

Экспериментальное исследование обратного рассеяния радиолокационного сигнала X-диапазона пресноводным льдом при малых углах падения

Д.А. Ковалдов, Ю.А. Титченко, В.Ю. Караев, К.А. Понур, Е.М. Мешков,
Э.М. Зуйкова

*Институт прикладной физики РАН
603950, г. Н.Новгород, ул. Ульянова, 46
E-mail: d.kovaldov@ipfran.ru*

В работе представлены результаты серии экспериментов, выполненных в феврале-марте 2023 года. На метромосту через реку Ока в Нижнем Новгороде был установлен радиолокатор X – диапазона. Радиолокатор работал в режиме радиовысотомера и записывалась форма отражённого импульса (зависимость мощности отраженного сигнала от времени). В результате обработки определялось расстояние до области отражения на поверхности. Были получены зависимости мощности отражённого ледяным покровом радиолокационного сигнала от угла падения. Синхронно с измерениями записывалась температура воздуха. Изменение дальности до области отражения на поверхности было связано с изменением уровня воды в р.Ока. Были построены зависимости мощности отраженного сигнала от угла падения для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны за разные дни измерений. По эмпирическим данным получена формула для угловой зависимости мощности отраженного излучения для пресного ледяного покрова.

Ключевые слова: импульсный радиолокатор X-диапазона, пресноводный лёд, зависимость мощности обратного рассеяния от угла падения, эксперимент.

Experimental study of X-band radar signal backscattering by freshwater ice at small angles of incidence

D.A. Kovaldov, Yu.A. Titchenko, V.Yu. Karaev, K.A. Ponur, E.M. Meshkov,
E.M. Zuikova

Institute of Applied Physics RAS

The paper presents the results of a series of experiments performed in February-March 2023. An X-band radar was installed on the metro bridge across the Oka River in Nizhny Novgorod. The radar worked in the radio altimeter mode and the shape of the reflected pulse was recorded (the dependence of the power of the reflected signal on time). As a result of processing, the distance to the reflection area on the surface was determined. Dependences of the power of the radar signal reflected by the ice cover on the angle of incidence were obtained. The air temperature was recorded synchronously with the measurements. The change in the distance to the area of reflection on the surface was associated with a change in the water level in the Oka River. Dependences of the power of the reflected signal on the angle of incidence were plotted for a radar with a knife-edge antenna pattern for different days of measurements. Based on empirical data, a formula is obtained for the angular dependence of the power of reflected radiation for fresh ice cover.

Keywords: X-band pulsed radar, freshwater ice, dependence of backscatter power on angle of incidence, experiment.

Введение

Применение радиолокационных методов для дистанционного зондирования морской и речной поверхности является эффективным способом мониторинга.

Основной объем информации о ледяном покрове Мирового океана и внутренних водоемов поступает со спутников. Для построения карт ледяного покрова используется микроволновой диапазон. Определение сплоченности ледяного покрова выполняется по данным микроволновых радиометров [1] и радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны [2]. Для наблюдения за ледяным покровом в Арктике успешно применялись радиолокаторы бокового обзора [3]. Данные радиовысотометров применяются для определения толщины льда [4]. Данные скаттерометров используются для картирования ледяного покрова и определения его типа [5-7].

В данной работе анализируется мощность сигнала, отраженного ледяным покровом от угла падения в СВЧ-диапазоне.

Схема эксперимента

Для проведения измерений использовался измерительный комплекс, который применялся в ходе экспериментов 2021-2022 годов. Для исследования обратного рассеяния электромагнитного излучения ледяным покровом использовался радиолокатор X – диапазона, разработанный и изготовленный по заказу ИПФ РАН компанией АО НПФ Микран [8]. Радиолокатор может работать в двух режимах: 1) в доплеровском режиме измеряется доплеровский спектр отраженного сигнала и 2) в высотометрном режиме измеряется форма отраженного импульса. Измерения в высотометрном и доплеровском режимах выполняются в цикле длительностью 10,285 с (0,285 с и 10 с соответственно). Параметры радиолокатора приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры радиолокатора X-диапазона производства АО НПФ Микран.

Диапазон рабочих частот, МГц	9200 - 9500
Девияция частоты, МГц	290
Максимальная выходная мощность передатчика, Вт	1
Ширина диаграммы направленности антенны	3,6° x 30°
Длительность импульса, мс	2,85



Рис. 1. Схема эксперимента. Белыми пунктирными линиями показаны ограничения азимутального поворота радиолокатора. Белой стрелкой - направление зондирования.

Фотография радиолокатора на метромосту во время эксперимента показана на рис. 2а. Благодаря применению двухкоординатного поворотного механизма оператор в ходе

эксперимента может менять азимутальный угол и угол падения зондирующего излучения. На рис. 2б показан интерфейс управления измерительным комплексом.



(а)



(б)

Рис. 2. Фотографии радиолокатора и интерфейс системы управления на мониторе оператора.

Эксперимент

В радиовысотомерном режиме излучается короткий импульс. За счет девиации по частоте достигается эффективная длительность импульса примерно 3,45 нс, что обеспечивает разрешение по дальности около 0.5 м. Измеряя по отраженному импульсу время распространения электромагнитной волны от радиолокатора до области отражения на поверхности и обратно можно найти дальность до отражающей поверхности. Антенна радиолокатора ориентирована широкой стороной диаграммы направленности антенны вдоль моста.

Время задержки было пересчитано в дальность и на рис. 3 показана зависимость мощности отражённого сигнала (условные единицы) от расстояния.

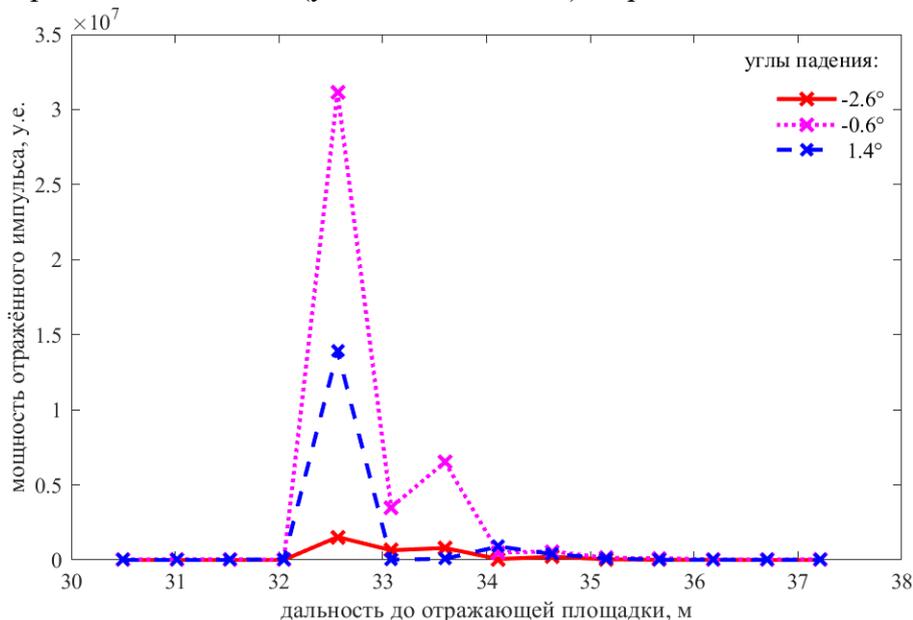


Рис. 3. Усреднённые за секунду регистрируемые импульсы, полученные в серии экспериментов 25.02.23, разным цветом показаны разные углы падения.

Запись делается в течение 1-2 минут, за данный отрезок времени набирается необходимое количество данных для усреднения, на рис.4 приведены все зарегистрированные импульсы при -0.6° угла падения.

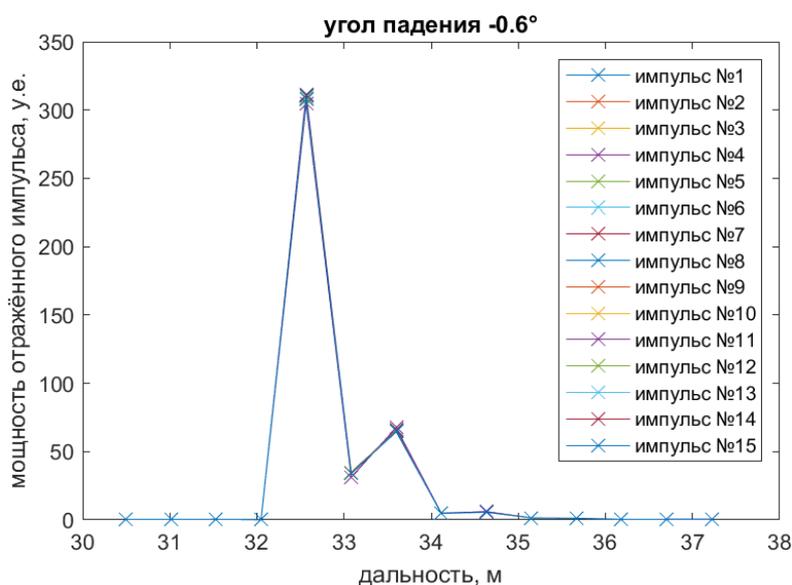


Рис. 4. Все импульсы, зарегистрированные в течении одного эксперимента.

Из рис.4 видно, что в течении одной серии экспериментов характеристики отражённого импульса не меняются. Объясняется это тем, что отражение происходит от неподвижной поверхности.

Основные измерения выполнялись с начала февраля до конца марта 2023 и на рис. 5 показано изменение температуры воздуха на этом временном интервале. На рисунке окружностями разного цвета выделено время проведения измерений. Видно, что в феврале измерения проводились при отрицательной температуре воздуха, а в марте при положительной.

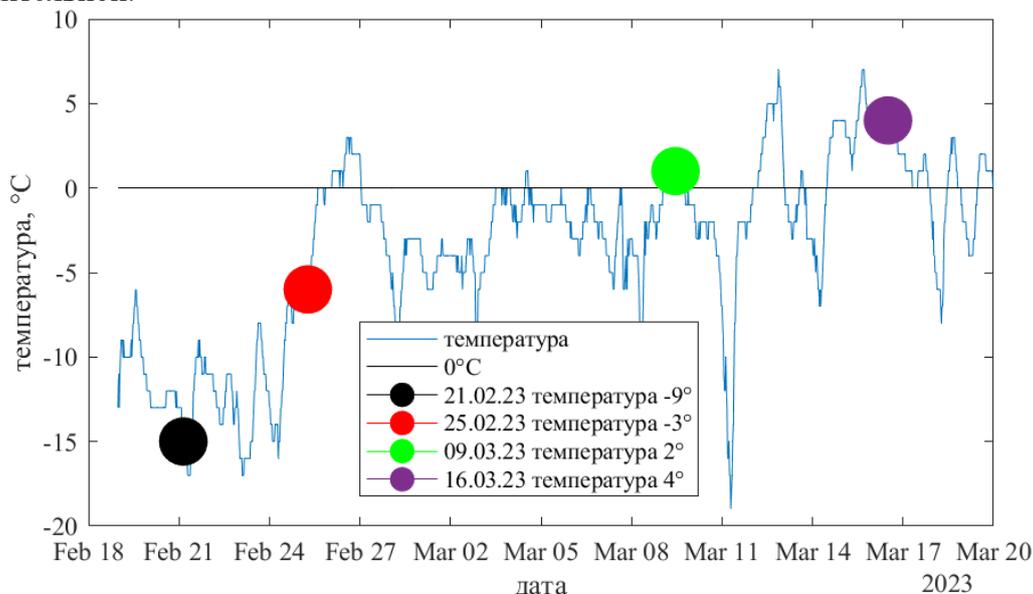


Рис. 5. График температуры воздуха в феврале-марте 2023 года, с датами экспериментов.

В качестве одной из характеристик для анализа был выбран интегральная мощность отраженного импульса. Углы элевации, которые задавались оператором поворотному устройству, отличаются от угла падения, что обусловлено сложностью точной ориентации диаграммы направленности антенны при установке радиолокатора в

поворотном механизме. Поэтому точный угол падения был определен во время калибровки и найдено отличие угла падения и угла элевации. При построении угловой зависимости был сделан переход от угла элевации к углу падения и на рис. 6 приведена зависимость интегральной мощности отражённого импульса от угла падения при азимутальном угле 0° .

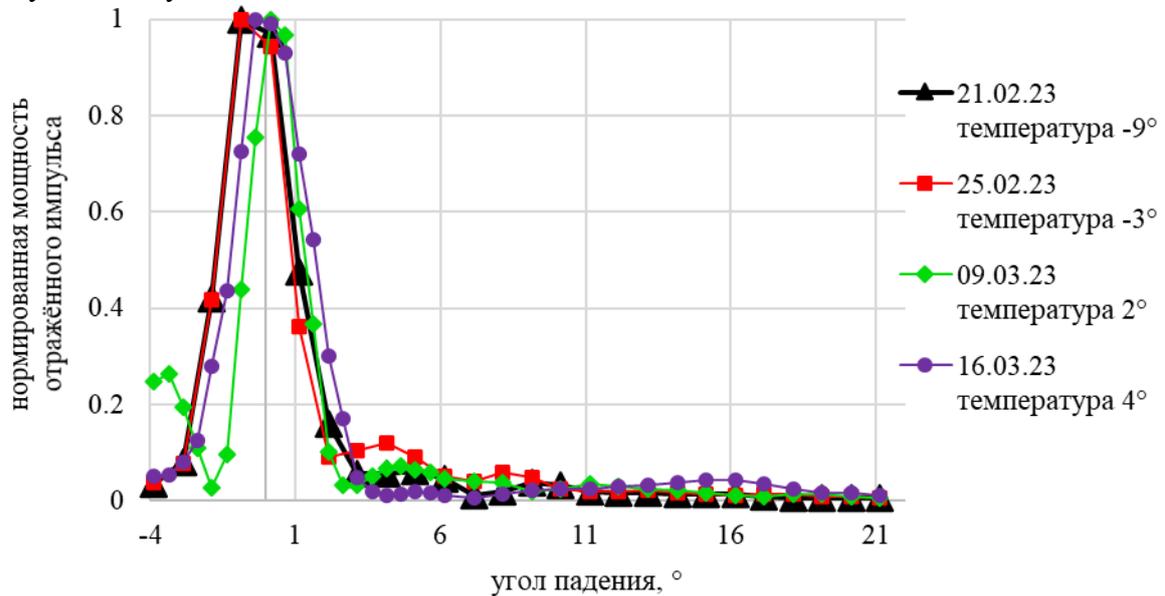


Рис. 6. Зависимость нормированной интегральной мощности отражённого импульса от угла падения

При анализе полученных результатов были замечены локальные экстремумы на 4° и 8° градусах угла падения. Для пояснения построим регистрируемые в районе этих углов падения импульсы и сравним их (рис. 7).

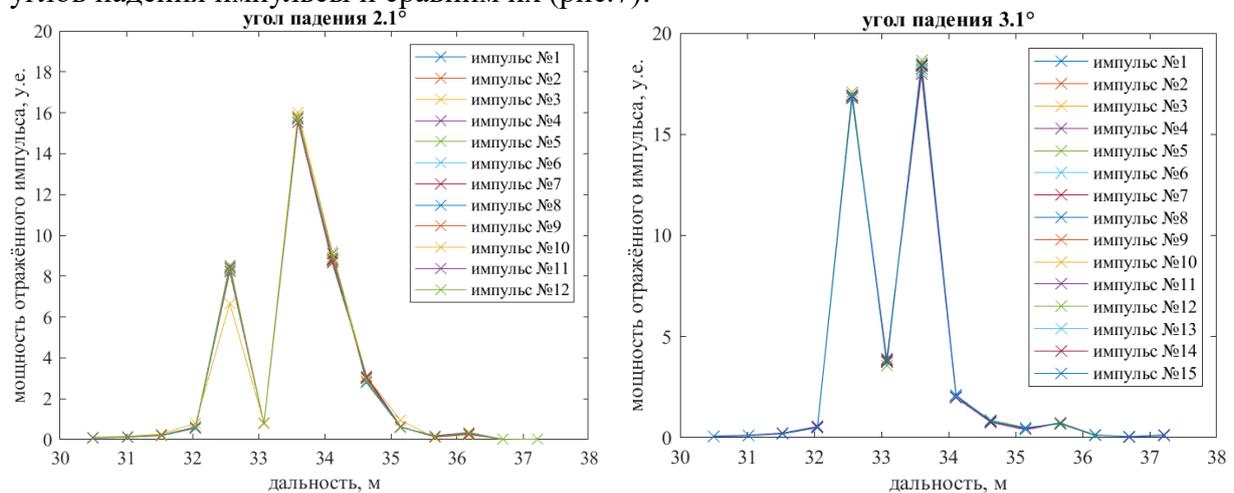


Рис. 7. Примеры отражённых импульсов, мощность которых возрастает с углом падения. Из эксперимента за 25.02.23.

Из рисунка 7 видно, что в случае наклонного зондирования (дальность по основному лепестку 33.5 метра) мощность отражённого сигнала сильно падает для дальности 32.5 метра (рис. 4), так как в данном случае отражённый сигнал формируется боковыми лепестками диаграммы, которые ориентированы вертикально вниз.

Зависимость мощности отраженного сигнала от угла падения

Одной из целей исследования является построение зависимости мощности отраженного сигнала от угла падения для пресноводного льда. Аналогичная

зависимость для морского льда была получена по данным дождевого радиолокатора [9]. Диэлектрические свойства морского льда отличаются от пресноводного льда, поэтому полученные зависимости нельзя применять для моделирования рассеяния в пресноводных водоемах.

Как было показано выше, наличие лепестков в диаграмме направленности антенны приводит к тому, что при увеличении угла падения не происходит уменьшения мощности отраженного сигнала. Этот эффект связан с характеристикой антенны и не связан с отражающими свойствами поверхности. Поэтому при построении зависимости использовались данные вблизи основного максимума и на «хвосте» зависимости. Пример построения аппроксимация для экспериментальных данных за 25.02.23 на рис.8.

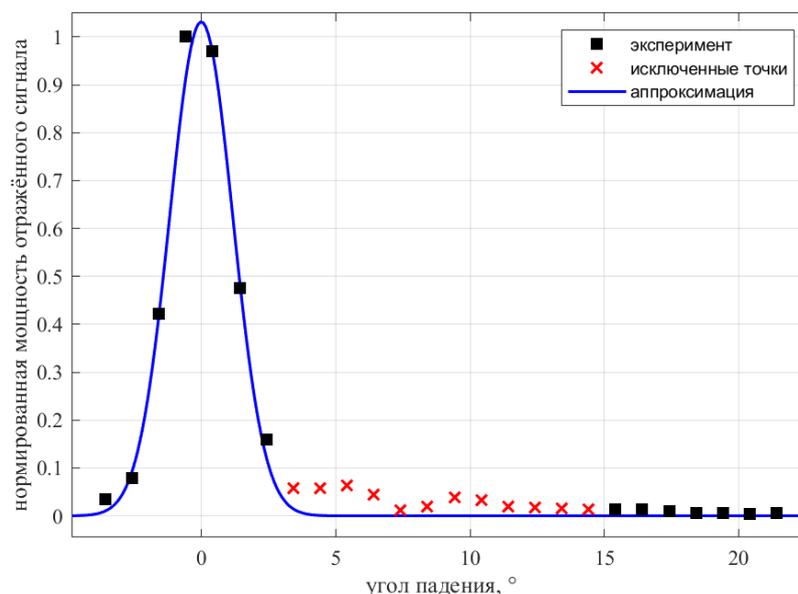


Рис. 8. Зависимость нормированной интегральной мощности с исключенными точками (чёрные квадраты и красные кресты) и аппроксимация гауссовой кривой (синяя линия)

Далее, исключив из зависимостей, построенных на рисунке 6 точки, соответствующие боковым лепесткам диаграммы, построим общую для всех экспериментов аппроксимацию.

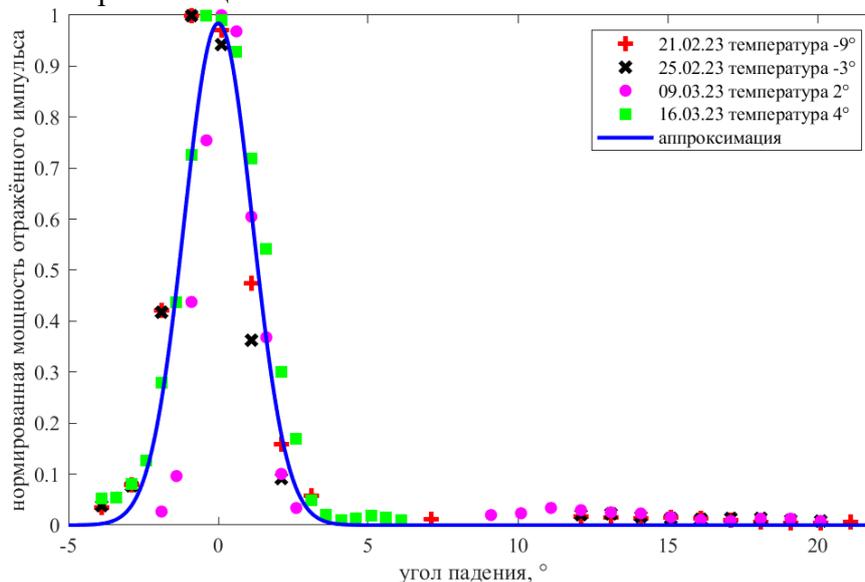


Рис. 9. Аппроксимация по всем экспериментальным данным.

Аппроксимация построена по функции Гаусса:

$$P(\theta) = a * \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta-c}{b}\right)^2\right), \quad (1)$$

где коэффициенты принимают следующие значения: $a = 0.98$, $c = 0^\circ$, $b = 1.14^\circ$, а θ – угол падения. Данная аппроксимация получена для ножевой диаграммы направленности антенны. Диаграмма направленности антенны влияет на вид угловой зависимости отраженной мощности от угла падения следующим образом:

$$P(\theta_0) \sim \int G^4(|\theta_0 - \alpha|) * RCS_{ice}(\theta_0 + \alpha) d\alpha, \quad (2)$$

где G - диаграмма направленности антенны, $RCS_{ice}(\theta_0 + \alpha)$ – зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения, θ_0 - угол падения оси диаграммы направленности антенны, α – угол, отсчитываемый от оси диаграммы направленности антенны.

Для того, чтобы избавиться от влияния диаграммы направленности антенны на зависимость мощности отражённого сигнала от угла падения необходимо найти ее из формулы (2). Следует указать, что в данном случае нет зависимости от азимутального угла диаграммы направленности в силу того, что ледяная поверхность предполагается изотропной.

Выводы

В работе обсуждается постановка и проведение экспериментов на Нижегородском метромосту с импульсным радиолокатором X –диапазона работающего в режиме радиовысотомера. В серии экспериментов в феврале – марте 2023 года исследовались характеристики отражённых импульсов радиолокатора X–диапазона. На основе полученных результатов построили зависимость мощности отражённого импульса от угла падения.

При анализе обнаружили эффект увеличения мощности отраженного импульса в диапазоне углов падения, соответствующих боковым лепесткам диаграммы направленности антенны. Боковые лепестки диаграммы направленности антенны, при изменении угла падения оказываются направленными вертикально вниз.

Экспериментальные данные, как показал дальнейший анализ, могут быть аппроксимированы гауссовой кривой. Угловая зависимость измерена радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны и не является универсальной, а подходит только данному радиолокатору. Для получения универсальной зависимости требуется избавиться от влияния диаграммы направленности антенны, что будет сделано в ходе дальнейших исследований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-77-10089).

Литература

1. Кутуза Б.Г., Данилычев М.И., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли. Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. // М.: ЛЕНАНД, 2016. 336 с.
2. Fors A., Brekke C., Gerland S., Doulgeris A., Beckers J. Late summer arctic sea ice surface roughness signatures in C-band SAR data // J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 9. No. 3. P. 1199–1215.
3. Конюхов С.Н., Драновский В.И., Цымбал В.Н. Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей. // Киев: «Авиадиагностика», 2007. 440 с.
4. Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Popov S.K. Satellite Altimetry of Sea Level and Ice Cover in the Barents Sea// Ecologica Montenegrina. 2019. V. 25. P. 26–35.

5. Anderson H.S., Long D.G. Sea ice mapping method for Seawinds, IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing. 2005. V. 43. No. 3. P. 647 – 657.
6. Муртазин А.Ф., Евграфова К.Г., Кудрявцев В.Н. Применение данных скаттерометра ASCAT для исследования ледового покрова в Арктике // Ученые записки российского государственного гидрологического университета. 2015. Т. 40. С. 160-173.
7. Onstott R. G. SAR and Scatterometer Signatures of Sea Ice // Microwave Remote Sensing of Sea Ice, 1992. – С. 73-104.
8. <https://www.micran.ru/>
9. Karaev V., Titchenko Y., Panfilova M., Ryabkova M., Meshkov E., Ponur K. Application of the Doppler Spectrum of the Backscattering Microwave Signal for Monitoring of Ice Cover: A Theoretical View // Remote Sens. 2022, 14, 2331. <https://doi.org/10.3390/rs14102331>