

# Реанализ проявлений океанских внутренних волн на изображениях РСА спутника «Алмаз-1»

И.Е. Козлов, В.И. Сычёв

*Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ)*

*195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский пр-т, д. 98*

*E-mail: [igor.eko@gmail.com](mailto:igor.eko@gmail.com)*

В статье проводится анализ опубликованных РСА изображений проявлений океанских внутренних волн в Баренцевом море в S-диапазоне. Интерпретация проявлений внутренних волн проводится по модели Radar Imaging Model, использованной в «стандартном» релаксационном приближении и в полном виде, учитывая влияние обрушений волн на короткие волны. Модельные расчёты показали, что, несмотря на малый вклад обрушений волн в обратное рассеяние, модуляция спектра брэгговских волн, обуславливающих резонансное рассеяние, определяется исключительно влиянием волновых обрушений, поэтому вклад обрушений волн в проявления ВВ на РСА изображении является определяющим.

## Введение

Океанские внутренние волны (ВВ) имеют большое прикладное значение для океанологов, поскольку влияют на множество протекающих в океане процессов. ВВ являются источником перемешивания поверхностных и глубинных вод, вертикального и горизонтального обмена в океане и переноса морских организмов, осадков и загрязнителей. Изучение проявлений ВВ на космических радиолокационных снимках представляется насущной и важной прикладной задачей.

Существует значительное количество статей [1-3] и интернет-каталоги [[http://www.internalwaveatlas.com/Atlas2\\_index.html](http://www.internalwaveatlas.com/Atlas2_index.html), <http://www.ifm.uni-hamburg.de/ers-sar/Sdata/oceanic/intwaves/index.html>], в которых приведены наблюдения ВВ и анализ особенностей их проявления на изображениях радаров с синтезированной апертурой (РСА). Несмотря на то, что на снимках в L-, C-, X-диапазонах ВВ хорошо идентифицируются, интерпретация проявлений ВВ в радиолокации в рамках «классических» моделей взаимодействия волн с течениями и моделей рассеяния является не до конца решённой проблемой. В работе [4] показано, что применение стандартной модели взаимодействия волн с течениями в релаксационном приближении [5] для анализа РСА изображений в С-диапазоне не позволяет воспроизвести наблюдаемых радиолокационных контрастов УЭПР. В недавней работе [6] было предложено дальнейшее развитие модели проявления течений в спектре ветровых волн, учитывающей влияние обрушения волн как на спектр ветрового волнения, так и на обратное рассеяние радиоволн.

Целью данной работы является анализ опубликованных ранее РСА изображений проявлений ВВ в Баренцевом море в S-диапазоне с использованием модели недавно предложенной в [6] (далее, модель RIM). Модель RIM была создана для моделирования произвольных океанических явлений - океанических фронтов, течений и, в том числе, внутренних волн. В данной работе указанная модель используется как в «стандартном» релаксационном приближении, так и в полном виде, учитывая влияние волновых обрушений на модуляции коротких волн, в частности брэгговских волн. Исходными данными для моделирования послужили характеристики ВВ, рассчитанные по РСА из [7], с использованием программного пакета UNESCO Bilko ([www.unesco.bilko.org](http://www.unesco.bilko.org)).

## Моделирование

Для исследования проявлений ВВ в юго-восточной части Баренцева моря было использовано радиолокационное изображение РСА «ЭКОР» космического аппарата «АЛМАЗ-1» в S-диапазоне от 5 июля 1991 года (виток 1541в, длина волны,  $\lambda=9,6$  см, ГГ-поляризация, пространственное раз-

решение 15 x 15 м) из [7] (см., рис.1). Угол падения радиолуча  $\theta = 42^\circ$ , потому вклад зеркальных отражений в обратное рассеяние не рассматривался.

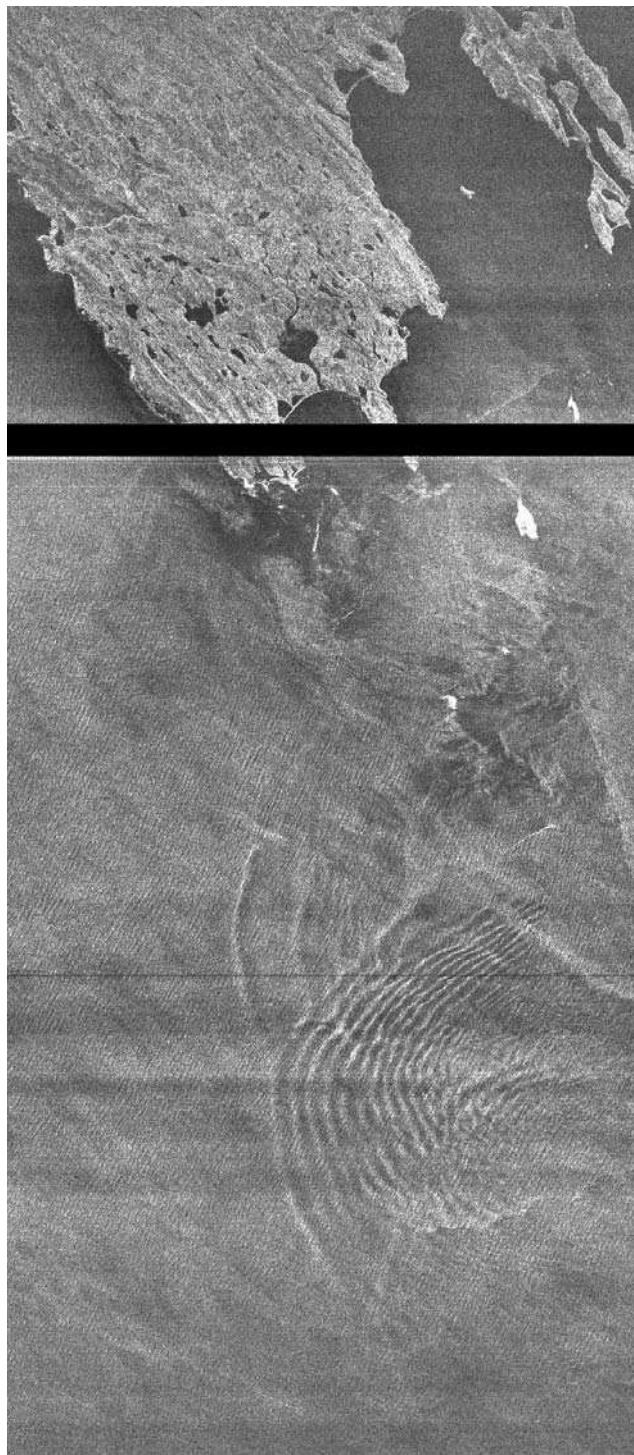


Рис. 1. РЛИ спутника «АЛМАЗ-1». © НПО Машиностроения

Для определения основных характеристик ВВ было использовано программное обеспечение UNESCO Bilko ([www.unesco.bilko.org](http://www.unesco.bilko.org)) версии 3.2 [8]. Рассчитанные характеристики ВВ (количество волн в пакете, длины волн в разных частях пакета, фазовая скорость прохождения пакетов) и данные о скорости и направлении приводного ветра и геометрии РСА-съёмки, взятые из [7], были использованы в качестве входных параметров для моделирования по модели RIM. Параметры, использованные в модельных расчётах, приведены в табл.1.

Таблица 1. Параметры, использованные в модельных расчётах

Наименование параметра	Значение параметра	
Радиодиапазон	S	L1=175
$\lambda$ , длина радиоволны, см	9,6	L2=165
$\theta$ , угол падения радиолуча, °	42	L3=155
Поляризация сигнала	ГГ	L4=145
U, скорость ветра, м/с	5	L5=135
Направление ветра	запад. четверти	L6=125
Угол между направлением ветра и направлением распространения ВВ, °	$\approx 170$	L7=115
C, фазовая скорость ВВ, м/с	0,4	L9=95
Hth, глубина залегания термоклина, м	30	L10=85
L, полуширина солитона ВВ, м		L11=75

Для проведения расчетов, наблюдаемый пакет ВВ был смоделирован в виде суперпозиции солитонов. Форма каждого из солитонов задавалась в виде, соответствующем классическому решению КдВ. Соответствующее поле скорости, индуцируемое каждым из солитонов ВВ на поверхности, имеет вид:

$$u = u_0 \operatorname{sech}^2((x-Ct)/L) \quad (1)$$

где  $u_0$  – амплитуда орбитальной скорости,  $L$  - полуширина солитона,  $C$  - фазовая скорость,  $t$  - время. Амплитуды орбитальной скорости были заданы таким образом, чтобы контрасты УЭПР, наблюдаемые на РЛИ, соответствовали модельным контрастам УЭПР. Так, значению фазовой скорости,  $C = 0,4$  м, соответствовало значение амплитуды орбитальной скорости для первого солитона,  $u_0 = 0,37$  м, с постепенным уменьшением значений  $u_0$  к тылу пакета ВВ.

### Результаты модельных расчётов

На рис. 2 приведен увеличенный фрагмент исходного РЛИ с сечением вдоль пакета ВВ. На

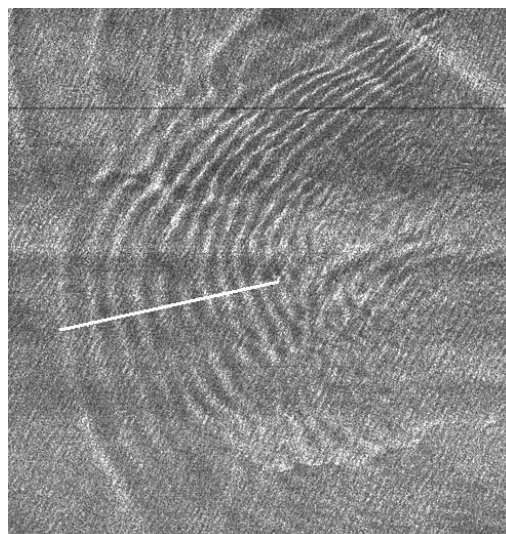


Рис. 2. Увеличенный фрагмент исходного РЛИ с сечением вдоль пакета ВВ. © НПО Машиностроения

рис. 3 приведены вариации УЭПР, вызванные прохождением ВВ, вдоль сечения, показанного на рис. 2. На рис. 4 приведены модельные расчёты контрастов УЭПР, вызванных ВВ.

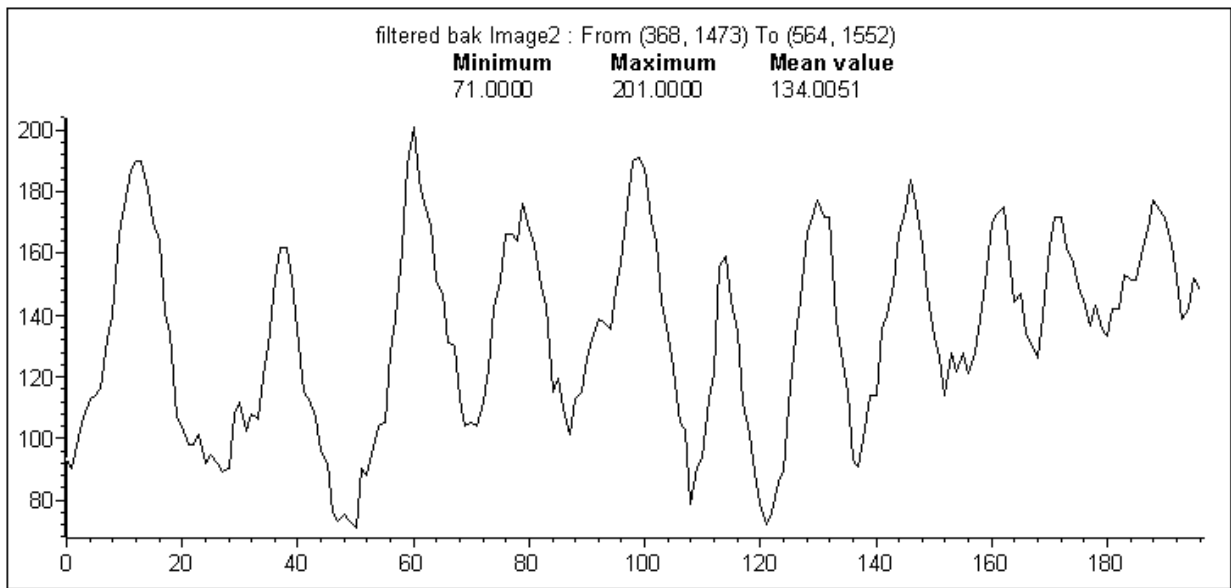


Рис. 3. Наблюдаемые на РЛН проявления ВВ

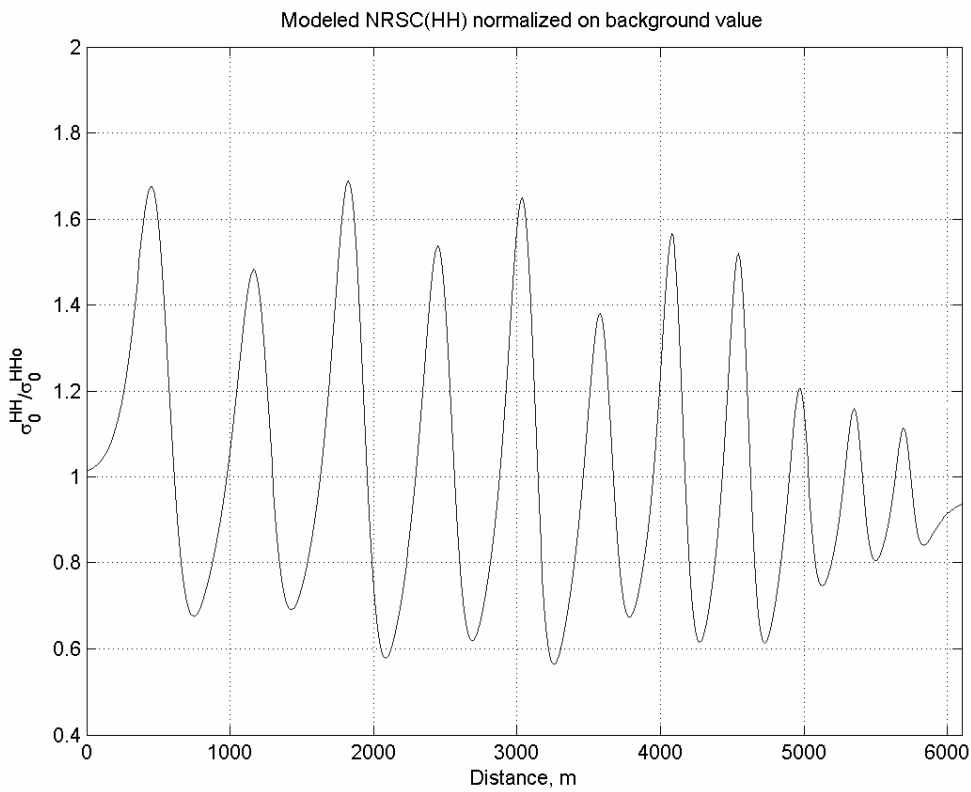


Рис. 4. Модельные расчёты контрастов УЭПР, вызванных ВВ

На рис. 5-6 представлены контрасты спектра брэгговских волн, рассчитанные по полной модели RIM и в «стандартном» релаксационном приближении, которое не учитывает влияния облучений волн на модуляции спектра брэгговских волн.

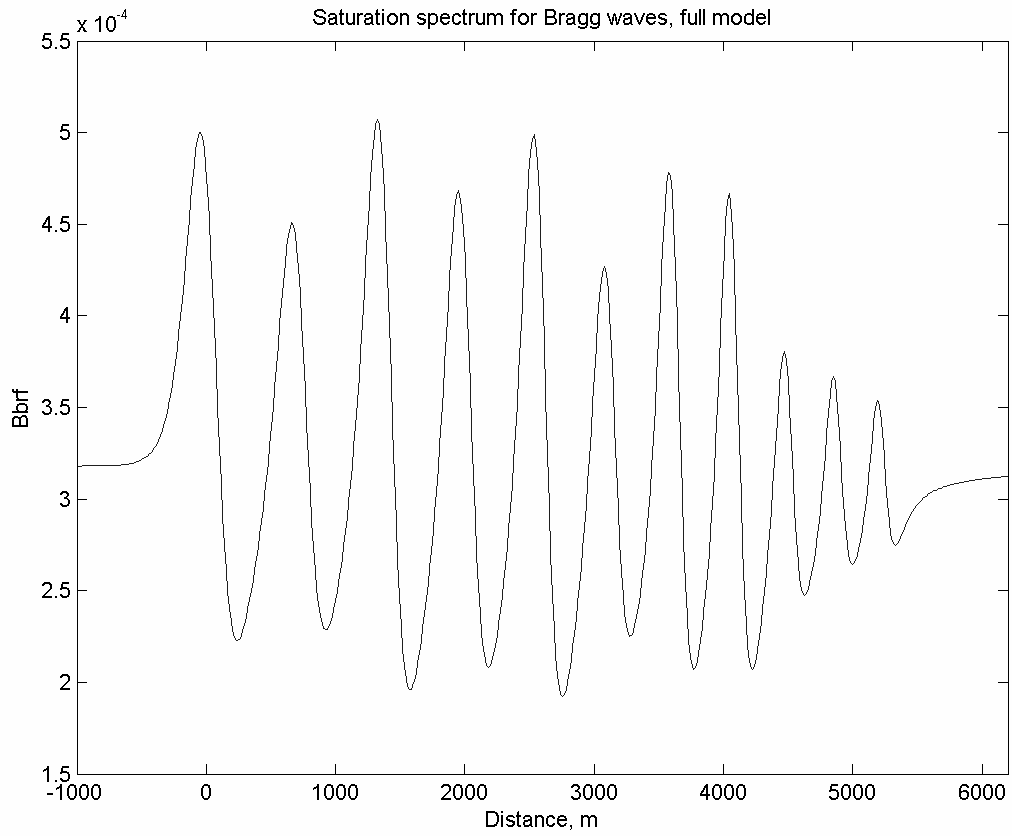


Рис. 5. Контрасты спектра брэгговских волн по модели RIM

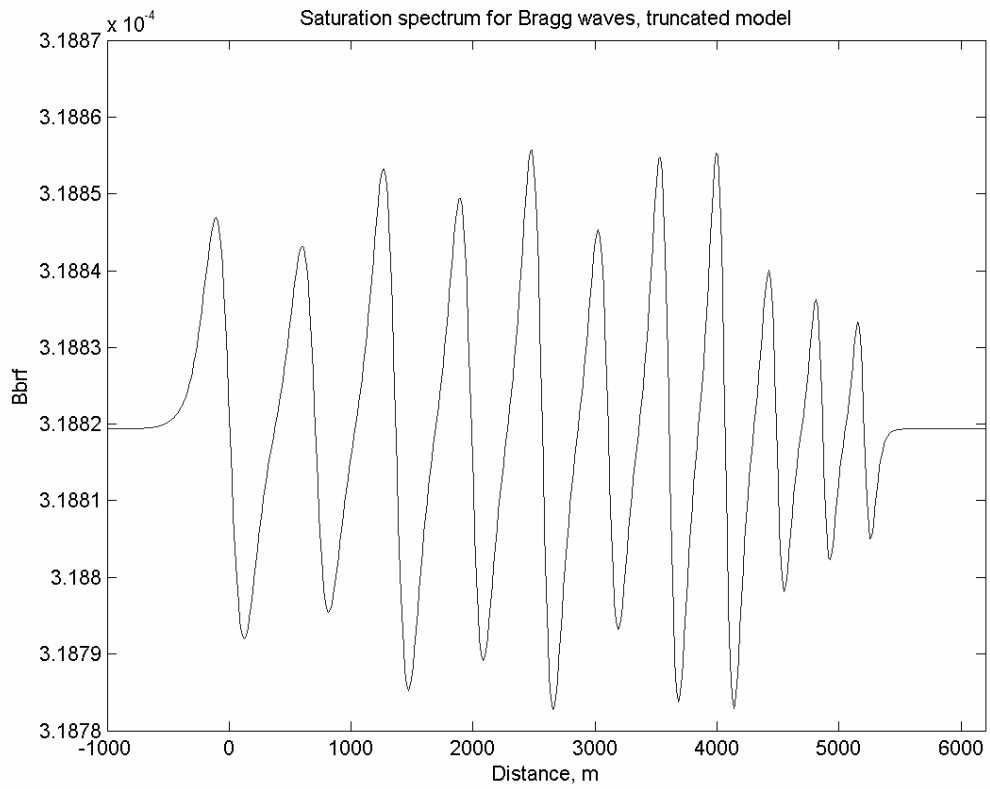


Рис. 6. Контрасты спектра брэгговских волн по модели RIM в релаксационном приближении

Из рисунков следует, что контраст  $K_{full}$  спектра брэгговских волн по полной модели имеет значения в диапазоне  $K_{full} \sim 0.6$ . В то же время, контраст  $K_{rel}$  спектра брэгговских волн для модели в релаксационном приближении имеет значения порядка  $K_{rel} \sim 0.00011$ . Таким образом, в S-диапазоне модель в релаксационном приближении сильно недооценивает наблюдаемые модуляции спектра брэгговских волн при прохождении ВВ, т.к. контраст спектра брэгговских волн фактически равен нулю без учёта влияния модуляций обрушений волн на спектр. В то же время, полная модель, учитывающая влияние волновых обрушений, дает сильные модуляции спектра брэгговских волн, что говорит о том, что спектр брэгговских волн определяется исключительно влиянием волновых обрушений.

На рис. 7 представлен график вкладов различных компонент рассеяния в полную УЭПР морской поверхности. Все значения УЭПР нормированы на полное значение УЭПР.

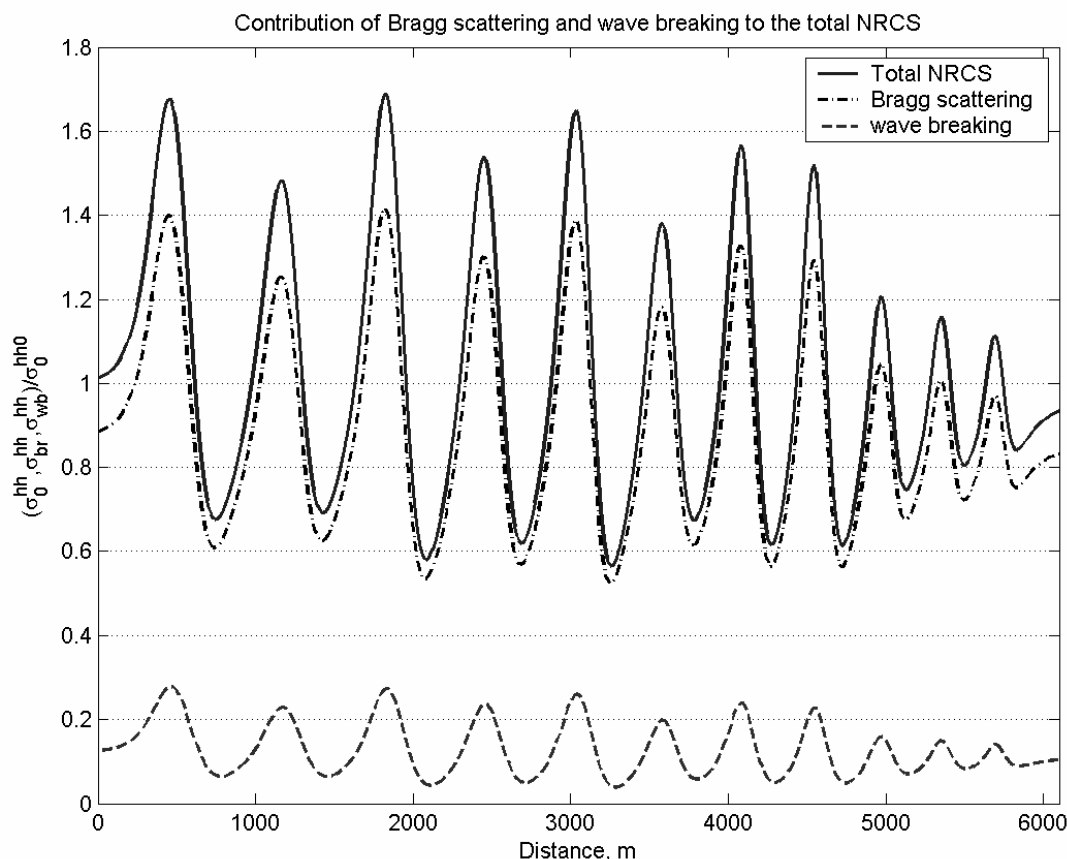


Рис. 7. Модуляция УЭПР морской поверхности в S-диапазоне. Сплошной линией показана полная УЭПР, штрих-пунктирной линией - вклад резонансного (брэгговского) рассеяния, пунктирной линией – вклад обрушений волн

Результаты моделирования показывают значительный вклад резонансного (брэгговского) рассеяния в полную УЭПР морской поверхности. С другой стороны, вклад обрушений волн в обратное рассеяние невелик и не превосходит 20%. Но поскольку модуляция спектра брэгговских волн обусловлена именно обрушениями волн, как показано выше на рис. 5-6, вклад волновых обрушений в проявления ВВ на РСА изображении является определяющим. Поэтому для верной интерпретации проявлений ВВ на РЛИ в S-диапазоне в рамках моделей радиолокационных проявлений ВВ необходимо учитывать модуляции брэгговских волн обрушениями волн.

На рис. 8-11 показаны вклады обрушений волн в проявления ВВ на РЛИ в X, C, S, L-диапазонах, где сплошной линией обозначена общая УЭПР морской поверхности, а штриховой линией – вклад обрушений волн. Все значения нормированы на полное значение УЭПР.



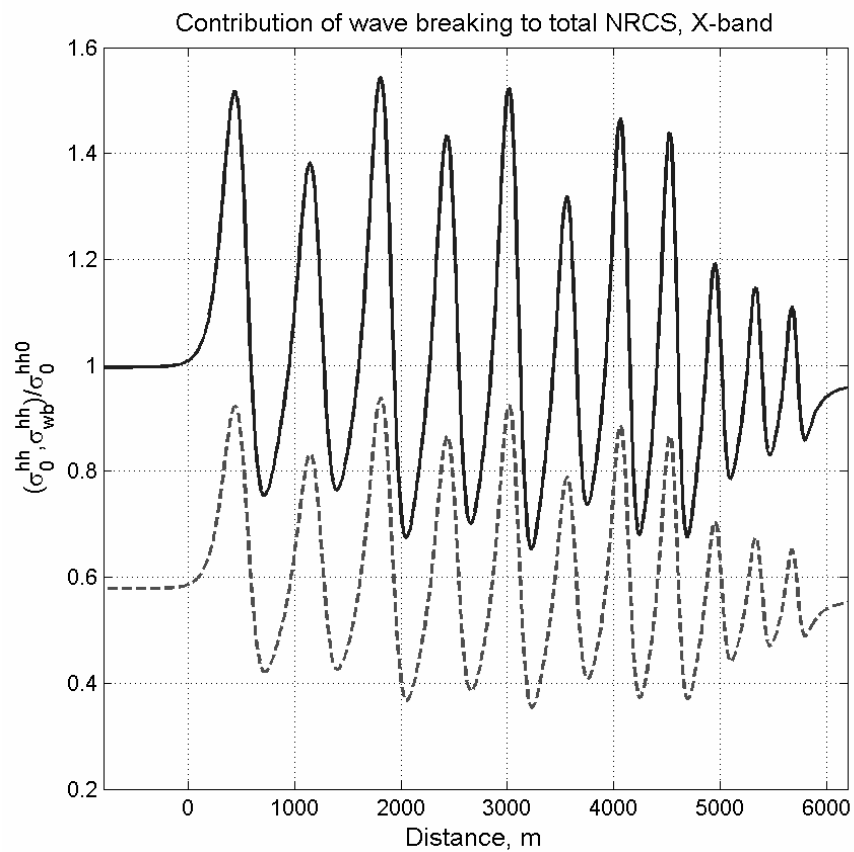


Рис. 8. Вклад обрушений волн в обратное рассеяние в X-диапазоне

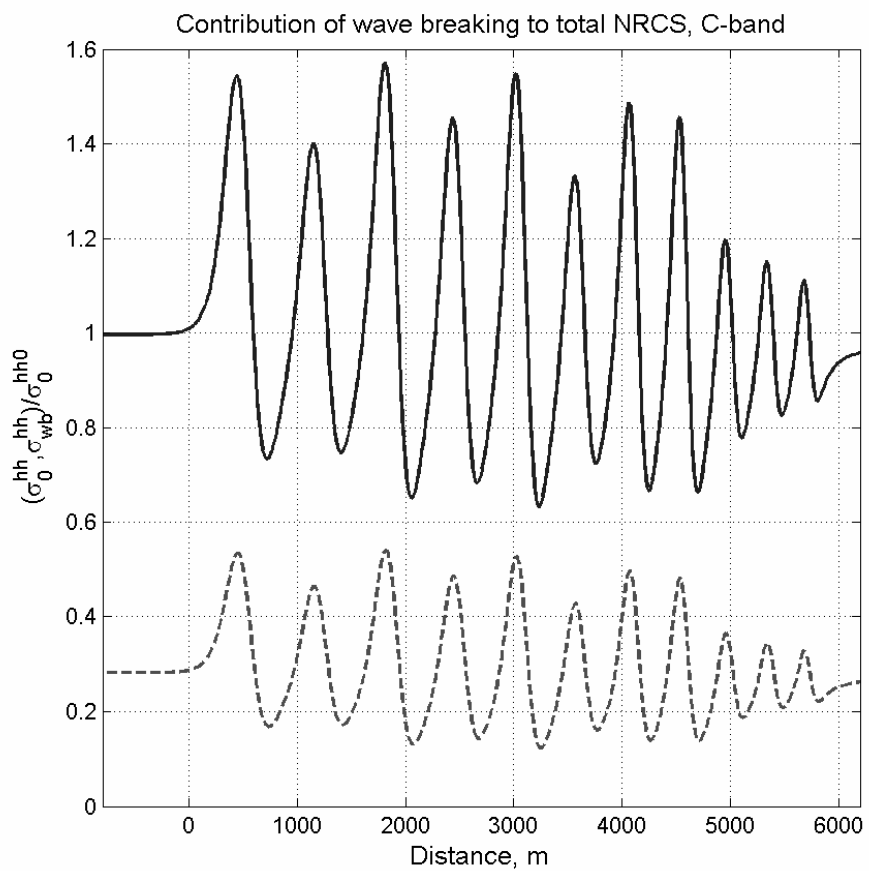


Рис. 9. Вклад обрушений волн в обратное рассеяние в C-диапазоне

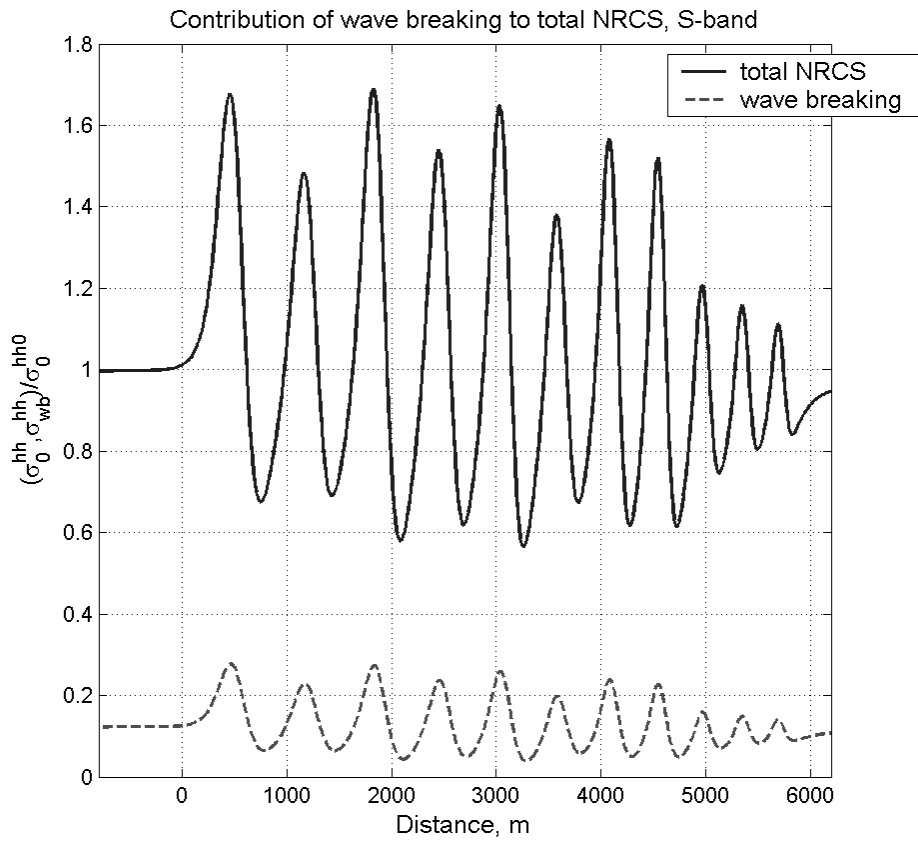


Рис. 10. Вклад обрушений волн в обратное рассеяние в S-диапазоне

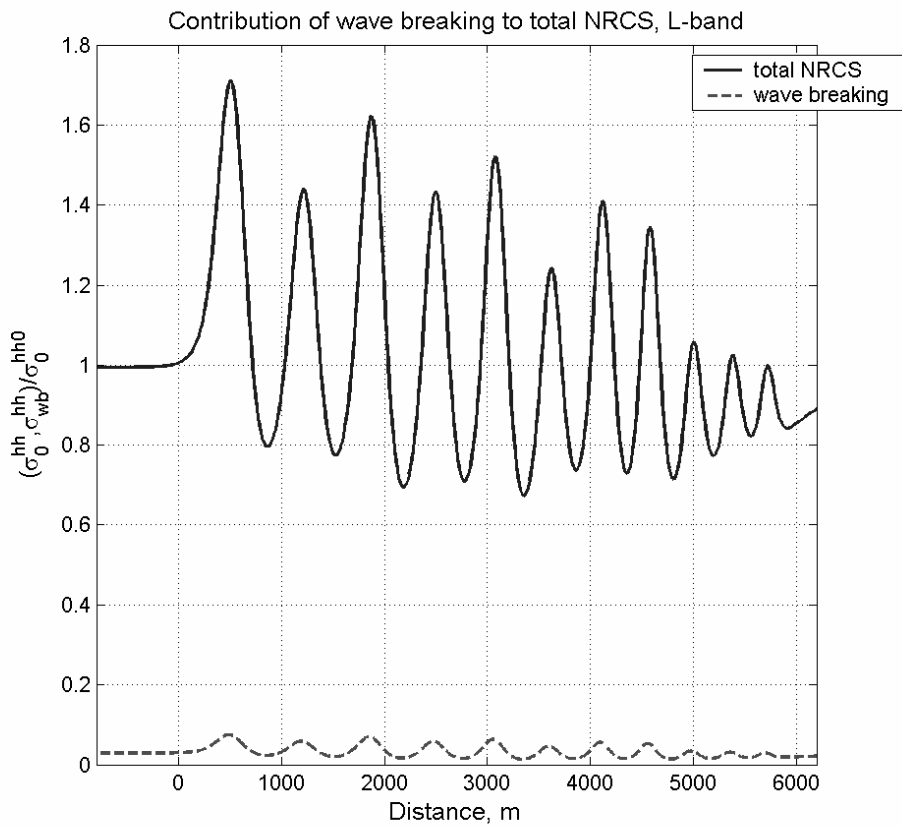


Рис. 11. Вклад обрушений волн в обратное рассеяние в L-диапазоне



Модельные расчёты, представленные на рис. 8-11, были проведены с параметрами ВВ, указанными в табл.1. Из рисунков следует, что вклад обрушений волн в обратное рассеяние уменьшается с увеличением длины радиоволны. В то же время, проявления ВВ на РЛИ в терминах радиолокационных контрастов имеют почти одинаковую величину модуляции УЭПР и сильно не зависят от длины радиоволны.

### Заключение

Анализ опубликованных РСА изображений проявлений ВВ в Баренцевом море по модели RIM показал, что обратное рассеяние радиоволн обусловлено в основном резонансным (брэгговским) рассеянием. Вклад обрушений волн в обратное рассеяние невелик и не превосходит 20%. При этом, модуляции спектра брэгговских волн вызваны исключительно обрушениями волн, поэтому общий вклад волновых обрушений в проявления ВВ на РСА изображении является определяющим.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность В.Н. Кудрявцеву за предоставление программного обеспечения модели RIM, а также обсуждение результатов при написании статьи. Авторы так же благодарны НПО Машиностроения и А.Ю. Иванову лично за любезное предоставление исходных снимков КА «АЛМАЗ-1».

### Литература

1. *Hughes, B. A., and T. W. Dawson.* Joint Canada –U. S. wave investigation project: An overview of the Georgia Strait experiment, *J. Geophys. Res.*, vol. 93, C10, 12,219– 12,234, 1988.
2. *Gasparovich, R. F., J. A. Apel, and E. S. Kasischke.* An overview of the SAR internal wave signature experiment, *J. Geophys. Res.*, vol. 93, C10, 12,304–12,316, 1988.
3. *da Silva, J.C., Ermakov, S.A., Robinson, I.S.* The character of short-period internal wave ERS SAR signatures at very low wind speeds. // *Proceedings of the 3rd ERS Symposium on Space at the Service of our Environment.* Florence. 1997. P. 1305-1310.
4. *Johannessen, J., R. Shuchman, G. Digranes, D. Lyzenga, W. Wackerman, O. Johannessen, and P. Vachon.* Coastal ocean fronts and eddies imaged with ERS-1 synthetic aperture radar, *J. Geophys. Res.*, vol. 101, C3, 6651-6667, 1996.
5. *Alpers, W. R., and K. Hasselmann.* The two-frequency microwave technique for measuring ocean-wave spectra from an airplane or satellite, *Boundary Layer Meteorol.*, vol. 13, 215-230, 1978
6. *Kudryavtsev, V., Akimov, D., J. Johannessen, and B. Chapron.* On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations, *J. Geophys. Res.*, vol. 110, C07016, doi:10.1029/2004JC002505, 1-27, 2005
7. *А. В. Дикинис, А. Ю. Иванов, Л. Н. Карлин, И. Г. Мальцева, М.Н. Маров, Л. Б. Неронский, Н. С. Рамм, В. Р. Фукс, И. Г. Авенариус, Н. П. Березин, С. Ю. Дудкин, В. В. Зайцев, Е. В. Леонтьев, А. К. Рынская, П. В. Степанов, Н. В. Федосеева.* Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом «Алмаз-1» // М.: ГЕОС, 1999. 119 с.
8. *Green, Edmund P., Mumby, Peter J., Edwards, Alasdair J. and Clark, Christopher D.* Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management - Edited by Alasdair J. Edwards // *Coastal Management Sourcebooks 3.* UNESCO, Paris. UNESCO Publishing, 2000. 316 p.