоны было установлено 20 датчиков давления. Для определения направления и скорости течений за час до начала отлива в верховьях устья реки выпускались 24 дрейфующих буя. Карта прибрежной зоны исследуемого района представлена на рис. 3 [10]. Высота волнения в зоне эксперимента определялась при помощи датчиков давления, установленных на расстоянии 170, 550 и 750 м от береговой линии (датчики $q17$, $q18$ и $p28$ на рис. 4). Временные реализации давления конвертировались в реализации высот морской поверхности. Для 8-минутных интервалов также вычислялась значительная высота волн [11].

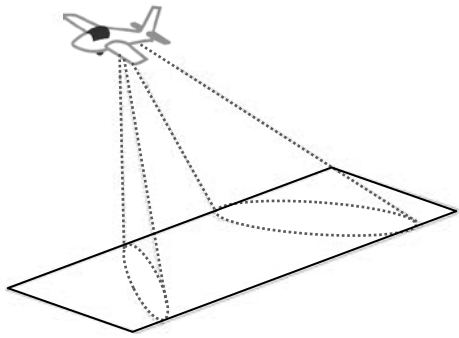


Рис. 3. Положение диаграмм направленности антенн РСА в пространстве



Рис. 4. Карта устья реки Нью Ривер: q17, q18, p28 – датчики давления

Сигнатуры обрушивающихся волн. Взаимодействие мощных приливных и речных течений с дном в мелководных зонах приводит к образованию мощных обрушивающихся волн вблизи устья и вдоль прибрежной зоны, примыкающей к устью. Процесс разрушения волн характеризуется существенным увеличением ЭПР и радиальной скорости частиц приповерхностного слоя воды.

Отличительные признаки обрушивающихся волн хорошо видны на картах ЭПР (рис. 5). Размер участка поверхности, представленного на этом рисунке, составляет 1 800×1 800 м. Зона 1 на рис. 5 соответствует зоне с интенсивным обрушением волн. Если ЭПР рассеивателя флуктуирует в течение интервала наблюдения, разрешение РСА ухудшится в соответствии с [12]:

$$\rho_{flux} = \frac{\lambda}{2\beta} \left[1 + \left(\frac{\beta R}{V\tau} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где λ – рабочая длина волны; β – ширина диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости; R – дальность; V – скорость носителя; τ – корреляционный интервал времени.

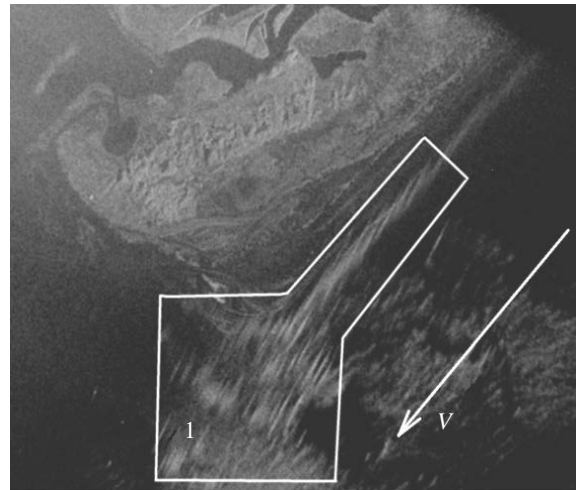


Рис. 5. Карта интенсивностей рассеянного сигнала: 1 – зона интенсивного обрушения волн; V – направление полета

Расчеты показывают, что для случая обрушивающихся волн ухудшение разрешения, вызываемое флуктуациями ЭПР, не превышает 15 м.

Кроме ошибки, связанной с флуктуациями ЭПР, существует ошибка, связанная с ненулевой радиальной скоростью рассеивателя. Картина скоростей приповерхностного слоя воды приведена на рис. 6. Размер участка поверхности и направление полета такие же, как и на рис. 5.

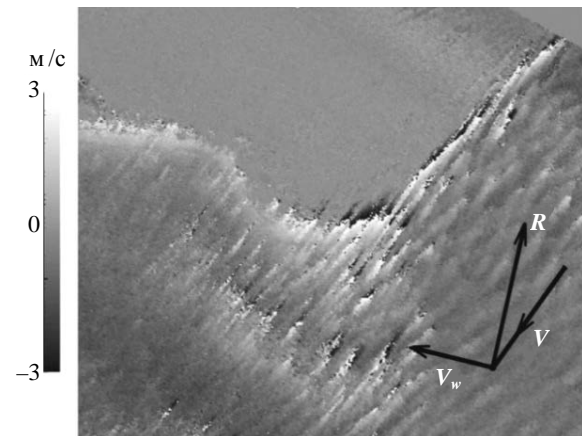


Рис. 6. Карта скоростей поверхностного слоя в зонах интенсивного обрушения волн: V – направление движения самолета; R – линия визирования ATI SAR; V_w – составляющая вектора скорости морской поверхности

Азимутальное смещение движущейся цели может быть получено из выражения:

$$\Delta x = V_r \frac{R}{V}, \quad (2)$$

где V_r – радиальная скорость рассеивателя.

Известно [13], что диапазон орбитальных скоростей разрушающихся волн со значительной высотой $H_{sign} \approx 1$ м может превышать 3 м/с.

Таким образом, при скорости самолета 45 м/с на расстоянии $R = 2\,000$ м длина «штриха» может превышать 130 м, что почти на порядок больше размытия цели в радиальном направлении. На рис. 7 представлено детализированное РСА-изображение зоны прибора. Линия AZ параллельна азимутальному направлению РСА, а линия AB – направлению движения носителя. Размер участка земной поверхности, представленный на рис. 7, составляет 600×600 м. «Штрихи», обусловленные обрушающимися волнами, отчетливо видны на данном рисунке.

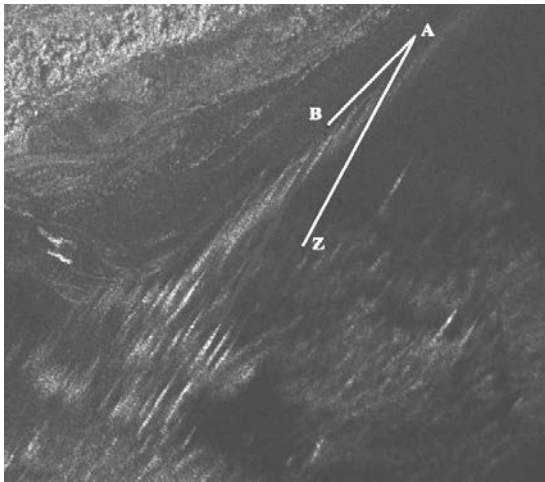


Рис. 7. Детализированное РСА-изображение зоны обрушающихся волн: AB – направление полета (параллельно береговой линии); AZ – азимутальное направление

Если сложная цель состоит из большого количества рассеивателей, обладающих различными скоростями, результирующее РСА-изображение такой цели будет представлять дугу окружности с радиусом R и длиной, пропорциональной ширине спектра радиальных скоростей цели. Если расстояние до цели значительно больше длины дуги, дуга трансформируется в линию «штрих». Расстояние между каждой точкой «штриха» и реальным положением цели будет соответствовать радиальной скорости элементарного рассеивателя, а интенсивность этой точки – ЭПР этого рассеивателя.

Исходя из батиметрических данных, на отрезке AB , длина которого составляет 150 м, наклон дна постояен, поэтому можно предположить, что разрушение волн начинается примерно на одинаковой дистанции от линии прибора. Усредненная относительно береговой линии интенсивность «штрихов» представлена на рис. 8 (штриховая линия). Также на данном рисунке представлены усредненные коэффициенты интерферометрической когерентности (сплошная линия), полученные из выражения [14]:

$$C = \frac{I_1 \times I_2^*}{\sqrt{(I_1 \times I_1^*)(I_2 \times I_2^*)}},$$

где C – коэффициент интерферометрической когерентности; I_1, I_2 – комплексное значение сигнала, принятого первой и второй антеннами. Данные получены при 30-секундном усреднении.

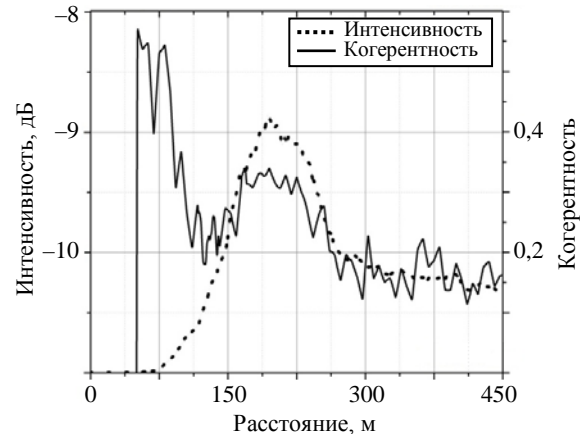


Рис. 8. Усредненная интенсивность «штрихов» и коэффициент интерферометрической когерентности

График на рис. 8 можно условно разделить на три области: $0 \dots 100$ м, $100 \dots 250$ м и $250 \dots 400$ м. Область $0 \dots 100$ м соответствует сигналам, отраженным от песчаного пляжа. Отраженный от песка сигнал обладает низкой интенсивностью и высокими значениями когерентности. Область $100 \dots 250$ м соответствует зоне прибора, $250 \dots 400$ м – глубоководной (глубина больше 4 м) зоне.

Средняя длина «штрихов», представленных на рис. 7 и 8, составляет $110 \dots 120$ м, что соответствует радиальным скоростям $2,4 \dots 2,7$ м/с.

Параметром, определяющим характеристики морского волнения, являлась значительная высота волн, полученная на 8-минутном временном интервале. Направление морского волнения определялось с помощью стационарного буйа 41109 ($34,484^\circ$ с.ш., $77,3^\circ$ з.д.), принадлежащего *National Data Buoy Center NOAA* [15]. Буй 41109 расположен в 5 км от береговой линии и в 6 км от устья реки Нью Ривер. На рис. 9 представлена зависимость ширины спектра радиальных скоростей от значительной высоты морского волнения для различных углов прихода волн. Как видно из рисунка, значение угла прихода волн не оказывает существенного влияния на зависимость, которая может быть аппроксимирована линейной функцией для диапазона высот морских волн $H_{sig} = 30 \dots 70$ см.

Диаграмма рассеяния, представленная на рис. 9, может быть аппроксимирована линейной функцией вида:

$$H_{sign} = 20,5 \Delta V_r + 2,33, \quad (4)$$

где H_{sign} – значительная высота морского волнения, см; ΔV_r – диапазон радиальных скоростей разрушающейся волны, м/с.

Полная мощность СВЧ-сигнала, рассеянного разрушающейся волной, дает информацию о высоте волны. Но следует отметить, что сигнал, рассеянный волной высотой 70 см, всего в 10 раз превосходит сигнал от волны высотой 30 см. Таким образом, требования к временной стабильности РСА-системы должны быть очень высоки.

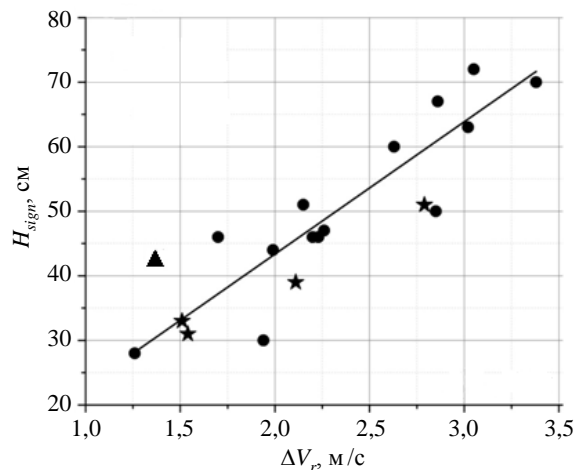


Рис. 9. Взаимосвязь диапазона радиальных скоростей и значительной высоты морского волнения для различных углов прихода волн: ★ – $\alpha_{arr} = 40...70^\circ$; ● – $\alpha_{arr} = 70...110^\circ$; ▲ – $\alpha_{arr} = 110...140^\circ$

Выводы. Изображения, полученные при помощи РСА, могут быть использованы для выделения обрушивающихся волн и определения их высоты в мелководной зоне.

В результате исследований получены РСА-изображения интенсивности отраженного сигнала и скоростей отражателей на морской поверхности в устье реки Нью Ривер (штат Северная Каролина, США).

В работе представлен алгоритм определения ширины и формы спектра радиальной компоненты скорости жидкости в обрушивающейся волне и получена зависимость ширины спектра от существенной высоты волны.

Показано, что диапазон радиальных скоростей рассеивателей в обрушивающейся волне не зависит от углов прихода волны.

Работа выполнена при поддержке *Office of Naval Research* и фонда Фулбрайта.

Библиографический список

1. *Прибрежная морская зона* [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://wiki.wargaming.net/ru/Navy](http://wiki.wargaming.net/ru/Navy). – Загл. с экрана.

2. Young I. R. A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents / I. R. Young, W. Rosenthal, F. Ziemer / *J. Geophys. Res.* – 1985. – 90, Iss. C1. – P. 1049–1059.
3. McGregor J. A. Ocean surface currents obtained from microwave sea-echo Doppler spectra / J. A. McGregor, E. M. Poulter, M. J. Smith // *J. Geophys. Res.* – 1997. – 102, Iss. C11. – P. 25227–25236.
4. *Radar-derived interferometric surface currents and their relationship to subsurface current structure* / D. Moller, S. J. Frasier, D. L. Porter, R. E. McIntosh // *J. Geophys. Res.* – 1998. – 103, Iss. C6. – P. 12839–12852.
5. Trizna D. B. Errors in bathymetric retrievals using linear dispersion in 3-D FFT analysis of marine radar ocean wave imagery / D. B. Trizna // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2001. – 39, N 11. – P. 2465–2469.
6. Farquharson G. A miniaturized dual-beam along-track interferometric SAR for nearshore ocean remote sensing / G. Farquharson, D. Widjaja, A. Jessup // *IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS 2012): conf. proc.* – Munich, 2012.
7. Eshbaugh J. V. Measurement of Sea Surface Displacement with Interferometric Radar / J. V. Eshbaugh, S. J. Frasier // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. – 2002. – 19, Iss. 7. – P. 1087–1095.
8. Marom M. Energy density directional spectra of a nearshore wave field measured by interferometric synthetic aperture radar / M. Marom, L. Shemer, E. B. Thornton // *J. Geophys. Res.* – 1991. – 96, Iss. C12. – P. 22125–22134.
9. *Mapping surface currents and waves with interferometric synthetic aperture radar in coastal waters: Observations of wave breaking in swell-dominant conditions* / P. A. Hwang, J. V. Toporkov, M. A. Sletten, S. P. Menk // *J. Phys. Oceanogr.* – 2012. – 43, Iss. 3. – P. 563–582.
10. *Field Research Facility* [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.frf.usace.army.mil](http://www.frf.usace.army.mil). – Загл. с экрана.
11. *How are significant wave height, dominant period, average period, and wave steepness calculated* [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.ndbc.noaa.gov/wavecalc.shtml](http://www.ndbc.noaa.gov/wavecalc.shtml). – Загл. с экрана.
12. Lyzenga D. R. Analysis of scatterer motion effects in Marsen X band SAR imagery / D. R. Lyzenga, R. A. Shuchman // *J. Geophys. Res.* – 1983. – 88, Iss. C14. – P. 9769–9775.
13. *Encyclopedia of Coastal Science* / M. L. Schwartz (ed.). – Springer, 2005. – 2011 p.
14. *Keydel W. Normal and Differential SAR Interferometry // Radar Polarimetry and Interferometry* / W. Keydel // *Educational Notes RTO-EN-SET-081bis*. – 2007. – P. 2-1–2-40.
15. *National Data Buoy Center NOAA*: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://www.ndbc.noaa.gov](http://www.ndbc.noaa.gov). – Загл. с экрана.

Рукопись поступила 14.12.2015.

U. Goncharenko, G. Farquharson, V. Gorobets

THE DETERMINATION OF NEARSHORE WAVES PARAMETERS BY THE INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR

Nearshore zones have a significant impact on life and economics. Along with the weather and climate stabilizing factor, caused by the water proximity, on the border of land and sea occur specific gradients and flows of heat, moist, pressure, etc. They might cause dangerous nature phenomena such as hurricanes, floods, etc. which need to be predicted and monitored. The remote sensing of neashore zone might be a part of such monitoring. The results of microwave remote sensing of neashore zone of New River inlet obtained by frequency-modulated continuous wave along-track interferometric synthetic aperture radar are presented.

The estimation of neashore waves parameters such as wave height, phase velocity, etc. using ATI SAR images are performed. The algorithm for the estimation of bandwidth and shape of the radial velocity spectrum of braking wave is proposed and the dependence of the bandwidth of radial velocity spectrum on significant wave height is obtained.

Key words: remote sensing, synthetic aperture radar, breaking waves.

Ю. В. Гончаренко, Г. Фаркухарсон,
В. М. Горобець

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ
ПРИБЕРЕЖНОГО ХВИЛЮВАННЯ
ЗА ДОПОМОГОЮ
ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО РАДІОЛОКАТОРА
З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ

Прибережні зони морів і океанів завжди були і залишаються особливо значущими в життєдіяльності більшості

людей. Поряд із стабілізуючим фактором погоди і клімату, зумовленим близькістю води, на межі суші і моря виникають специфічні градієнти і потоки тепла, вологи, тиску та ін., що породжує надзвичайні ситуації та призводить до необхідності їх діагностики та прогнозування. Основою цілеспрямованого вивчення впливу природних і антропогенних факторів на прибережні зони і, зокрема, на морські береги, є моніторинг берегових процесів. Серед існуючих сучасних методів моніторингу стану навколишнього середовища особливо перспективними є дистанційні методи зондування. У роботі представлено результати радіолокаційного зондування прибережної зони в дельті річки Нью Рівер (штат Північна Кароліна, США) за допомогою радіолокатора із синтезованою апертурою (РСА). Проведено оцінку параметрів прибережного хвилювання, таких як висота хвилі, фазова швидкість, довжина гребеня та ін., за РСА-зображенням. Розроблено алгоритм визначення ширини і форми спектра радіальної компоненти швидкості частинок рідини у хвилі, що обрушується; отримано залежність діапазону радіальних швидкостей частинок від значної висоти хвилі.

Ключові слова: дистанційне зондування; радар з синтезованою апертурою; хвилі, що обрушуються.