

Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения для пресноводного льда в X диапазоне

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

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук

Нижний Новгород, Россия

E-mail: d.kovaldov@ipfran.ru

2023 г.

Постановка эксперимента



Рисунок 1. Фотография поверхности реки с камеры установленной на «Река X» (сверху) и фотография радиолокатора «Река X» во время зимней серии экспериментов (снизу).



Рисунок 2. Схема установки. Белой стрелкой указан перпендикуляр к мосту. Пунктирные линии показывают конструктивные ограничения – предельные азимутальные углы поворота радиолокаторов «Река X» - 190° - 350° .

Особенности работы «Река X».



Рисунок 3. Схема реализации частотной модуляции в «Река X» с указанием режимов работы.

Таблица 1. Характеристики режимов работы «Река X».

Характеристики сигнала	Режим измерения ДС	Режим измерения дальности
ΔF	39,999353 МГц	289,999008 МГц
T	$88,88 \text{ мкс} * 10^5 \approx 10 \text{ с}$	$2.85 \text{ мс} * 100 = 0,285 \text{ с}$

Режимы отличаются по длительности: во время измерения ДС излучается 10^5 импульсов каждый длительностью 88,88 мкс, таким образом суммарное время ≈ 10 с, в режиме измерения дальности излучается 100 импульсов длительностью 2.85 мс и суммарное время 0,285 с.

Особенности работы «Река X».

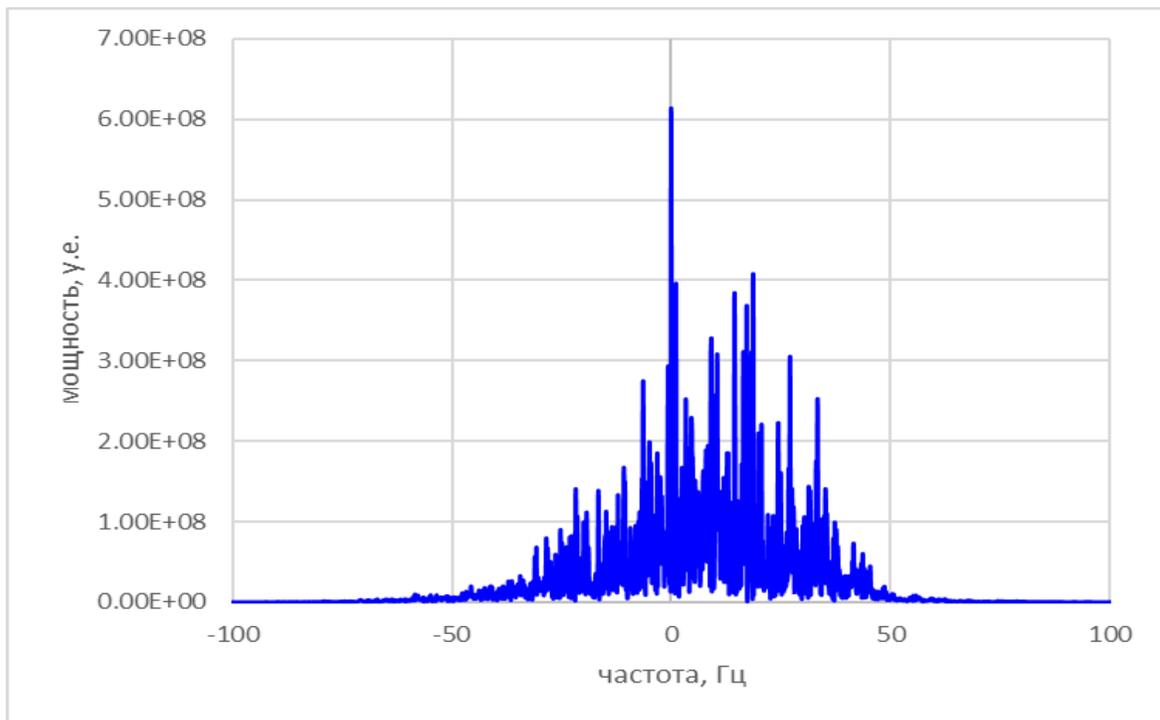


Рисунок 4. Пример экспериментального доплеровского спектра сигнала за 10 секунд «Река X», отражённого от поверхности реки.

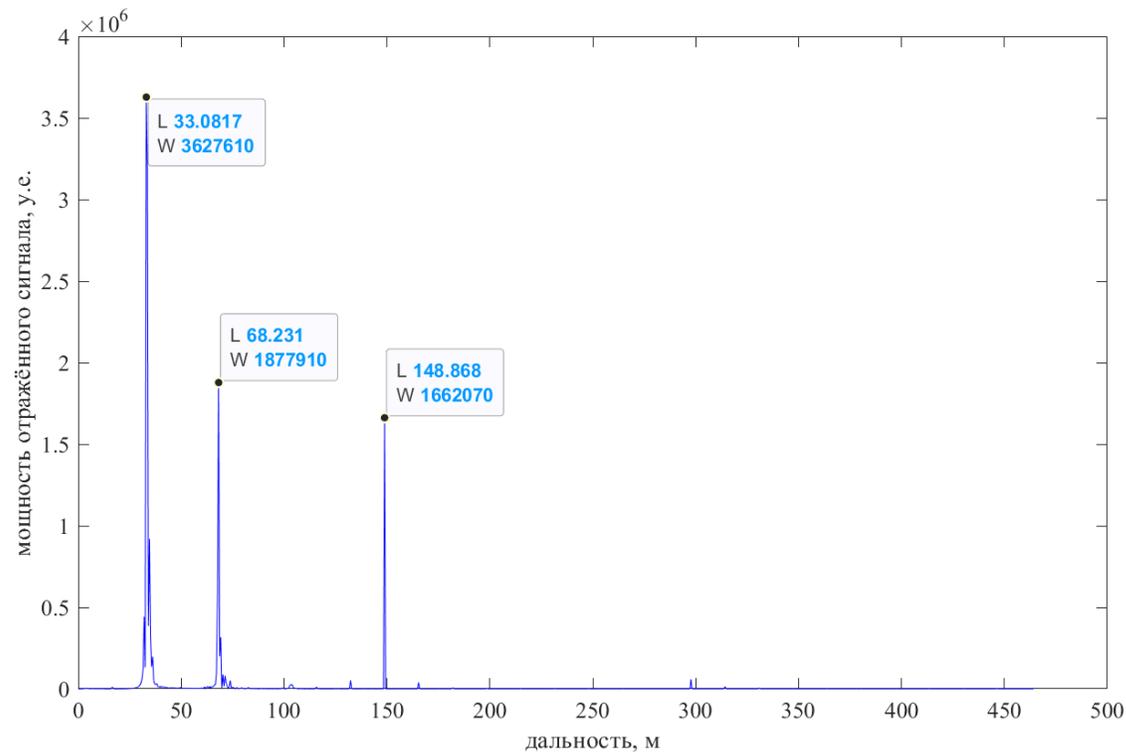


Рисунок 5. Пример записи радиолокатора в режиме измерения дальности до отражающей площадки.

Режим измерения дальности радиолокатора «Река X»

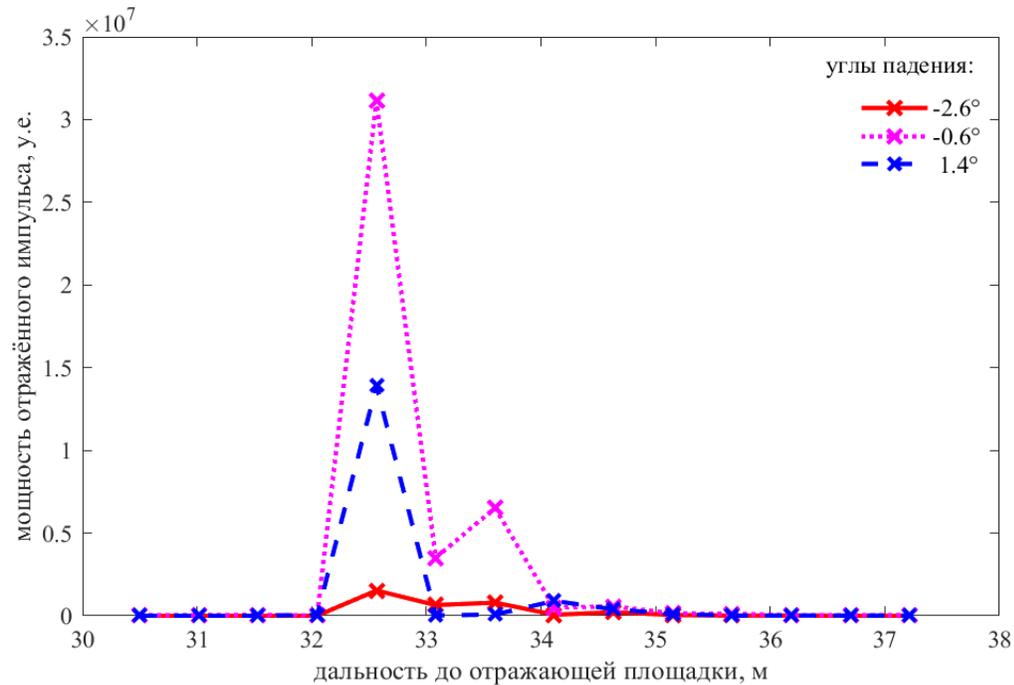


Рисунок 6. Усреднённые за секунду регистрируемые импульсы, полученные в серии экспериментов 25.02.23, разным цветом показаны разные углы падения.

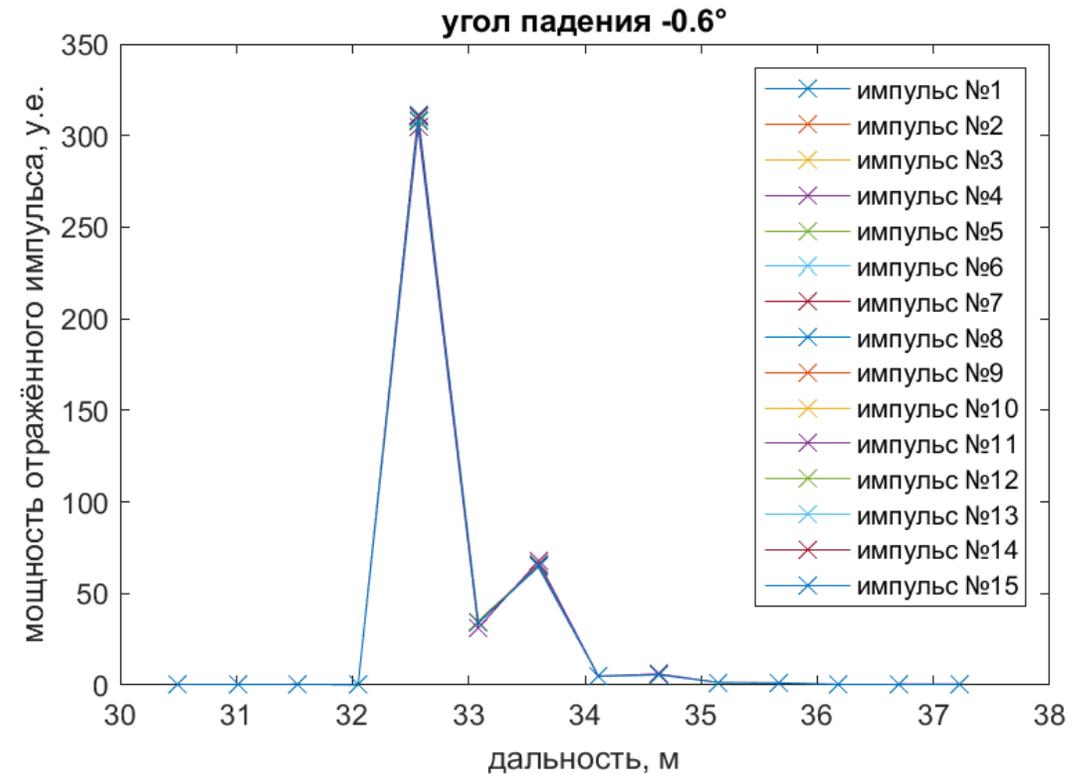


Рисунок 7. Все импульсы, зарегистрированные в течении одного эксперимента.

Зависимость мощности отраженного сигнала от угла падения.

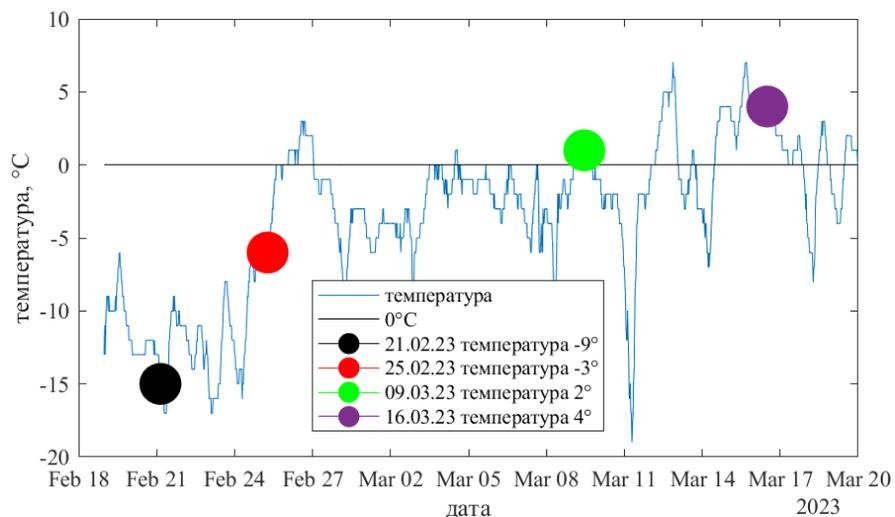


Рисунок 8. График температуры воздуха в феврале-марте 2023 года, с датами экспериментов.

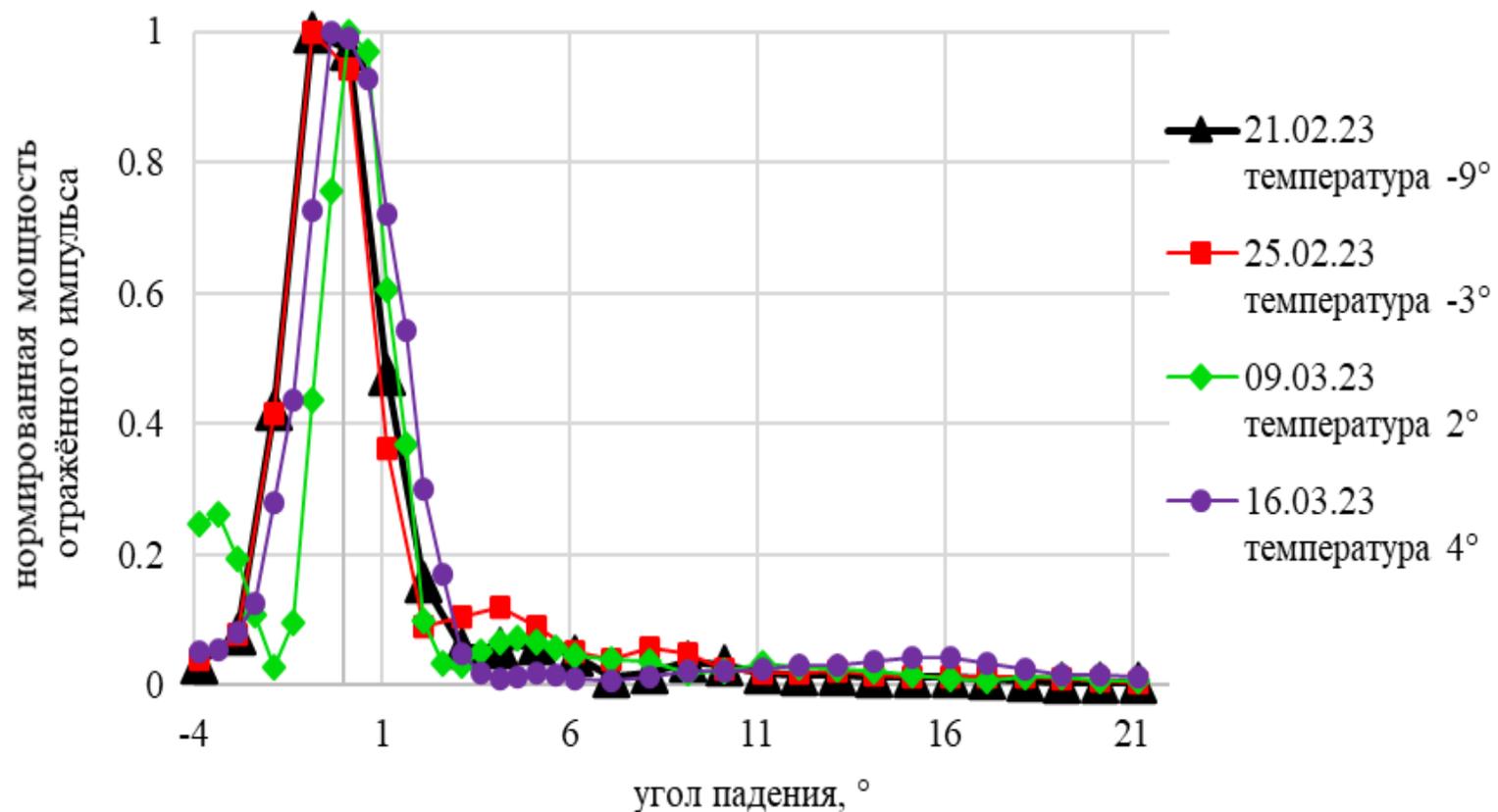


Рисунок 9. Зависимость нормированной интегральной мощности отражённого импульса от угла падения.

Особенность диаграммы направленности антенны.

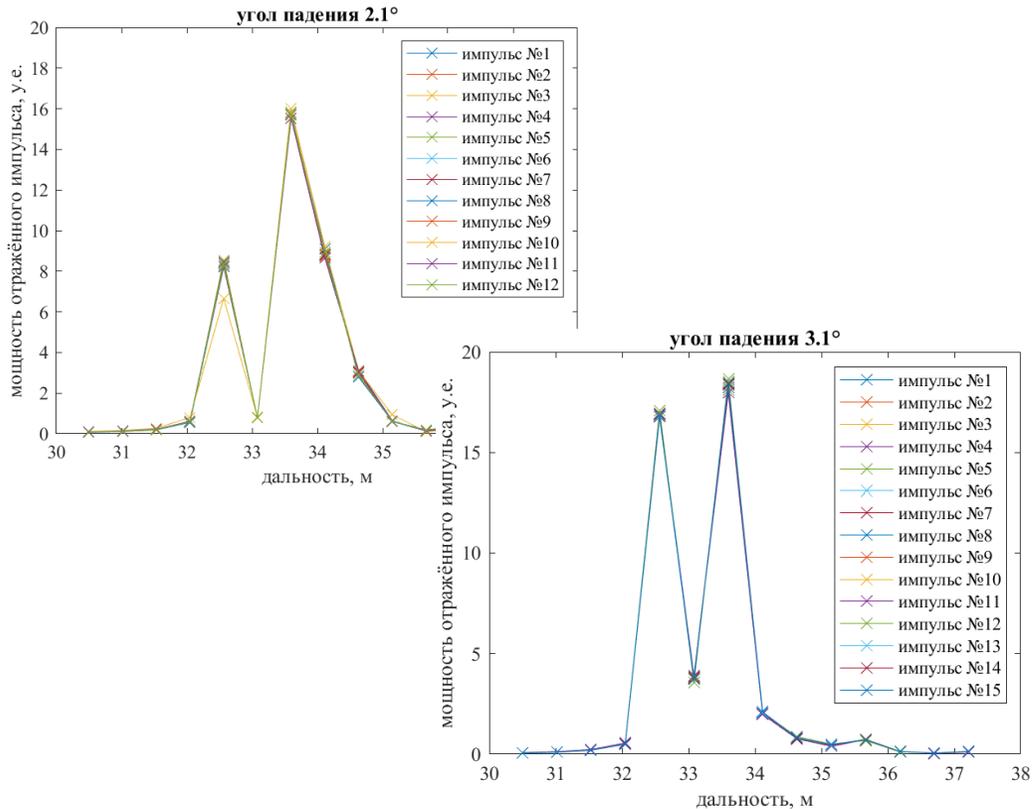


Рисунок 10. Примеры отражённых импульсов, мощность которых увеличилась с углом падения. Из эксперимента 25.02.23.

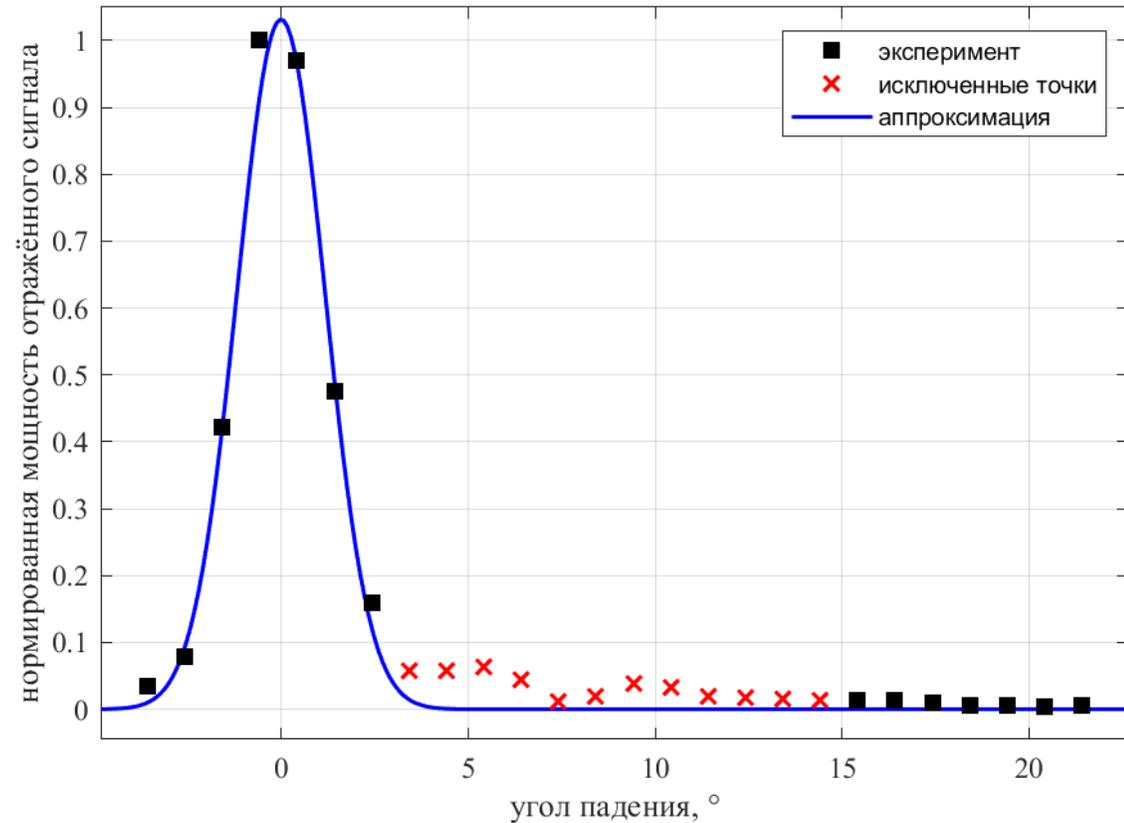


Рисунок 11. Зависимость нормированной интегральной мощности с исключенными точками (чёрные квадраты и красные кресты) и аппроксимация гауссовой кривой (синяя линия)

Зависимость мощности отраженного сигнала от угла падения.

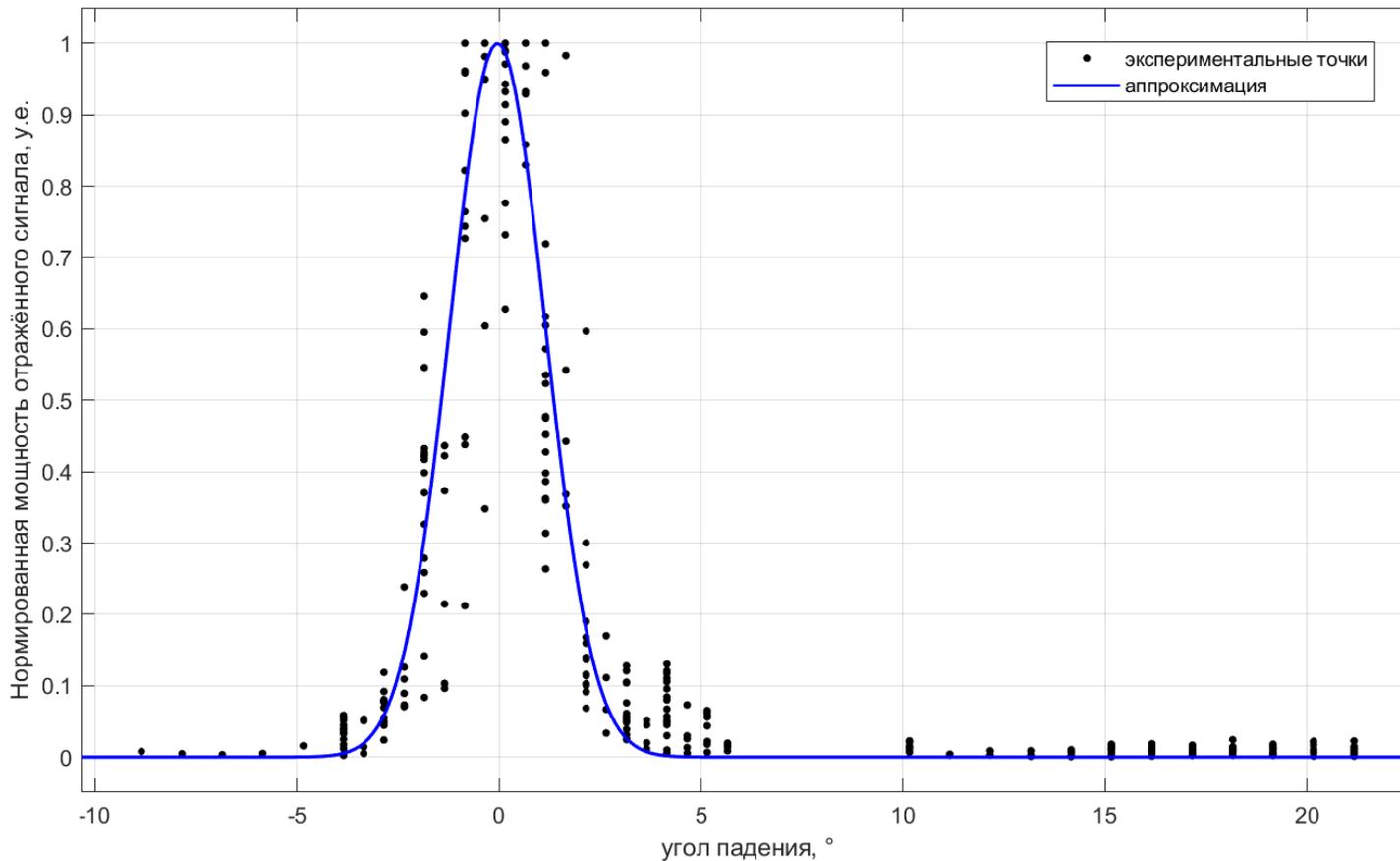


Рисунок 12. Аппроксимация по всем экспериментальным дням.

Аппроксимация построена по функции Гаусса:

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

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:

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

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.

Моделирование отражения СВЧ сигнала ледяной поверхностью.

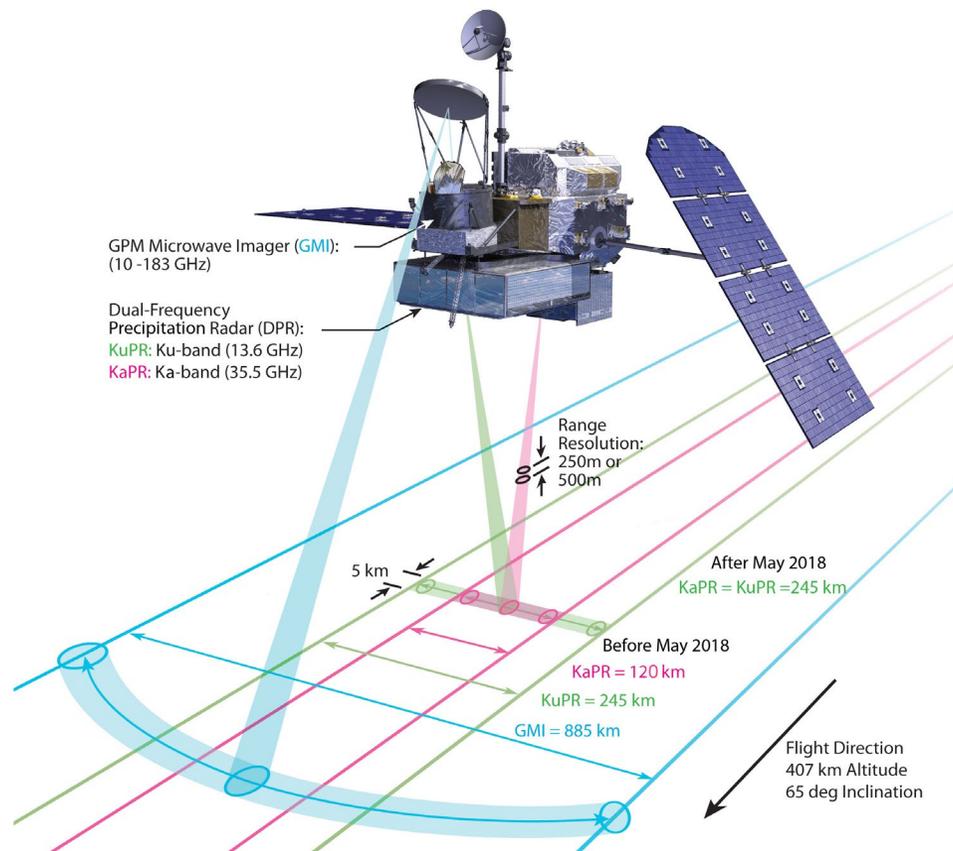


Рисунок 13. Спутник миссии GPM.

$$RCS(\theta) = a1 + a2 * \theta + a3 * \theta^2 + a4 * \exp(-a5 * |\theta|)$$

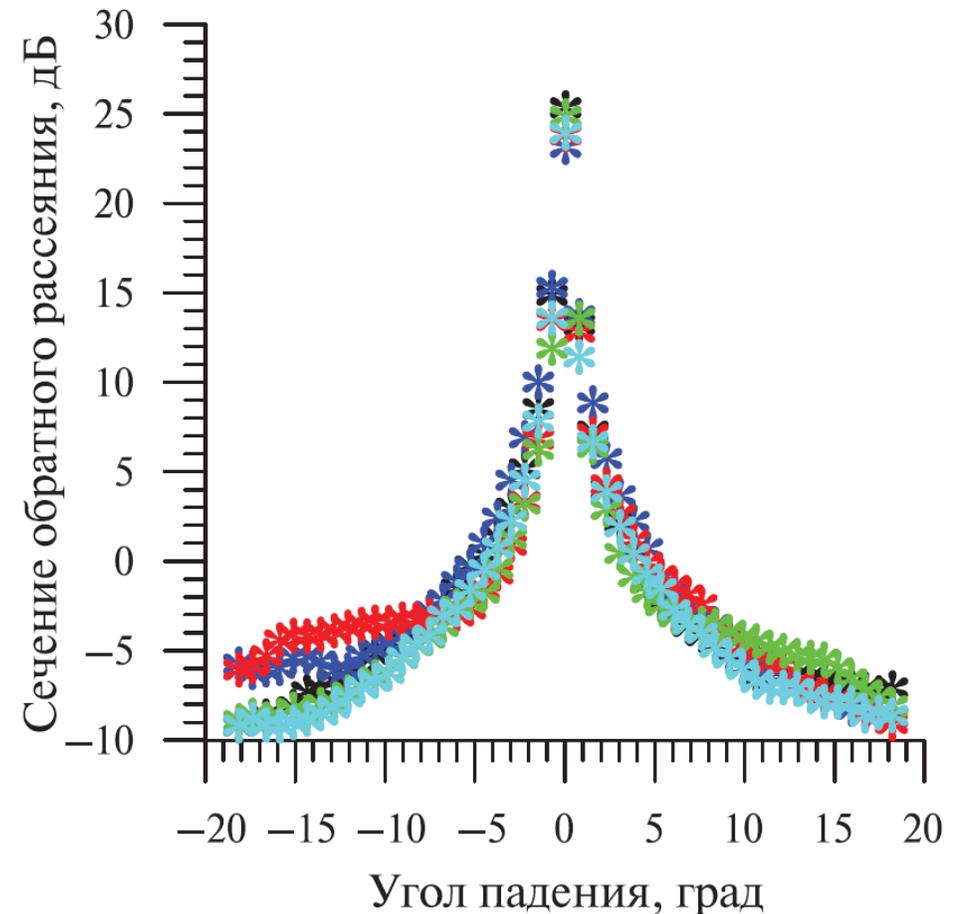


Рисунок 14. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения (Ku-диапазон) для «сухого» ледяного покрова

Диаграмма направленности антенны

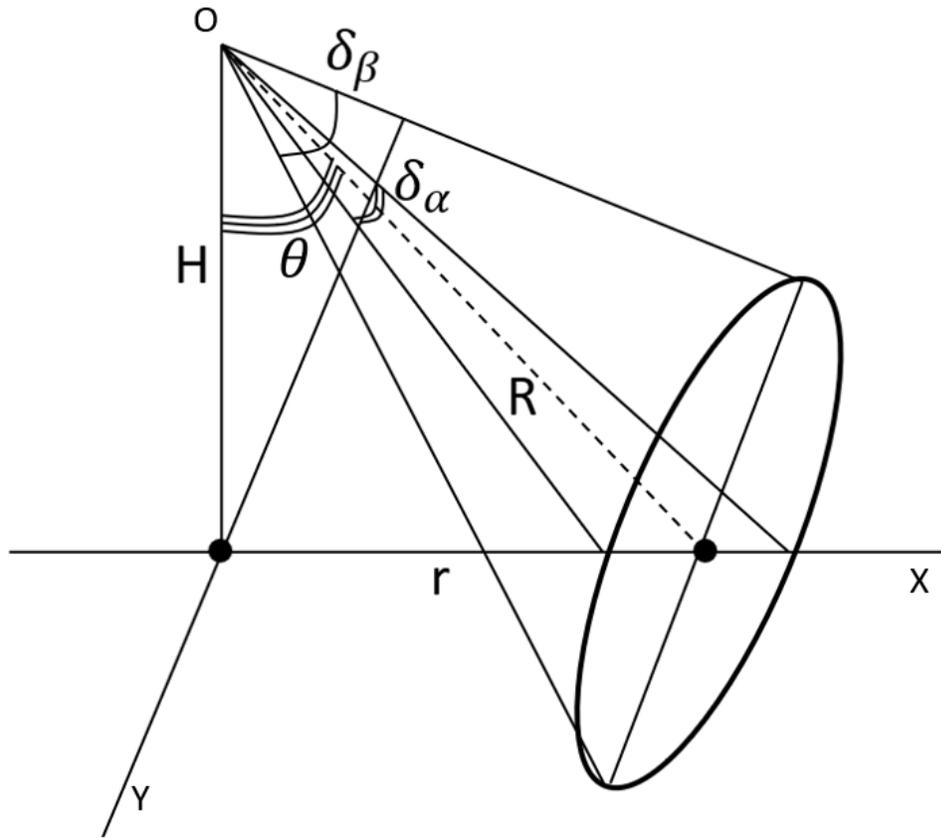


Рисунок 15. Схема модельного эксперимента. H – высота моста (принимаем для расчетов 30 м), θ – угол падения, δ_α и δ_β – углы раскрытия диаграммы направленности антенны по оси X и оси Y соответственно, R – расстояние до центра диаграммы от точки излучения, r – расстояние до центра ДН по оси X .

Для моделирования диаграммы направленности антенной системы воспользуемся следующим уравнением:

$$G = \exp\left(-1.38 * \left(\frac{(\theta - \alpha)^2}{\delta_\alpha^2} + \frac{\beta^2}{\delta_\beta^2}\right)\right)$$

Где θ – угол падения, δ_α – раскрыв по углу падения (3.6°), δ_β – раскрыв по азимутальному углу (30°).

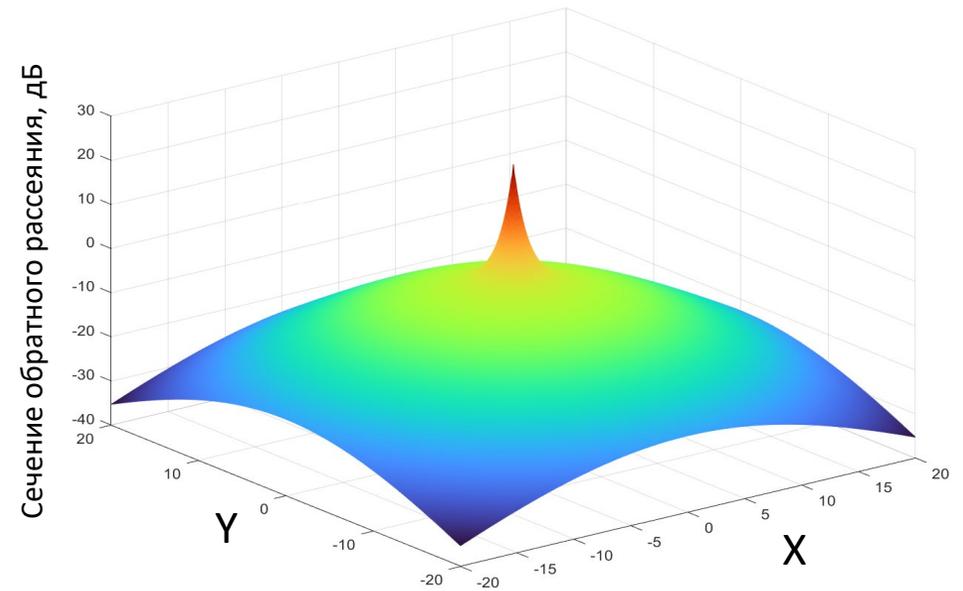


Рисунок 16. Двумерная модель рассеивающей ледяной поверхности.

Зависимость мощности отраженного сигнала от угла падения.

a1	-3.1517893	-3.2
a2	-0.008708478	-0.01
a3	-0.016928228	-0.018
a4	26.013494	26
a5	-0.52884205	-0.5

$$RCS(\theta) = a1 + a2 * \theta + a3 * \theta^2 + a4 * \exp(-a5 * |\theta|)$$

$$P(\theta) = \iint G^4(x, y, \theta) * RCS(x, y) dx dy$$

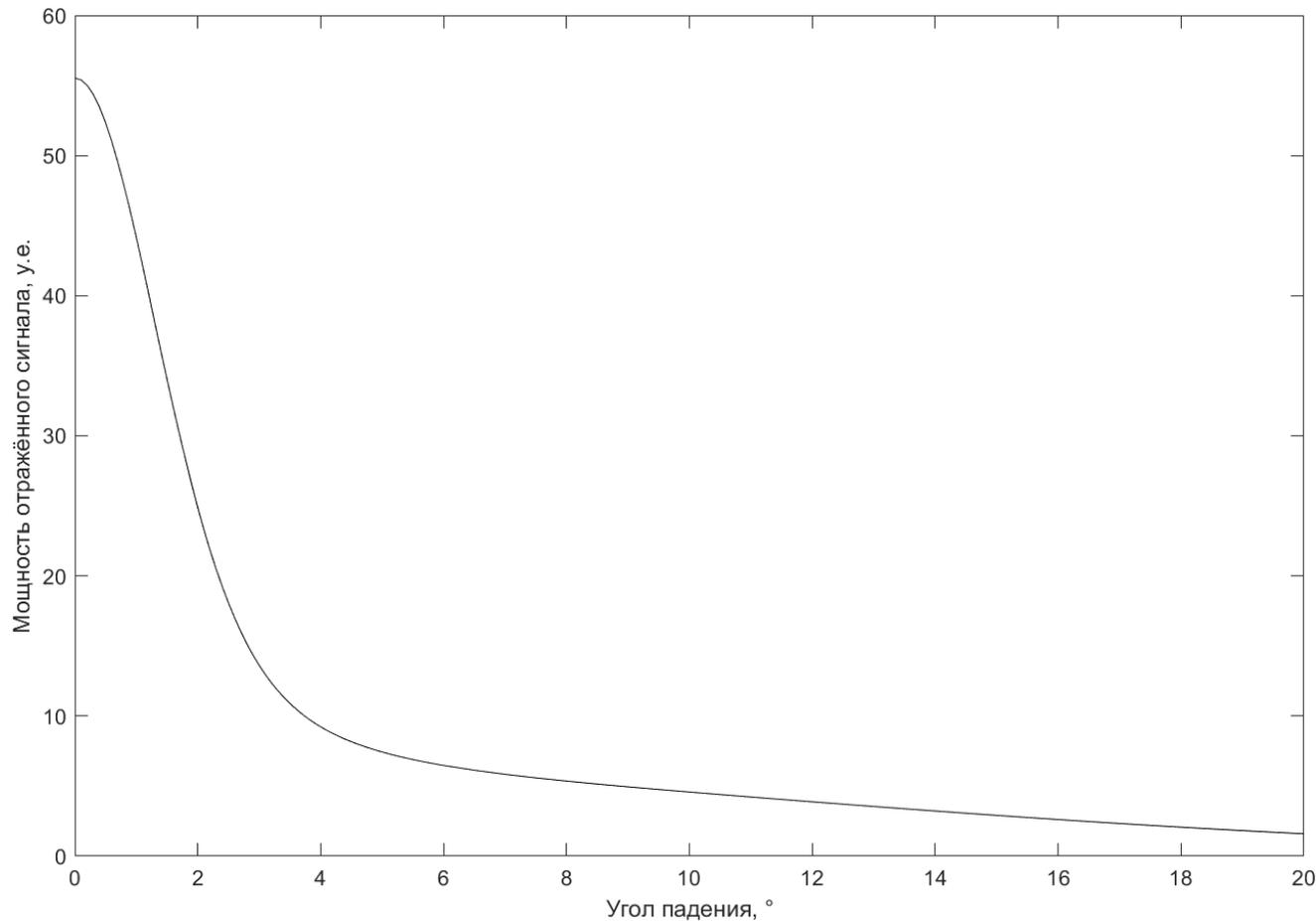
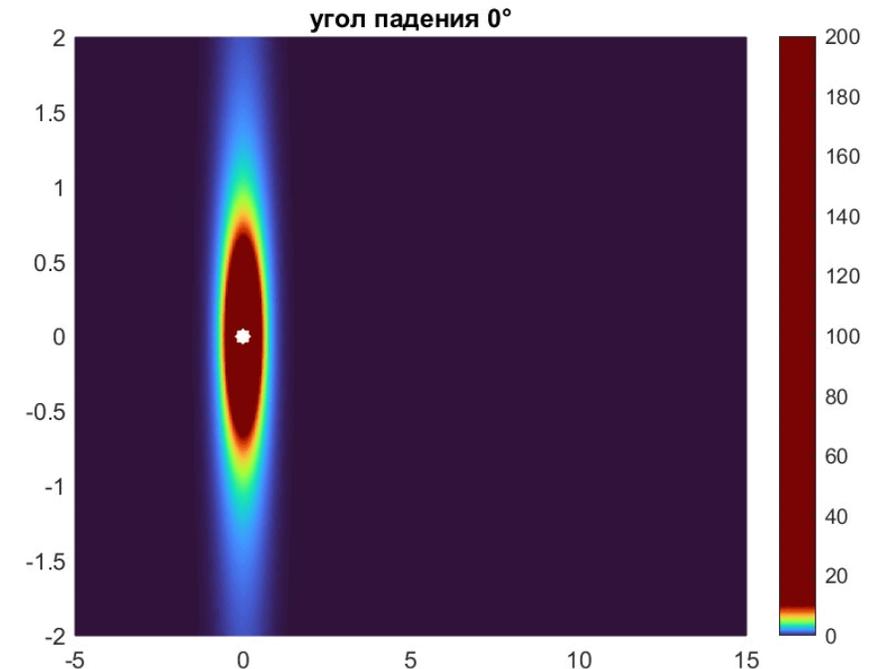


Рисунок 17. Смоделированная зависимость мощности отражённого ледяной поверхностью сигнала от угла падения.



Заключение

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.

Предложен метод построения универсальной зависимости.