

### **Некоторые результаты радиолокационного зондирования ледяного покрова на реке Ока в Нижегородской области.**

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](mailto:d.kovaldov@ipfran.ru)*

*В работе представлены результаты серии экспериментов, проведённых зимой 2021 – 2022 года. На метромосту через реку Ока в Нижнем Новгороде были установлены радиолокаторы X –диапазона и Ka – диапазона. Импульсный радиолокатор X – диапазона работал в режиме радиовысотомера, т.е. регистрировалась форма отражённого импульса и определялось расстояние до отражающей поверхности. Это позволило измерить зависимость характеристик отражённого ледяным покровом сигнала от угла падения и азимутального направления при положительной и отрицательной температуре воздуха. Радиолокатор Ka – диапазона работал в доплеровском режиме с вырезанием постоянной составляющей, что приводило к отсутствию принимаемого сигнала при отражении от ледяного покрова. Однако использование высокоточного двухосевого инклинометра и электрического поворотного устройства позволило реализовать режим «движения» радиолокатора и измерить зависимости характеристик отраженного ледяным покровом сигнала.*

*Ключевые слова: ледяной покров, доплеровский радиолокатор Ka-диапазона, импульсный радиолокатор X-диапазона, доплеровский спектр, форма отражённого импульса.*

### **Some results of radar sensing of the ice cover on the Oka River in the Nizhny Novgorod region.**

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 conducted in the winter of 2021-2022. On the metro bridge across the Oka River in Nizhny Novgorod, X-band and Ka-band radars were installed. The X-band pulse radar worked in the altimeter mode, i.e. the shape of the reflected pulse was recorded and the distance to the reflecting surface was determined. This made it possible to consider the dependence of the characteristics of the pulse reflected by the ice cover on the angle of incidence and azimuth direction under various external conditions. The Ka-band radar operated in Doppler mode with the constant component filtering, which led to the absence of a received signal when reflected from the ice cover. However, the use of a high-precision two-axis inclinometer and an electric rotary device made it possible to obtain dependences of the characteristics of the ice cover reflected signal in dynamics depending on external conditions.*

*Key words: ice cover, Ka - band Doppler radar, X-band pulsed radar, Doppler spectrum, reflected pulse shape.*

### **Введение**

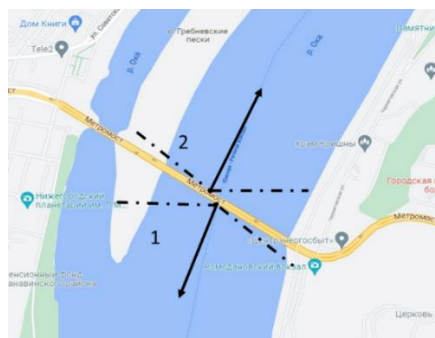
Применение радиолокационных методов для дистанционного зондирования как морской, так и речной поверхности является одним из наиболее эффективных с точки зрения возможности круглосуточного и круглогодичного мониторинга большой площади акваторий.

Основной объем информации о ледяном покрове Мирового океана и внутренних водоемов поступает со спутников. Для создания карт ледяного покрова используются микроволновые космические измерения. 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 альтиметров применяются для определения толщины льда [4]. Данные скаттерометров используются для картирования ледяного покрова и определения его типа [5-7].

В рамках данной работы исследуются характеристики отраженного ледяным покровом СВЧ-излучения в зависимости от различной температуры воздуха. Целью работы является исследование возможностей радиолокатора определять характеристики ледяного покрова на реке.

### Схема эксперимента.

Проведение измерений при малых углах падения сложно реализовать в натуральных условиях. Решением стала установка радиолокаторов на мостом через р. Ока в черте г. Н.Новгород. В серии экспериментов, проводимых в 2021 году, измерялся доплеровский спектр отражённого сигнала и исследовались зависимости его параметров от угла падения и азимутального угла [8, 9]. Зимой 2021-2022 один из доплеровских радиолокаторов  $K_a$ -диапазона заменили на импульсный радиолокатор  $X$ -диапазона, способный выполнять измерений в режиме радиовысотомера. На рис.1 представлена схема расположения радиолокаторов, а на рис. 2 фотографии самих радиолокаторов.



**Рис. 1. Схема эксперимента. Чёрными пунктирными линиями показаны ограничения азимутального поворота радиолокаторов Чёрными стрелками направление зондирования.**

Доплеровский радиолокатор (рис. 2(а)) имеет симметричную диаграмму направленности антенны и работает в  $K_a$  – диапазоне. Пришедший на смену доплеровскому радиолокатору с противоположной стороны моста импульсный радиолокатор (рис. 2(б)) с режимом радиовысотомера работает в  $X$  – диапазоне и имеет ножевую диаграмму направленности антенны. Подробные характеристики приведены в таблице 1.



**Радиолокатор 1 (а)**



**Радиолокатор 2 (б)**

**Рис. 2.** Слева (а) доплеровский радиолокатор, установленный в начале 2021 года, измерения проводятся в течение всего года (фотография сделана осенью 2021 г.), справа (б) импульсный радиолокатор, установленный зимой 2022 г., работающий в режиме радиовысотомера.

**Таблица 1.** Характеристики радиолокаторов, установленных на мосту для зимних измерений.

Радиолокатор 1	
Длина волны, мм	9.7
Частота, ГГц	30.9
Диаграмма направленности	6°×6°

Радиолокатор 2	
Диапазон рабочих частот, МГц	9200 - 9500
Максимальная ширина спектра сигнала, МГц	296
Максимальная выходная мощность передатчика, Вт	1
Ширина диаграммы направленности антенны	3,6° x 30°
Длительность импульса, мс	2,85

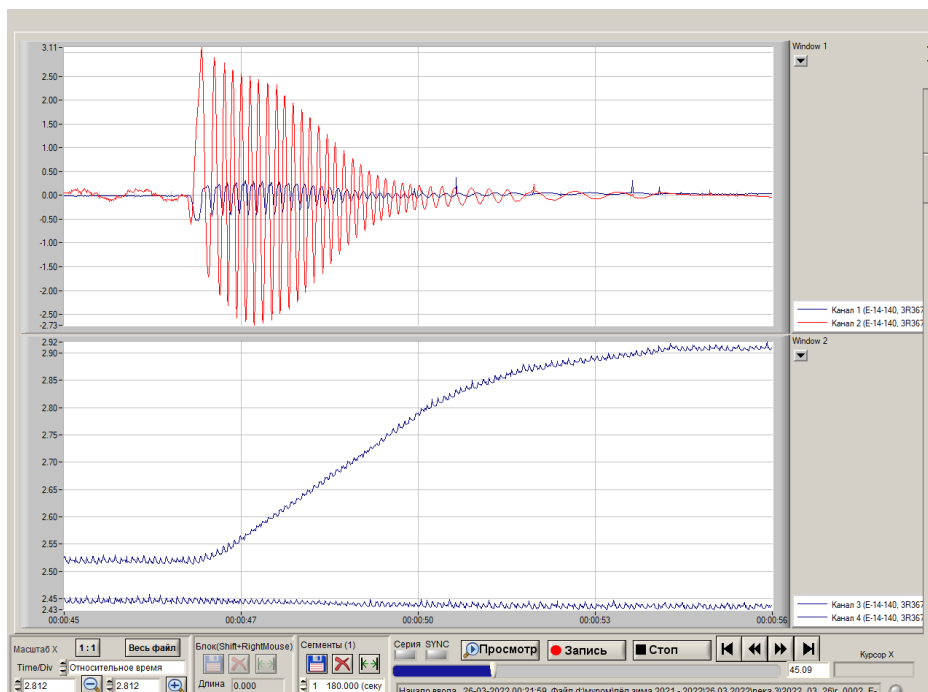
Оба радиолокатора оснащены электрическим управляемым с компьютера поворотным устройством, позволяющим менять азимутальный угол и угол падения зондирующего излучения.

Доплеровский радиолокатор отфильтровывает постоянную составляющую отражённого сигнала, поэтому при зондировании ледяного покрова отраженный сигнал отсутствует. Для проведения измерений была реализована схема записи отраженного излучения одновременно с поворотом антенны доплеровского радиолокатора (изменение угла падения). Изменения азимутального угла падения не является «движением» и отраженный сигнал отсутствует. Ориентация антенны контролировалась с помощью высокоточного двухосевого инклинометра.

### **Измерения доплеровским радиолокатором (радиолокатор 1)**

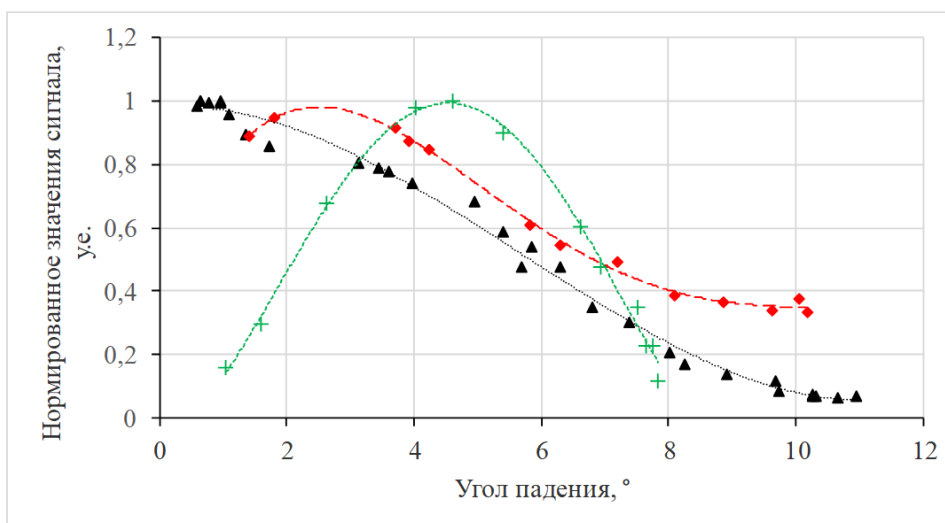
Для корректной работы доплеровского радиолокатора требуется радиальное движение радиолокатора относительно отражающей поверхности, которое бы создавало доплеровское изменение частоты. Для измерений была выработана следующая методика: в некоторый момент времени запускается поворотное устройство, меняющее угол падения, отраженный сигнал записывается одновременно с изменением угла падения. В осенних экспериментальных сериях [10] были получены

соотношения между элевацией, задаваемой в программе поворотного устройства, поворачивающего антенну радиолокатора, и реальным углом падения на основе расчёта смещения доплеровского спектра. Далее на рис.3 приведены записи двух квадратур (Канал 1 и 2) отражённого сигнала и выходных каналов (3, 4) инклинометра при изменении угла падения от  $0^\circ$  до  $16^\circ$ .



**Рис. 3.** Запись радиолокатора от 26.03.2022,  $T = 5^\circ\text{C}$  – температура воздуха. Вертикальная ось в вольтах, горизонтальная ось показывает время с начала записи. В верхнем окне идёт запись отражённого сигнала, в нижнем окне запись показаний инклинометра. На записи сигнала красная –  $\sin$ , синяя –  $\cos$  квадратуры.

Для ряда характерных случаев приведем огибающие и сравним уменьшение сигнала с увеличением угла падения на рис. 4.



**Рис. 4.** Огибающие отраженного сигнала радиолокатора от 23.01.22 (зелёным,  $T_{\text{воздуха}} = -8^\circ\text{C}$ ), 09.02.22 (красным,  $T_{\text{воздуха}} = -1^\circ\text{C}$ ) и 26.03.22 (чёрным,  $T_{\text{воздуха}} = 5^\circ\text{C}$ ), пунктирной линией обозначены аппроксимирующие полиномы.

Полученные зависимости позволяют качественно оценить распределение отражателей ледяного покрова в разные дни. Однако остаются вопросы к полученным результатам и для ответа необходимо продолжить исследования.

### Измерения импульсным радиолокатором (радиолокатор 2)

Рассмотрим первые результаты обработки отраженных импульсов радиолокатора 2. В радиовысотомерном режиме излучается короткий импульс. За счет девиации по частоте примерно в 300 МГц достигается эффективная длительность импульса 3,3 нс что дает разрешение по дальности около 50 см. Измеряя время распространения электромагнитной волны от радиолокатора до отражающей поверхности и обратно можно найти дальность до отражающей поверхности. Антенна радиолокатора ориентирована так, что пятно засветки на поверхности всегда вытянуто вдоль моста. Пример отражённых импульсов на рис. 5. Время задержки пересчитали в дальность и построили зависимость мощности отражённого импульса от расстояния.

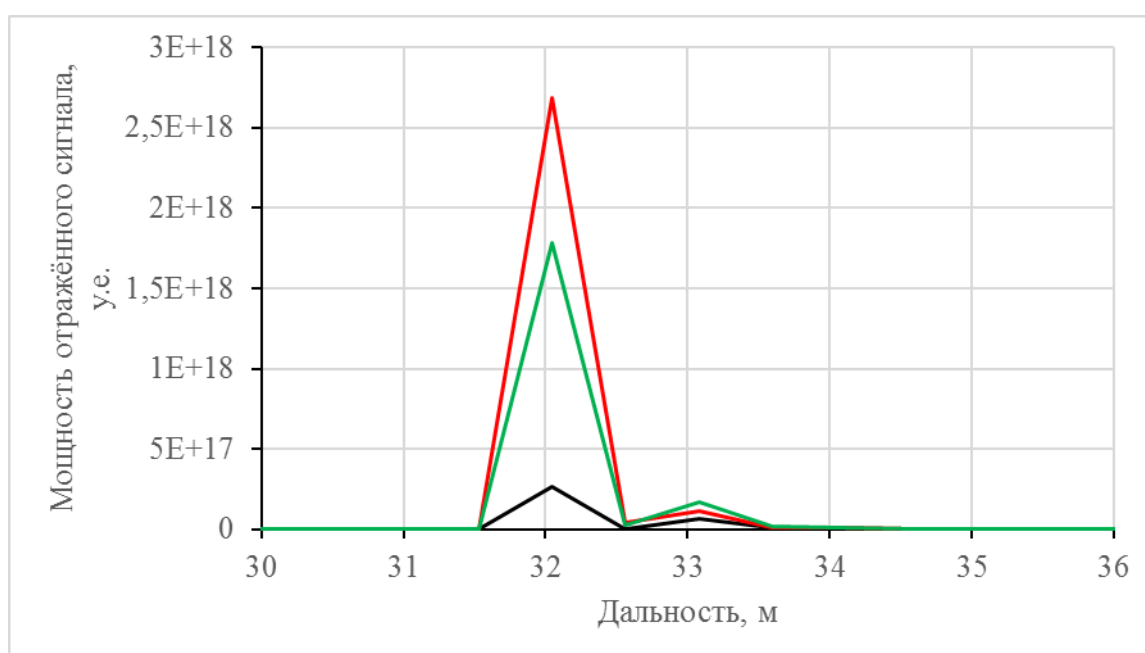
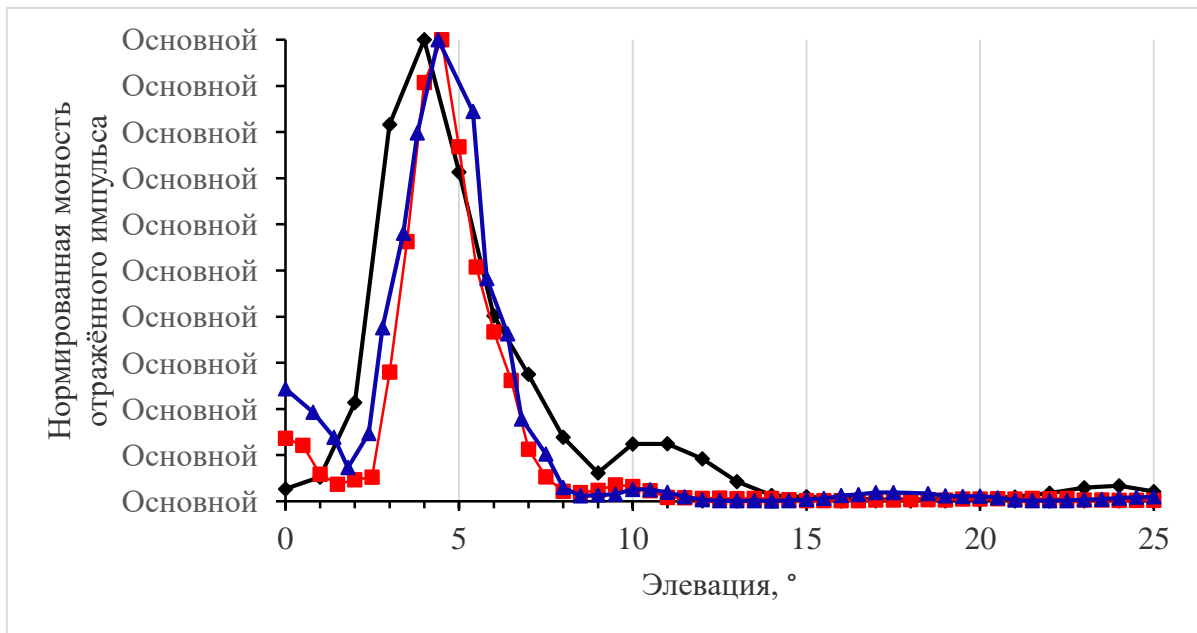


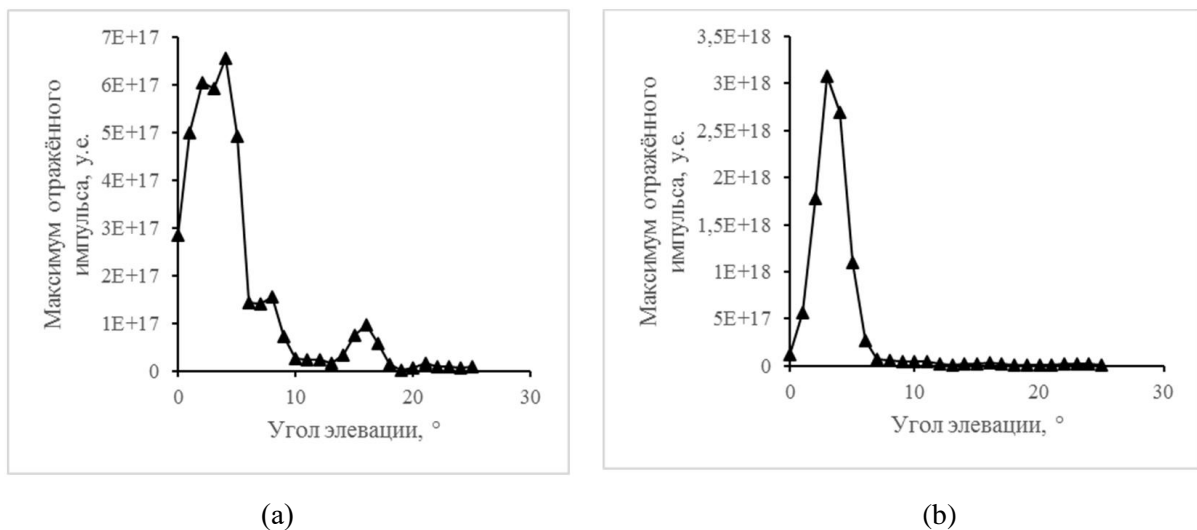
Рис. 5. Пример отражённого импульса, разным цветом показаны значения при разных углах падения: чёрный - 6°, зелёный - 2°, красным - 4°. Представлены часть результатов экспериментов, сделанных 20 марта при температуре воздуха 5°C

На рис. 6 приведена зависимость максимальной мощности отражённого импульса от угла падения при азимутальном угле 0° (перпендикулярно мосту). Углы элевации приводятся такими, как задавались поворотному устройству. Предполагаем, что надирное зондирование выполняется при угле элевации около 4°, однако это оценка. В дальнейшем углы элевации будут пересчитаны в углы падения по измерениям доплеровского спектра, отраженного от чистой воды и будет получено точное значение. Измерения были проведены 16 марта, 22 марта и 26 марта 2022 года при средней температуре воздуха -3°C, +7°C и +5°C соответственно. Следует обратить внимание на второй максимум, возникающий около 10° элевации на измерениях 16 марта. Из рисунка видно, что второй максимум становится значительно меньше со временем и с ростом температуры воздуха. Объяснить такой характер зависимости можно тем, что растаяла некая отражающая площадка.



**Рис. 6. Зависимость значения максимума отражённого импульса от угла элевации задаваемом на поворотном устройстве. Чёрным цветом 16.03.22 температура воздуха  $-3^{\circ}\text{C}$  ясная погода, красным 22.03.22 температура воздуха  $7^{\circ}\text{C}$  ясная погода, синим 26.03.22 температура воздуха  $5^{\circ}\text{C}$  с мокрым снегом**

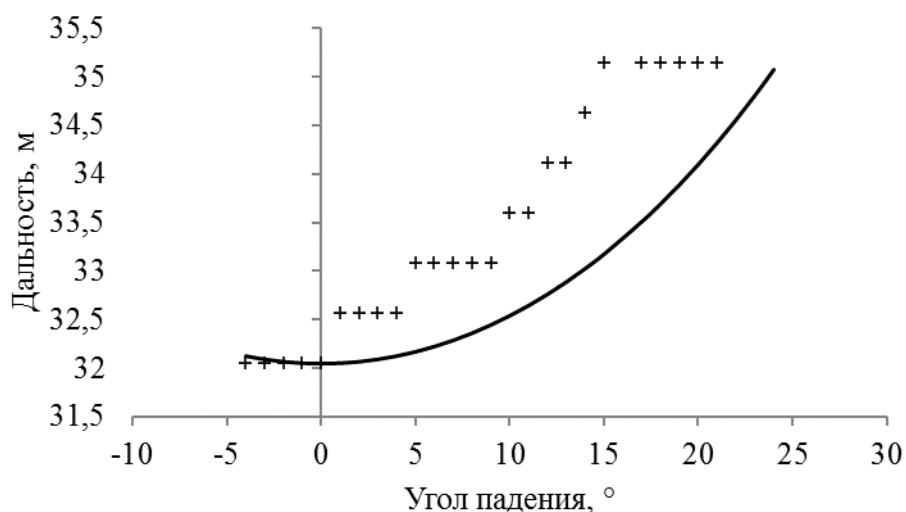
На рис. 7 (а) и (б) приведены зависимости максимумов отражённых импульсов от угла падения, но при разных азимутальных углах зондирования.



**Рис. 7. Зависимость значения максимума отражённого импульса от угла падения при изменении азимутального угла на  $45^{\circ}$  против часовой стрелки (а) и  $45^{\circ}$  по часовой стрелке (б).**

Данные эксперименты проводились 20 марта 2022 года в условиях плюсовых температур воздуха. На рис.7 (а) видны шумы, вопрос их происхождения ещё обсуждается. Тем не менее, виден второй максимум как на рис.6, но он сместился вправо, в то время как на рис.7 (б) второго максимума вообще не наблюдается. Это может быть связано с различиями рельефа ледяного покрова в разных направлениях.

По измерениям можно построить зависимость дальности, измеряемой радиолокатором в режиме радиовысотомера, от угла падения (см. рис.8). Дополним график теоретическим расчетом изменения дальности вдоль оси диаграммы направленности от угла падения при условии, что при всех углах падения есть обратное отражение. Углы падения вычислены из предположения, что  $4^\circ$  элевации соответствуют надирному зондированию.



**Рис. 8. Сравнение экспериментальной зависимости дальности до максимального отражения от угла падения (плюсы) и теоретической кривой (сплошная линия) показывающей изменение дальности до отражающей поверхности по оси диаграммы направленности антенны.**

По данному рисунку видно, что дальность до максимального отражения растет с углом падения несколько быстрее чем дальность от радиолокатора до центра облучаемой площадки на ледяном покрове. Возможно, что это связано с тем, что радиолокатор имеет ножевую диаграмму направленности антенны из-за чего в область наблюдения радиолокатора всегда попадает некоторый диапазон дальностей.

#### **Выводы**

В работе обсуждается постановка и проведение экспериментов на Нижегородском метромосту с доплеровским радиолокатором  $K_a$ -диапазона и импульсным радиолокатором  $X$ -диапазона работающего в режиме радиовысотомера.

В первой серии экспериментов качественно рассмотрели характеристики отражённых от поверхности льда сигналов доплеровского радиолокатора. Из полученных результатов видно, что зависимости отраженного сигнала от угла падения меняются при изменении температуры воздуха.

Во второй серии экспериментов исследовались характеристики отражённых импульсов радиолокатора  $X$ -диапазона. По результатам так же видно, что зависимости от угла падения зависят от температуры воздуха. Следует заметить, что у радиолокатора 2 есть возможность работы в доплеровском режиме, что будет использовано для определения истинного угла падения по измерениям доплеровского спектра отраженного водной поверхностью сигнала.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-17-00179.*

## 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. Рябкова М.С., Караев В.Ю., Панфилова М.А., Титченко Ю.А., Мешков Е.М., Зуйкова Э.М., Доплеровский спектр радиолокационного СВЧ-сигнала обратного рассеяния: эксперимент на реке // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 213-217.
9. Karaev, V., Ryabkova, V., Panfilova, M., Titchenko, Yu., Meshkov, Eu., Zuikova, E., Microwave Doppler radar experiment on a river// Proceedings of IGARSS 2021, pp. 7350-7353.
10. Ковалдов Д.А., Рябкова М. С., Титченко Ю.А., Караев В.Ю., Мешков Е. М., Зуйкова Э.М., Свойства доплеровских спектров отраженного микроволнового излучения при малых углах падения в условиях речного течения // 19-й Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 2021 г. С.238.