

Об использовании РСА-изображений для оценки затухания длинных волн на поверхности океана в присутствии фрагментированного льда

О. А. Даниличева^{1,2}, С. А. Ермаков^{1,2,3}, Г. Е. Хазанов^{1,2}

¹ *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия*
E-mails: olgadan@ipfran.ru, stas.ermakov@ipfran.ru, g.khazanov@ipfran.ru

² *Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского*
Нижний Новгород, 603022, Россия

³ *Волжский государственный университет водного транспорта*
Нижний Новгород, 603950, Россия

Предложена методика использования спутниковых радиолокационных изображений Sentinel-1 для оценки затухания длинных гравитационных волн в присутствии фрагментированного ледяного покрова. Методика основана на оценке флуктуаций удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР), связанных с модуляцией мощности радиолокационного сигнала длинными океаническими волнами. На основе концепции модуляционно передаточной функции предполагается, что малые вариации УЭПР на масштабах длинных волн пропорциональны амплитуде последних. Затухание волн определённой длины, распространяющихся в заданном направлении, оценивается по изменению их амплитуды на разных участках радиолокационного изображения, направление распространения волн определяется из анализа двумерного спектра радиолокационного изображения морской взволнованной поверхности. С использованием данной методики получена оценка коэффициента затухания длинных гравитационных волн на фрагментированном льду по радиолокационному изображению района Атлантического океана вблизи юго-восточной части Гренландии. Показано, что полученная оценка хорошо согласуется с представленными в литературе данными контактных измерений.

Ключевые слова: РСА, радиолокационные изображения, затухание волн, лёд

Одобрена к печати: 12.01.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-348-354

Введение

Морской лёд в полярных широтах не только служит индикатором изменений климата, но и играет ключевую роль в важных обратных связях в земной климатической системе. В последние десятилетия климат Арктики быстро меняется, а площадь и толщина морского льда существенно уменьшаются (Kwok, 2018; McBean et al., 2005). Значительное влияние на динамику ледяного покрова и характеристики ветрового волнения оказывают прикромочные зоны (*англ.* marginal ice zones), в которых происходит переход от областей открытой воды к области сплошного льда и которые включают, в числе прочих «начальных» форм льда, фрагментированный лёд. Это влияние проявляется, в частности, в затухании волн и трансформации их спектра при распространении через области фрагментированного льда.

Натурные измерения *in situ* (Kohout et al., 2014; Wadhams, 1978), на основе которых можно оценивать влияние льда на характеристики ветровых волн, сопряжены со значительными трудностями, связанными со сложностью размещения и обслуживания измерительных средств как непосредственно на льду, так и в соседних областях открытой воды. Это является основным ограничением для понимания взаимодействия океанических волн с морским льдом, и поэтому анализ возможностей решения этой задачи с использованием дистанционных методов, в том числе спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (*англ.* Synthetic Aperture Radar — SAR, РСА), представляется весьма перспективным.

В данной работе описана методика использования спутниковых радиолокационных изображений Sentinel-1 для оценки затухания длинных гравитационных волн в присутствии фрагментированного ледяного покрова.

Методика оценки затухания длинных волн по радиолокационным изображениям

Как известно, при средних углах падения зондирующих радиоволн (порядка 20–70°) и небольших скоростях ветра обратное рассеяние удовлетворительно описывается как рассеяние на мелкомасштабной брэгговской ряби в рамках двухмасштабной модели. При сильных ветрах возникает дополнительная неполяризованная компонента, связанная с процессами обрушения метровых волн (Ermakov et al., 2012; Kudryavtsev et al., 2003; Sergievskaya et al., 2019). Длинные волны на поверхности океана, масштабы которых больше элемента разрешения РСА, проявляются на радиолокационных (РЛ) изображениях микроволнового диапазона за счёт модуляции интенсивности РЛ-сигнала из-за гидродинамического и геометрического механизмов (Plant, 1989). Гидродинамическая модуляция обусловлена изменчивостью характеристик рассеивателей микроволнового излучения (брэгговской ряби сантиметровой длины и интенсивности обрушений метровых волн) в поле длинных волн. Геометрический механизм модуляции удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) связан: а) с модуляцией локального угла падения микроволн из-за наклонов поверхности, вызванных длинными волнами, и б) вариациями дальности от радара до морской поверхности из-за высоты длинной волны.

Вариации принимаемой мощности из-за длинных поверхностных волн традиционно описываются в рамках концепции модуляционной передаточной функции (МПФ) (Keller, Plant, 1989; Plant, 1989; Wright et al., 1980), согласно которой УЭПР может быть представлена в виде (Plant, 1989):

$$\sigma_{pp}^0(\mathbf{r}) = \sigma_{pp}^0 \left[1 + \int m(\mathbf{K}) \frac{U(\mathbf{K})}{C(\mathbf{K})} e^{i\mathbf{K}\mathbf{r}} d\mathbf{K} \right] + O \left[\left(m(\mathbf{K}) \frac{U(\mathbf{K})}{C(\mathbf{K})} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где σ_{pp}^0 — средняя УЭПР; $U(\mathbf{K})$ и $C(\mathbf{K})$ — фурье-компоненты горизонтальной орбитальной и фазовой скоростей длинных волн с волновым вектором \mathbf{K} ; $m(\mathbf{K})$ — модуляционная передаточная функция, которая представляется как сумма гидродинамической и геометрической компонент: $m(\mathbf{K}) = m_h(\mathbf{K}) + m_g(\mathbf{K})$.

Если вариации $m(\mathbf{K}) \cdot U(\mathbf{K})/C(\mathbf{K})$ в выражении (1) малы по сравнению со средним значением обратного рассеяния, то членами высшего порядка можно пренебречь, и тогда допустимо полагать, что вариации УЭПР на масштабах длинных волн пропорциональны их амплитуде. Данное предположение оправдано тем, что длинные гравитационные ветровые волны характеризуются довольно малыми наклонами и могут считаться квазилинейными.

Для оценки затухания волн с волновым вектором \mathbf{K} через определение изменения их амплитуды по радиолокационному изображению необходимо вначале определить направление распространения волн, что можно сделать в результате анализа двумерного спектра радиолокационного изображения морской взволнованной поверхности. Затухание длинных волн с заданным \mathbf{K} оценивается затем при сравнении спектров вариаций УЭПР для разных участков профиля, ориентированных по направлению распространения волн.

Оценка затухания длинных волн по РСА-изображению

Проиллюстрируем возможности оценки затухания длинных волн на примере изображения РСА Sentinel-1. На *рис. 1* приведено РСА-изображение области дрейфующего льда у юго-восточной части Гренландии, полученное со спутника Sentinel-1 21.02.2022 в 20:28 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время).

Спутниковые радиолокационные данные, представленные на *рис. 1*, взяты из центра открытого доступа для продуктов семейства Sentinel (*англ.* Copernicus Open Access Hub, <https://scihub.copernicus.eu/>). Пространственное разрешение данных — 10×10 м, НН-поляризация (Н от *англ.* horizontal, горизонтальная). Оценки скорости и направления ветра получены из этих же радиолокационных данных по алгоритму, описанному в работе (Hersbach, 2003). Область, покрытая льдом, проявляется в виде светлого участка в правой части изображения. Как видно из сравнения с изображением Sentinel-1, полученным за 11 ч до анализируемого снимка, данная область характеризуется сильной неоднородностью ледяного покрова и значительной пространственно-временной изменчивостью в поле ветро-волнового дрейфа. Такая изменчивость указывает на фрагментированный характер льда.

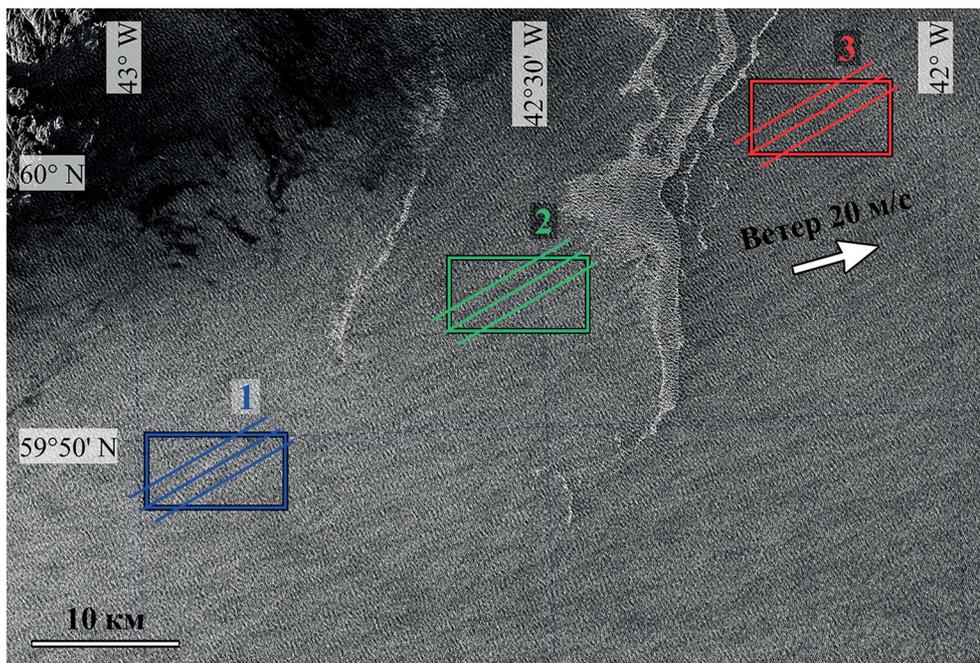


Рис. 1. РСА-изображение Sentinel-1A от 21.02.2022 в 20:28 UTC дрейфующего льда у юго-восточного побережья Гренландии. Характерная скорость ветра — около 20 м/с, направление — юго-западное

Нами были проанализированы три области, показанные на *рис. 1*, для того чтобы сравнить затухание длинных волн на открытой воде (см. *рис. 1*, участки 1–2) и в присутствии фрагментированного льда (см. *рис. 1*, участки 2–3).

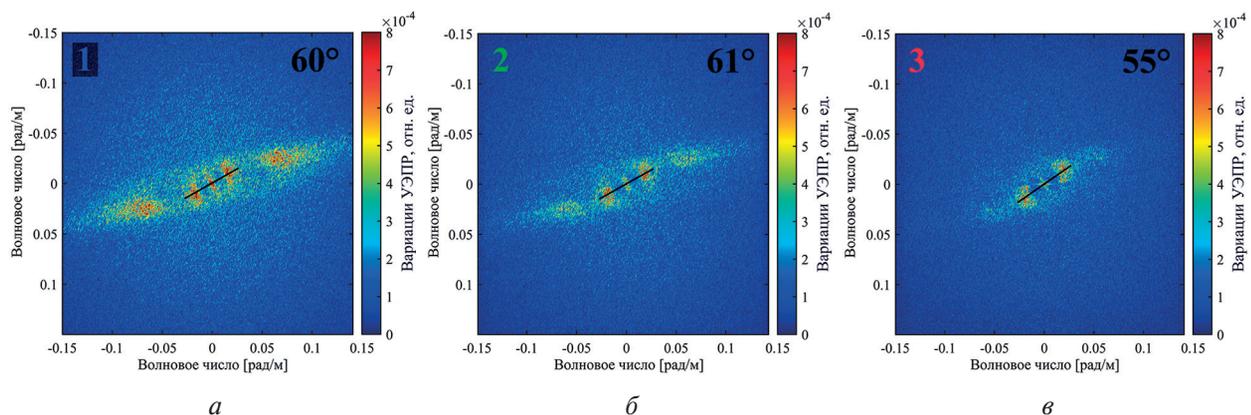


Рис. 2. Двумерные спектры фрагментов изображения, выделенных прямоугольниками на *рис. 1*: а — для участка 1; б — для участка 2; в — для участка 3

Для выявления структуры волнения и определения направления распространения длинных ветровых волн построим двумерные спектры анализируемых областей, которые выделены прямоугольниками на *рис. 1*. Из анализа данных областей и их двумерных спектров (*рис. 2*, см. с. 350) можно видеть, что в спектре длинных волн наблюдаются две системы волн, распространяющихся в северо-восточном направлении под углами около 60° и 70° и имеющих длины соответственно 300 и 100 м. Видно, что волны с длиной около 100 м значительно затухают как при прохождении области фрагментированного льда, так и на участке открытой воды, в отличие от 300-метровых волн, которые существенно затухают только на фрагментированном льду. Такое несоответствие может быть связано с тем, что волны с разной длиной различаются по направлению распространения и, соответственно, проходят разные участки водной поверхности, поэтому сравнивать их между собой некорректно. Исходя из этого ниже будут рассматриваться только волны с длиной около 300 м.

Направление распространения длинных волн определялось с помощью метода линейной регрессии для максимальных значений двумерного спектра на каждой анализируемой области и обозначено на *рис. 2* чёрной линией. Ошибка определения направления распространения волн составляет $\pm 5^\circ$. Из анализа направления распространения волн видно, что длинные волны после прохождения фрагментированного льда несколько изменили направление распространения по сравнению с открытым участком. Данное отклонение направления распространения, хотя и невелико и находится в пределах ошибки, может быть связано с рефракцией волн на льду.

Для оценки затухания волн были получены нормированные на среднее значение спектры флуктуаций УЭПР (*рис. 3*), которые усреднялись по трём профилям, ориентированным по направлению распространения длинных гравитационных волн (см. *рис. 1*, профили обозначены линиями).

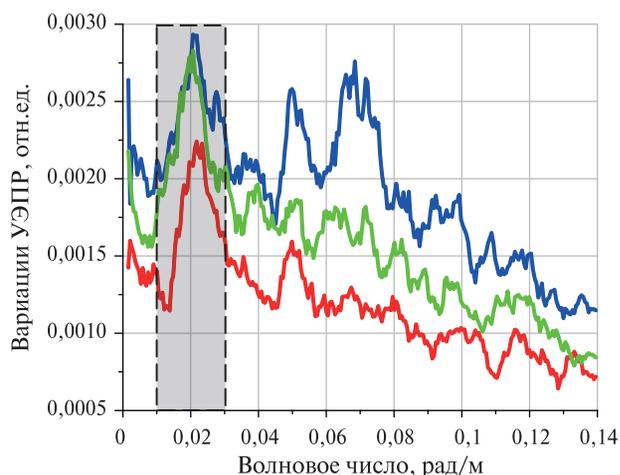


Рис. 3. Спектры вариаций УЭПР по данным Sentinel-1 SAR для участков, представленных на *рис. 1*: участок 1 (синий цвет) и участок 2 (зелёный) — длинные волны до ледовой структуры, участок 3 (красный) — после льда. Пунктиром отмечен спектральный диапазон волн с длинами около 300 м

Средние значения УЭПР в линейных единицах для участков 1, 2 и 3 (см. *рис. 1*) составляют соответственно 0,10; 0,08 и 0,07. Оценка нормированной амплитуды вариаций УЭПР на масштабах длинных волн (см. *рис. 3*) даёт значение $29 \cdot 10^{-4}$ на участке 1, $28 \cdot 10^{-4}$ на участке 2 и $22 \cdot 10^{-4}$ на участке 3 (участки 1 и 2 — волнение до ледовой структуры, участок 3 — после ледовой структуры). Данные оценки показывают, что вариации УЭПР малы. Это подтверждает справедливость предположения, что вариации УЭПР на масштабах длинных волн пропорциональны вариациям их амплитуды. Оценка коэффициента затухания волн по амплитуде на открытой воде приводит к величине около $0,032 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, а на фрагментированном льду — к величине $0,206 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, что на порядок больше, чем на свободном ото льда участке,

и неплохо согласуется с результатами контактных измерений (Doble et al., 2015; Meylan et al., 2018; Wadhams et al., 1988) (таблица).

Сравнение полученных коэффициентов затухания с результатами контактных измерений

	Открытая вода	Фрагментированный лёд	(Doble et al., 2015)/(Meylan et al., 2018)/(Wadhams et al., 1988)
Коэффициент затухания, $\times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$	0,03	0,206	0,33/0,07/0,16

Заключение

Предложена методика оценки затухания длинных гравитационных волн по спутниковым радиолокационным изображениям на основе концепции модуляционной передаточной функции.

С использованием предложенной методики анализа спутниковых радиолокационных изображений Sentinel-1 получены оценки затухания длинных волн, проходящих через структуру фрагментированного льда. Показано, что полученные значения коэффициента затухания находятся в хорошем согласии с данными имеющихся в литературе контактных измерений.

Исследование выполнено за счёт средств темы госзадания Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского (№ 0729-2020-0037).

Литература

1. Doble M. J., De Carolis G., Meylan M. H. et al. Relating wave attenuation to pancake ice thickness, using field measurements and model results // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42. No. 11. P. 4473–4481. DOI: 10.1002/2015GL063628.
2. Ermakov S. A., Kapustin I. A., Sergievskaya I. A. On peculiarities of scattering of microwave radar signals by breaking gravity-capillary waves // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2012. V. 55. No. 7. P. 453–461. DOI: 10.1007/s11141-012-9381-1.
3. Hersbach H. CMOD5 An improved geophysical model function for ERS C-band scatterometry: Technical Memorandum. Reading, UK: ECMWF, 2003. V. 395. 50 p.
4. Keller W. C., Plant W. J. Cross Sections and Modulation Transfer Functions at L-And Ku-bands Measured during the Toward Experiment // 12th Canadian Symp. Remote Sensing Geoscience and Remote Sensing Symp. IEEE, 1989. V. 5. P. 2985–2985. DOI: 10.1029/JC095iC09p16277.
5. Kohout A. L., Williams M. J. M., Dean S. M., Meylan M. H. Storm-induced sea-ice breakup and the implications for ice extent // *Nature*. 2014. V. 509. No. 7502. P. 604–607. DOI: 10.1038/nature13262.
6. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface 1. Background model // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2003. V. 108. No. C3. P. 2–24. DOI: 10.1029/2001JC001003.
7. Kwok R. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018) // *Environmental Research Letters*. 2018. V. 13. No. 10. Article 105005. DOI: 10.1088/1748-9326/aae3ec.
8. McBean G., Alekseev G., Chen D. et al. Arctic Climate Impact Assessment: scientific report. Ch. 2: Arctic Climate: Past and Present. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005. P. 22–60.
9. Meylan M. H., Bennetts L. G., Mosig J. E. M. et al. Dispersion relations, power laws, and energy loss for waves in the marginal ice zone // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2018. V. 123. No. 5. P. 3322–3335. DOI: 10.1002/2018JC013776.
10. Plant W. J. The modulation transfer function: Concept and applications // *Radar Scattering from Modulated Wind Waves: Proc. Workshop on Modulation of Short Wind Waves in the Gravity-Capillary Range by Non-Uniform Currents*. Bergen aan Zee, The Netherlands, 24–26 May 1988. Springer Netherlands, 1989. P. 155–172. DOI: 10.1007/978-94-009-2309-6.
11. Sergievskaya I. A., Ermakov S. A., Ermoshkin A. V. et al. Modulation of dual-polarized X-band radar backscatter due to long wind waves // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. No. 4. Article 423. DOI: 10.3390/rs11040423.

12. Wadhams P. Wave decay in the marginal ice zone measured from a submarine // *Deep Sea Research*. 1978. V. 25. No. 1. P. 23–40. DOI: 10.1016/S0146-6291(21)00004-7.
13. Wadhams P., Squire V.A., Goodman D.J. et al. The attenuation rates of ocean waves in the marginal ice zone // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1988. V. 93. No. C6. P. 6799–6818. DOI: 10.1029/JC093iC06p06799.
14. Wright J.W., Plant W.J., Keller W.C., Jones W.L. Ocean wave-radar modulation transfer functions from the West Coast Experiment // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1980. V. 85. No. C9. P. 4957–4966. DOI: 10.1029/JC085iC09p04957.

On the use of SAR images to estimate long-wave attenuation at the ocean surface in the presence of fragmented ice

O. A. Danilicheva^{1,2}, S. A. Ermakov^{1,2,3}, G. E. Khazanov^{1,2}

¹ *Institute of Applied Physics RAS, Nizhniy Novgorod 603950, Russia*
E-mails: olgadan@ipfran.ru, stas.ermakov@ipfran.ru, g.khazanov@ipfran.ru

² *National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*
Nizhny Novgorod 603022, Russia

³ *Volga State University of Water Transport, Nizhniy Novgorod 603950, Russia*
E-mail: stas.ermakov@ipfran.ru

A methodology for using Sentinel-1 satellite radar images to estimate the attenuation of long gravity waves in the presence of fragmented ice cover is proposed. The technique is based on the estimation of NRCS (normalized radar cross section) fluctuations associated with the modulation of the radar signal power by long ocean waves. Based on the modulation-transfer function concept, it is assumed that small variations of the NRCS on long-wave scales are proportional to the amplitude of the latter. The attenuation of waves of a certain length propagating in a given direction is estimated by the change of their amplitude in different parts of the radar image, the direction of wave propagation is determined from the analysis of the two-dimensional spectrum of the radar image. Using this technique, we obtained an estimate of the attenuation coefficient of long gravity waves on fragmented ice from the radar image of the Atlantic Ocean region near the southeastern part of Greenland. It is shown that the obtained estimate agrees well with the contact measurement data presented in the literature.

Keywords: SAR, radar images, wave attenuation, ice

Accepted: 12.01.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-348-354

References

1. Doble M.J., De Carolis G., Meylan M. H. et al., Relating wave attenuation to pancake ice thickness, using field measurements and model results, *Geophysical Research Letters*, 2015, Vol. 42, No. 11, pp. 4473–4481, DOI: 10.1002/2015GL063628.
2. Ermakov S.A., Kapustin I.A., Sergievskaya I.A., On peculiarities of scattering of microwave radar signals by breaking gravity-capillary waves, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2012, Vol. 55, No. 7, pp. 453–461, DOI: 10.1007/s11141-012-9381-1.
3. Hersbach H., *CMOD5. An improved geophysical model function for ERS C-band scatterometry*, *Technical Memorandum*, Reading, UK: ECMWF, 2003, Vol. 395, 50 p.
4. Keller W.C., Plant W.J., Cross Sections and Modulation Transfer Functions at L- and Ku-bands Measured during the Toward Experiment, *12th Canadian Symp. Remote Sensing Geoscience and Remote Sensing Symp.*, IEEE, 1989, Vol. 5, pp. 2985–2985, DOI: 10.1029/JC095iC09p16277.
5. Kohout A.L., Williams M.J.M., Dean S.M., Meylan M.H., Storm-induced sea-ice breakup and the implications for ice extent, *Nature*, 2014, Vol. 509, No. 7502, pp. 604–607, DOI: 10.1038/nature13262.
6. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B., A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface 1. Background model, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2003, Vol. 108, No. C3, pp. 2–24, DOI: 10.1029/2001JC001003.

7. Kwok R., Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018), *Environmental Research Letters*, 2018, Vol. 13, No. 10, Article 105005, DOI: 10.1088/1748-9326/aae3ec.
8. McBean G., Alekseev G., Chen D. et al., *Arctic climate: Past and Present. Chapter 2: Arctic Climate Impact Assessment: scientific report*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005, pp. 22–60.
9. Meylan M. H., Bennetts L. G., Mosig J. E. M. et al., Dispersion relations, power laws, and energy loss for waves in the marginal ice zone, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2018, Vol. 123, No. 5, pp. 3322–3335, DOI: 10.1002/2018JC013776.
10. Plant W. J., The modulation transfer function: Concept and applications, In: *Radar Scattering from Modulated Wind Waves: Proc. Workshop on Modulation of Short Wind Waves in the Gravity-Capillary Range by Non-Uniform Currents*, Bergen aan Zee, The Netherlands, 24–26 May 1988, Springer Netherlands, 1989, pp. 155–172, DOI: 10.1007/978-94-009-2309-6.
11. Sergievskaya I. A., Ermakov S. A., Ermoshkin A. V. et al., Modulation of dual-polarized X-band radar backscatter due to long wind waves, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 4, Article 423, DOI: 10.3390/rs11040423.
12. Wadhams P., Wave decay in the marginal ice zone measured from a submarine, *Deep Sea Research*, 1978, Vol. 25, No. 1, pp. 23–40, DOI: 10.1016/S0146-6291(21)00004-7.
13. Wadhams P., Squire V. A., Goodman D. J. et al., The attenuation rates of ocean waves in the marginal ice zone, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1988, Vol. 93, No. C6, pp. 6799–6818, DOI: 10.1029/JC093iC06p06799.
14. Wright J. W., Plant W. J., Keller W. C., Jones W. L., Ocean wave-radar modulation transfer functions from the West Coast Experiment, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1980, Vol. 85, No. C9, pp. 4957–4966, DOI: 10.1029/JC085iC09p04957.