

# Применение ГНСС-Р для измерения диаграммы рассеяния ледяного покрова в L-диапазоне

Д.А. Ковалдов, Ю.А. Титченко, В.Ю. Караев, М.А. Панфилова

*Институт прикладной физики РАН*

*E-mail: [d.kovaldov@ipfran.ru](mailto:d.kovaldov@ipfran.ru)*

## Введение. ГНСС-рефлектометрия и TechDemoSat-1.

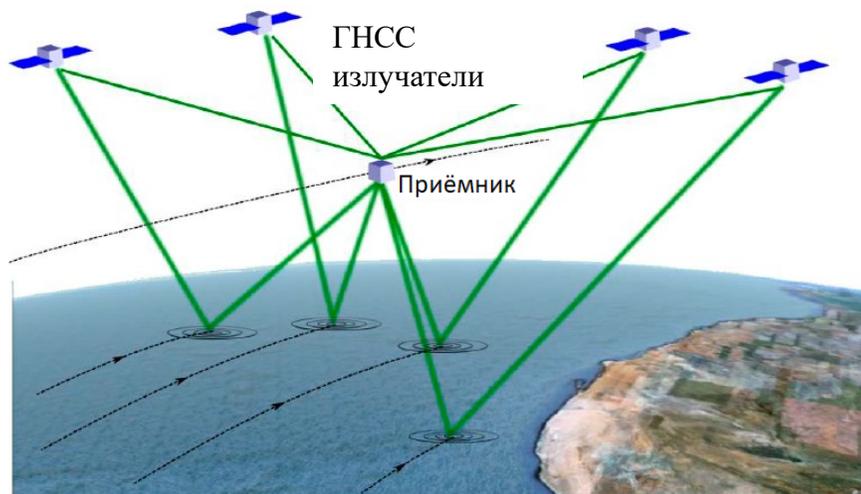


Рис.1 Схема ГНСС-рефлектометрии

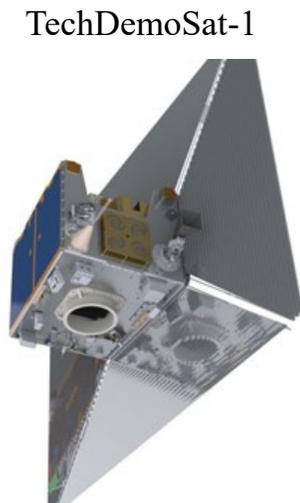


Рис.2 Спутник для демонстрации возможностей ГНСС-Р TechDemoSat-1 (TDS-1)

Существуют системы GNSS-R для мониторинга скорости приводного ветра и параметров морского волнения. Активно развивается применение GNSS-R для мониторинга ледяного покрова и суши. Показаны возможности использования GNSS-R для оценки толщины снежного покрова, влажности почвы и анализа растительности.

Работа с использованием GNSS-R осуществляется в бистатической конфигурации, то есть спутники, входящие в группировку ГНСС, являются излучателями, которые находятся на большом (20000 км) удалении от Земли, приёмником выступает спутник, находящийся на околоземной (600 км) орбите.

# DDM - частные случаи вода/лёд. Доплеровский спектр.

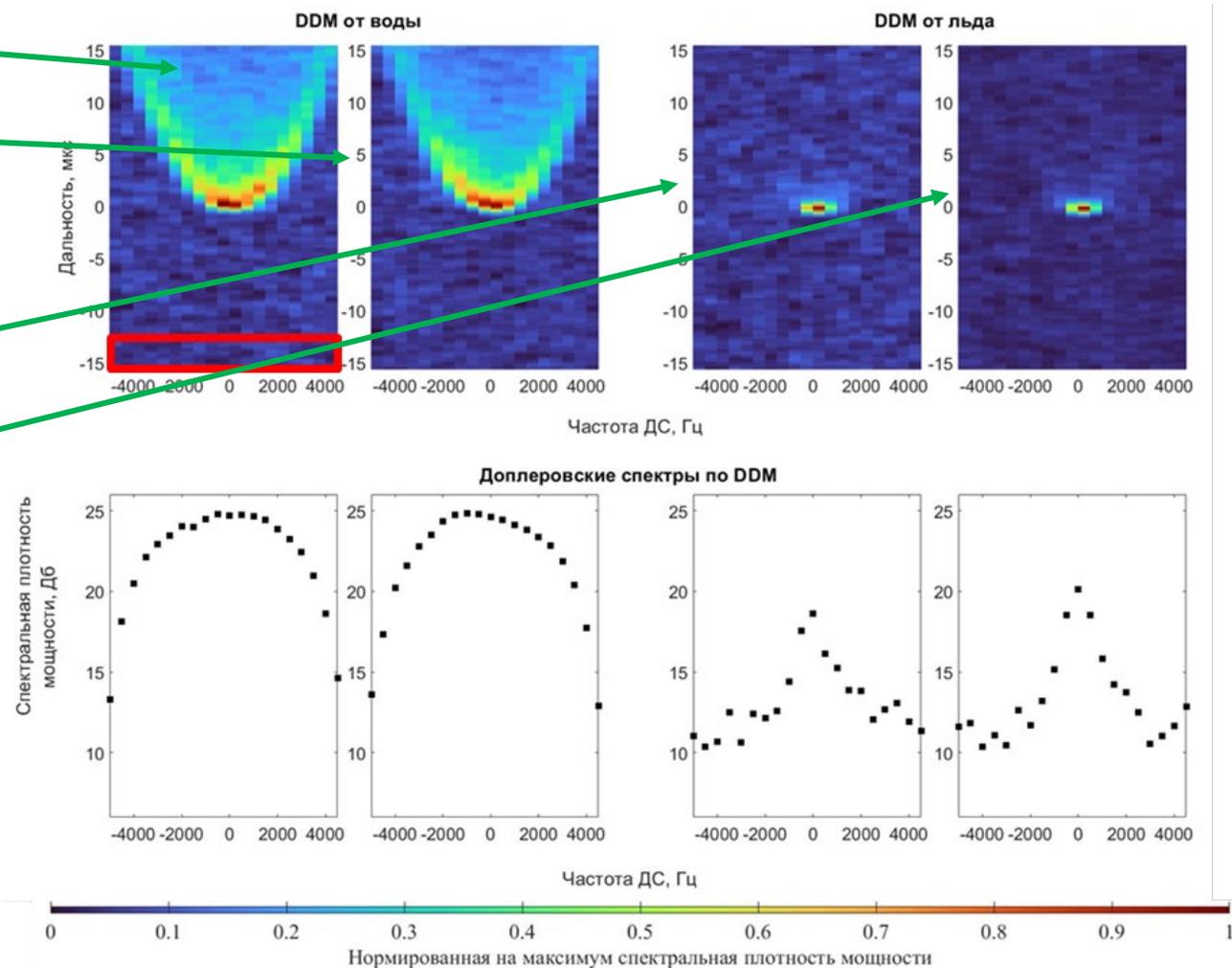
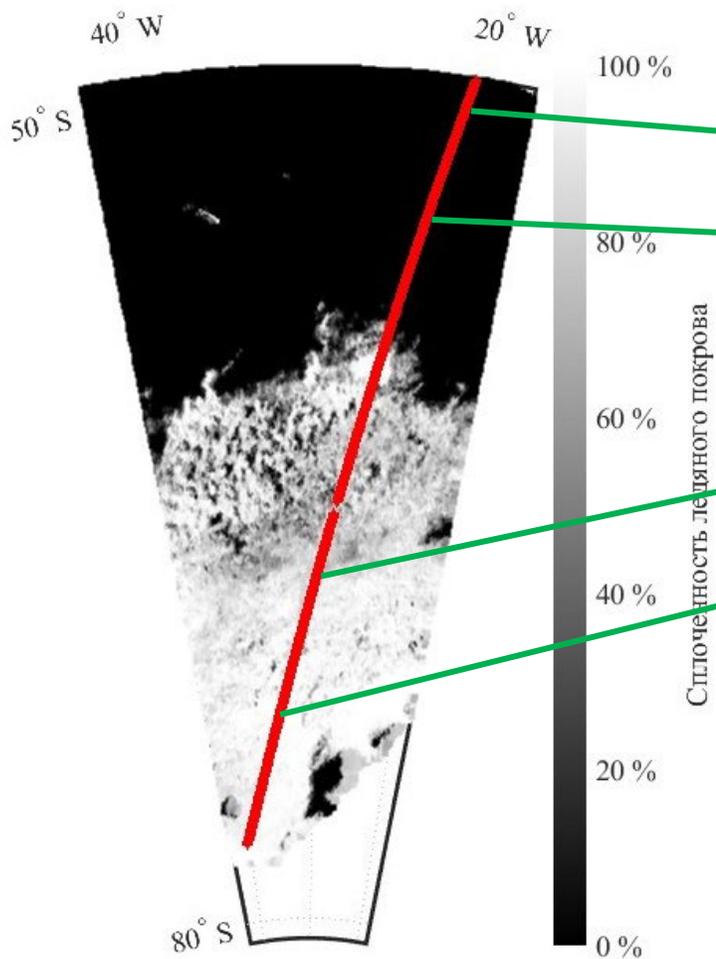


Рис. 3. Карта сплоченности ледяного покрова с нанесёнными на неё зеркальными точками (красные). Сплоченность льда представлена в процентах (0% - чистая вода, 100% - сплошной лед)

Рис. 4. DDM и доплеровские спектры для взволнованной водной поверхности (слева) и для ледяного покрова (справа).

# Формирование DDM и пересчет в углы падения.

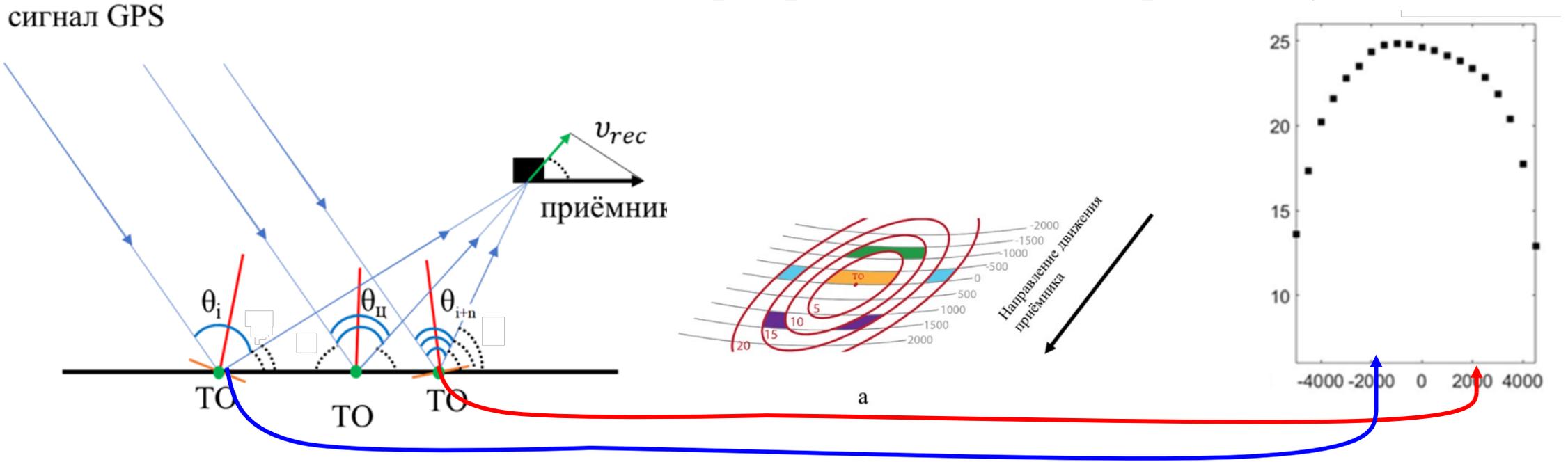


Рис. 5. Схема распространения сигнала в плоскости зондирования (слева) и схема формирования DDM (справа).

Каждая точка характеризуется своим углом  $\theta_i$  между направлениями от ТО к приёмнику и от ТО к излучателю. Разница между этим углом  $\theta_i$  и центральным  $\theta_{\text{ц}}$  при делении на 2 даёт угол между биссектрисами:  $\varphi_i = \frac{(\theta_i - \theta_{\text{ц}})}{2}$ . Где  $\varphi_i$  – угол между биссектрисой угла нормального отражения и биссектрисой в точке  $i$  на линии зондирования, для каждого такого угла устанавливается в соответствие изменение доплеровского смещения относительно центрального на основе рассчитанной проекции скорости приёмника:  $\Delta f_i = f_i - f_{\text{ц}} = \frac{v_i - v_{\text{rec}i}}{\lambda}$ . В которой  $f_i$  – доплеровское смещение при отражении сигнала от  $i$  точки отражения,  $f_{\text{ц}}$  – доплеровское смещение при отражении сигнала от центральной точки отражения,  $v_{\text{rec}i}$  – проекция скорости приёмника на направление приёма для центрального угла,  $v_i$  – проекция скорости приёмника на направление приёма для  $i$  точки отражения.

# Диаграмма рассеяния. Частные случаи.

Рис. 7. Зависимость сечения обратного рассеяния взволнованной водной поверхности (а) и ледяного покрова (б) от угла падения в Ку диапазоне по данным DPR.

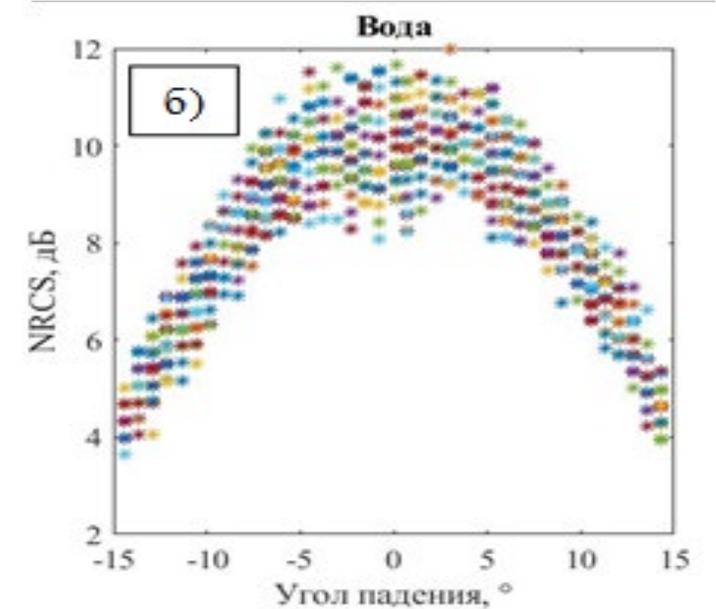
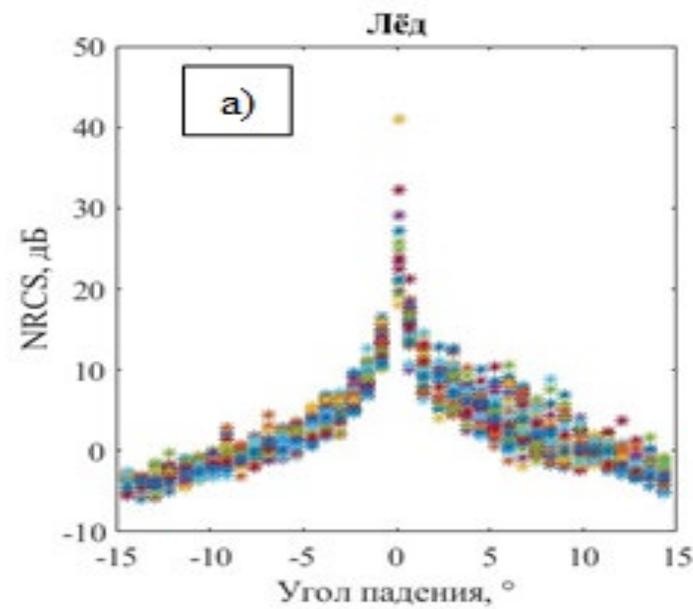


Рис. 6. Карта сплоченности ледяного покрова моря Уэдделла в Антарктике (б) и Охотского моря (а) с нанесёнными рассматриваемыми точками. (в) Карта области Атлантического океана с нанесёнными рассматриваемыми точками. Диаграммы рассеяния поверхности покрытой льдом (г) и взволнованной водной поверхности (д) поверхности нормированные на максимум, цвета зависимостей соответствует точкам на картах (а), (б) и (в).

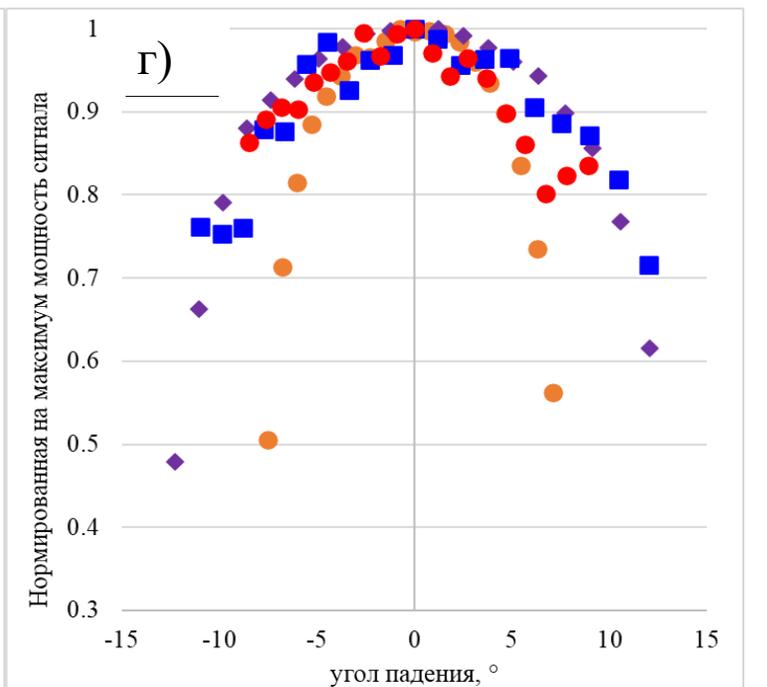
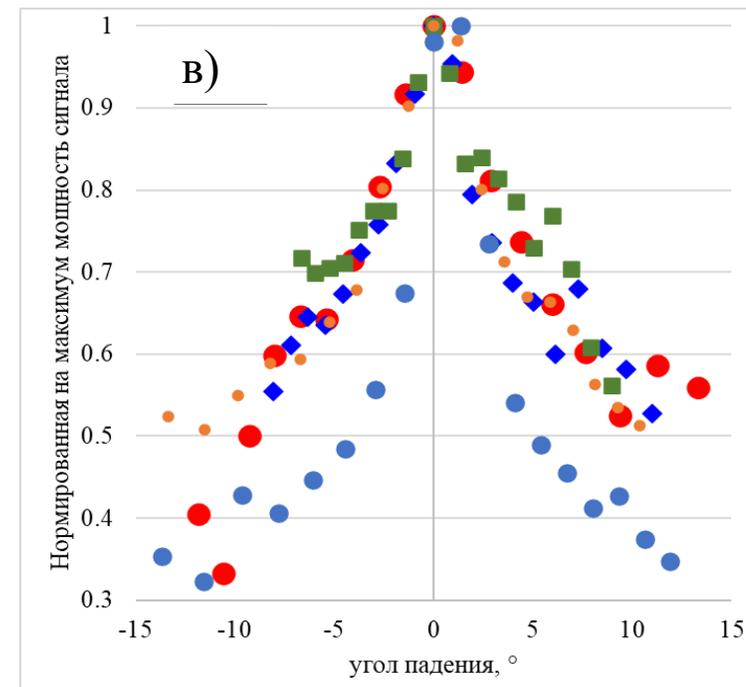


Рис. 8. Диаграммы рассеяния поверхности покрытой льдом (в) и взволнованной водной поверхности (г) поверхности нормированные на максимум

# Выбор полигона.

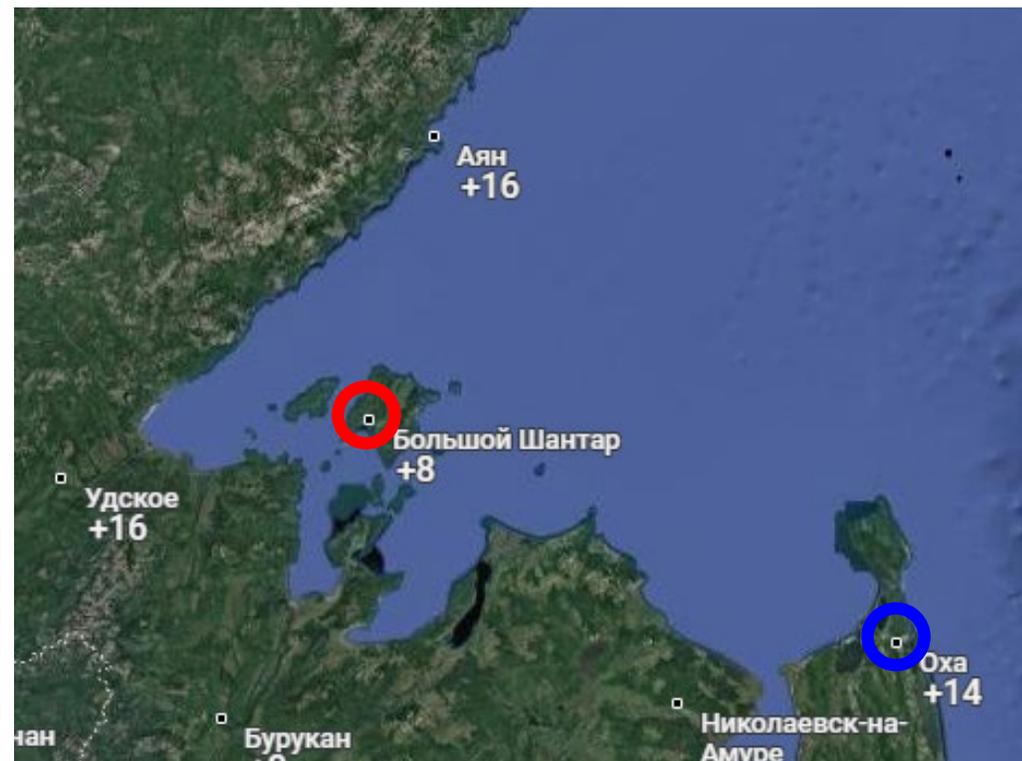
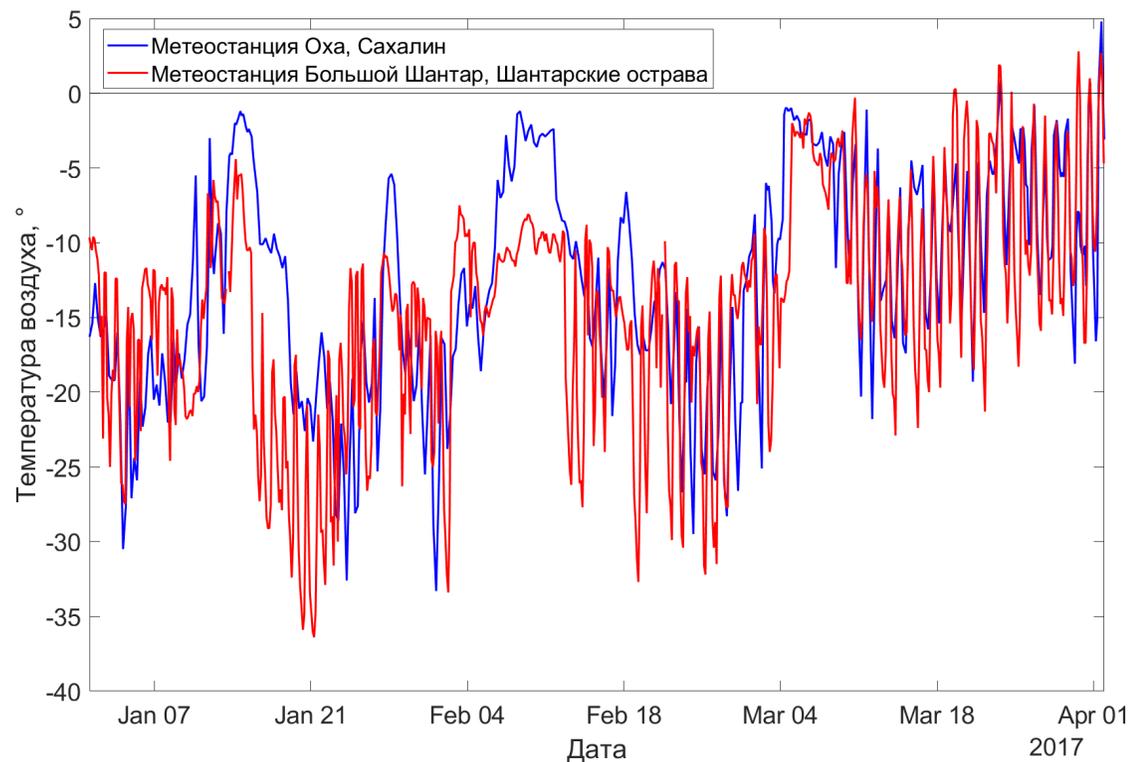


Рис. 9. График изменения температуры с 1 января до 1 апреля 2017 года (слева), данные с метеостанции Оха - синим цветом, данные с метеостанции Большой Шантар - красным цветом, справа показаны положения метеостанций на карте. (<https://rp5.ru/>)

# Выбор полигона. Оптические снимки и карты вида ледяного покрова.

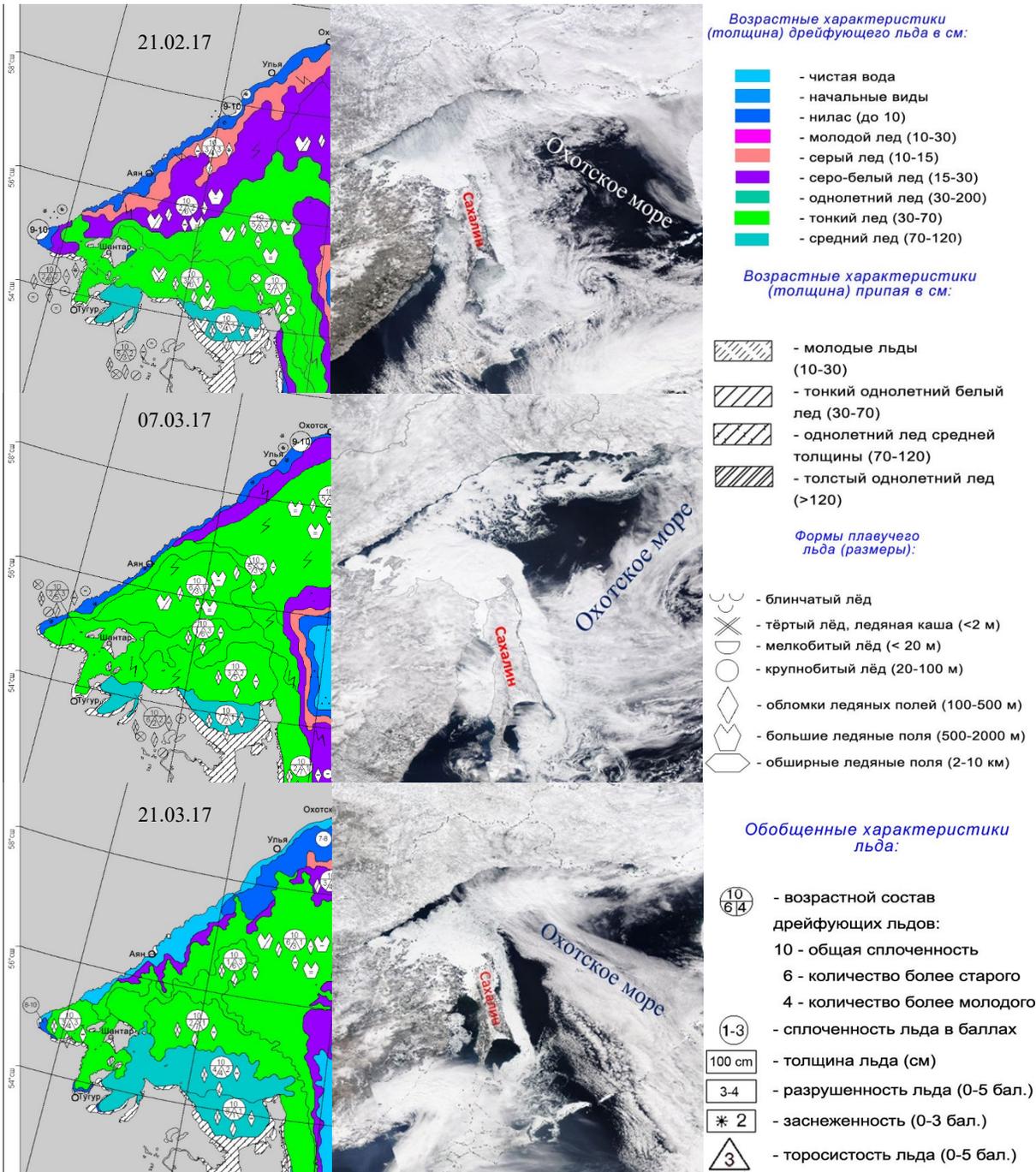


Рис. 10. Карты вида ледяного покрова на поверхности моря (НИЦ «Планета», <http://planet.iitp.ru>) (слева) и оптические снимки Охотского моря (по центру) и символы с описанием для карт ледяного покрова (справа)

# Сплоченность ледяного покрова в выбранной области.

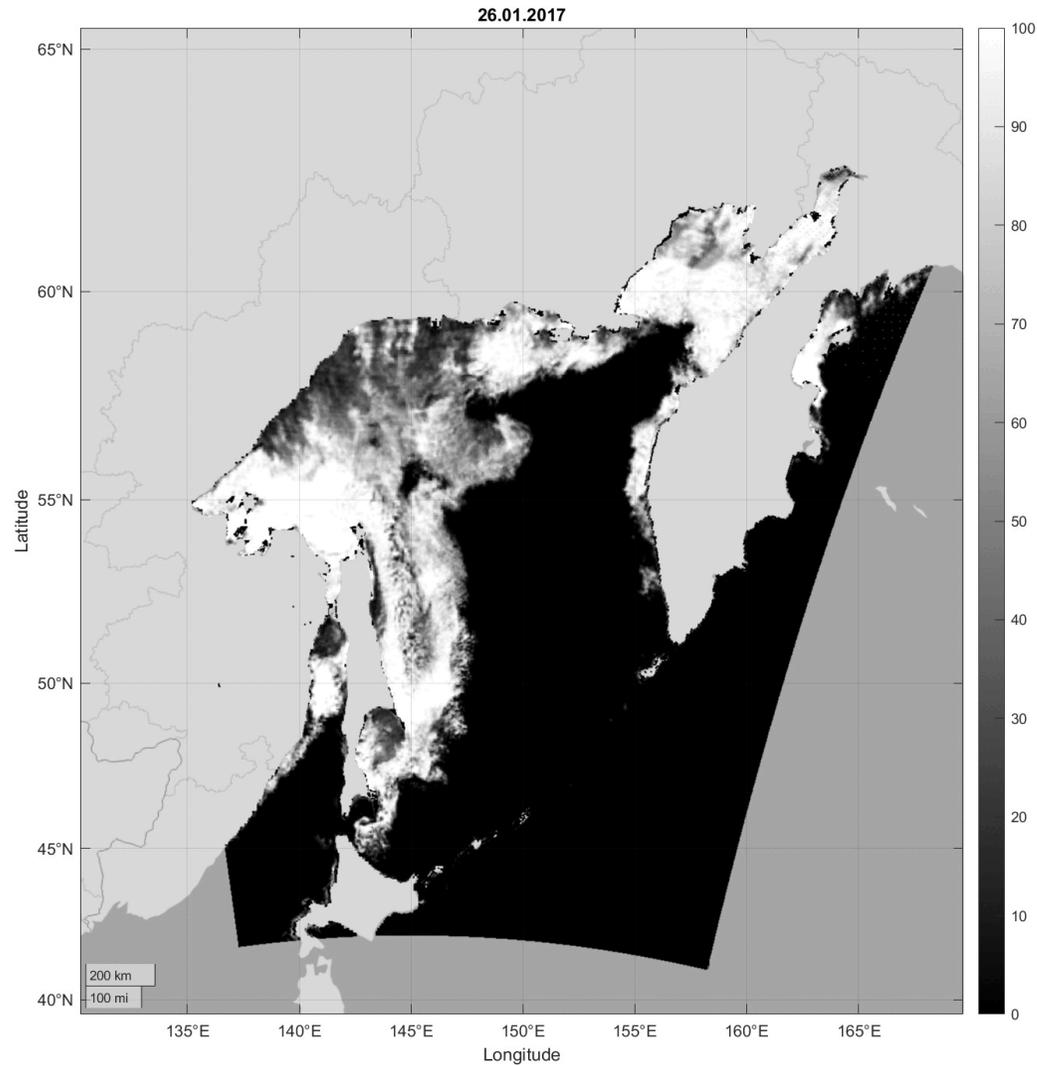


Рис. 11. Сплоченность ледяного покрова в Охотском море с января по апрель 2017 года.

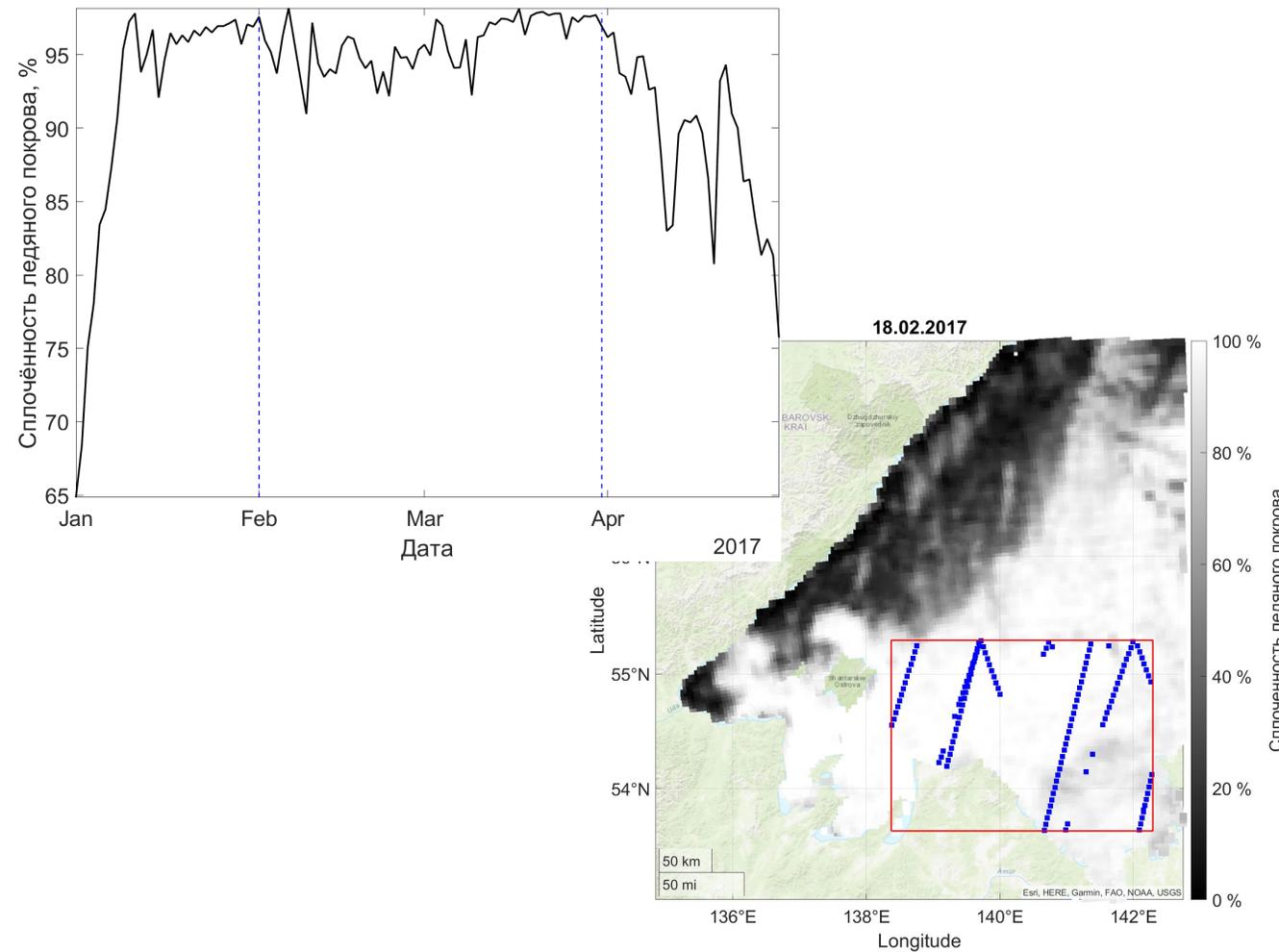


Рис. 12. Средняя сплоченность ледяного покрова в выбранной области, 0% - чистая вода, 100% - сплошной лёд

# DDM в выбранной области, частный случай.

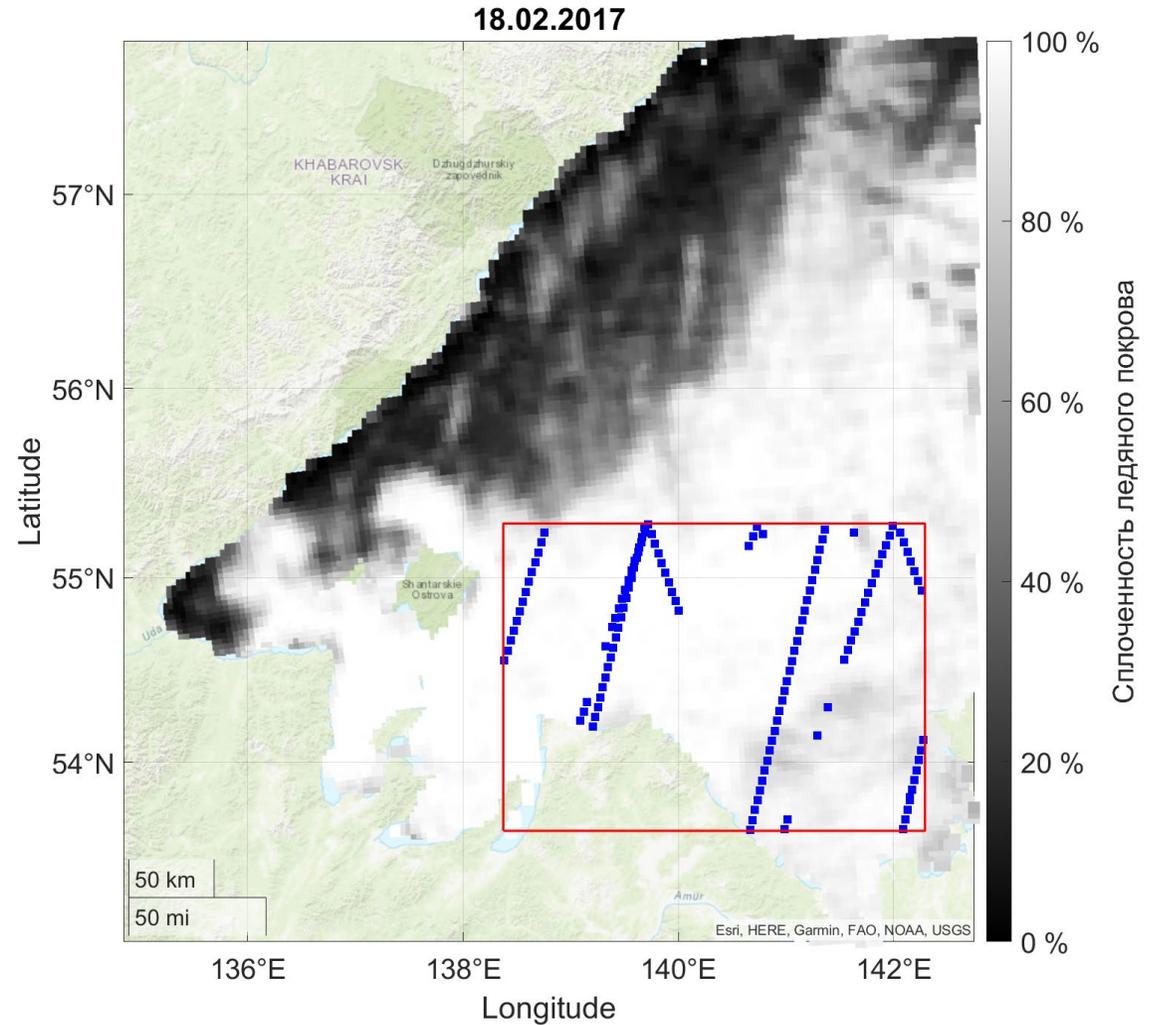
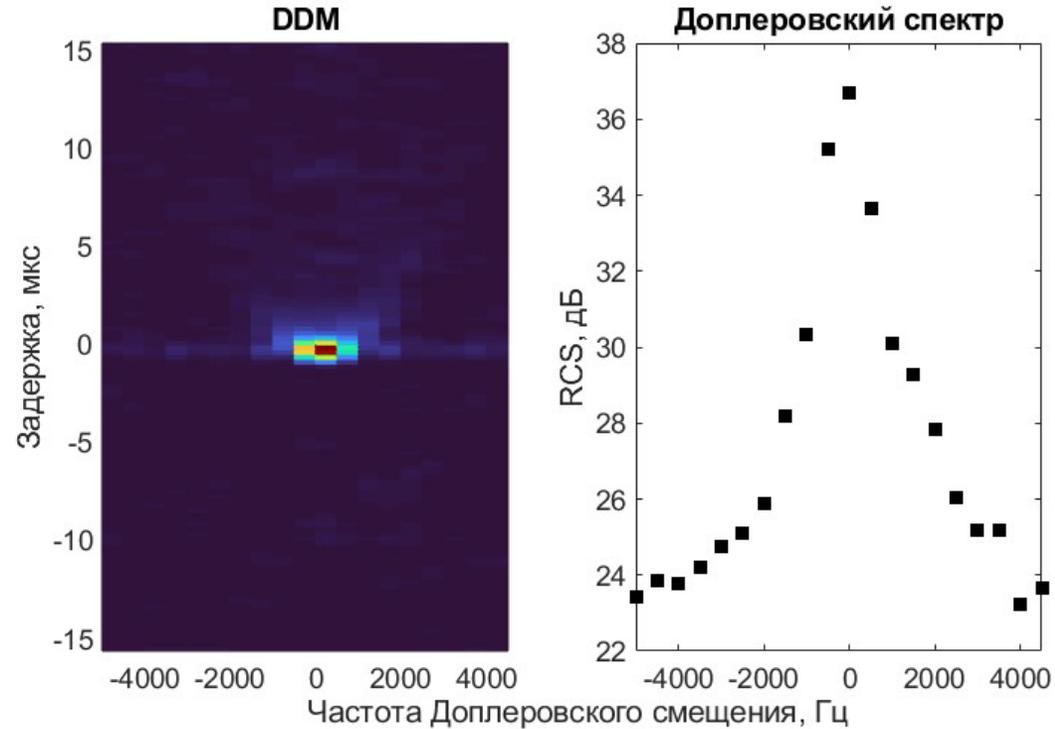


Рис. 13. Пример DDM и доплеровского спектра в рассматриваемой области (слева). Карта сплоченности ледяного покрова 18.02.17 с нанесёнными на неё точками зеркального отражения с февраля по март которые попали в выбранную область для анализа (справа).

# Изображения GPM в Ku и Ka диапазонах над Охотским морем 13.03.17.

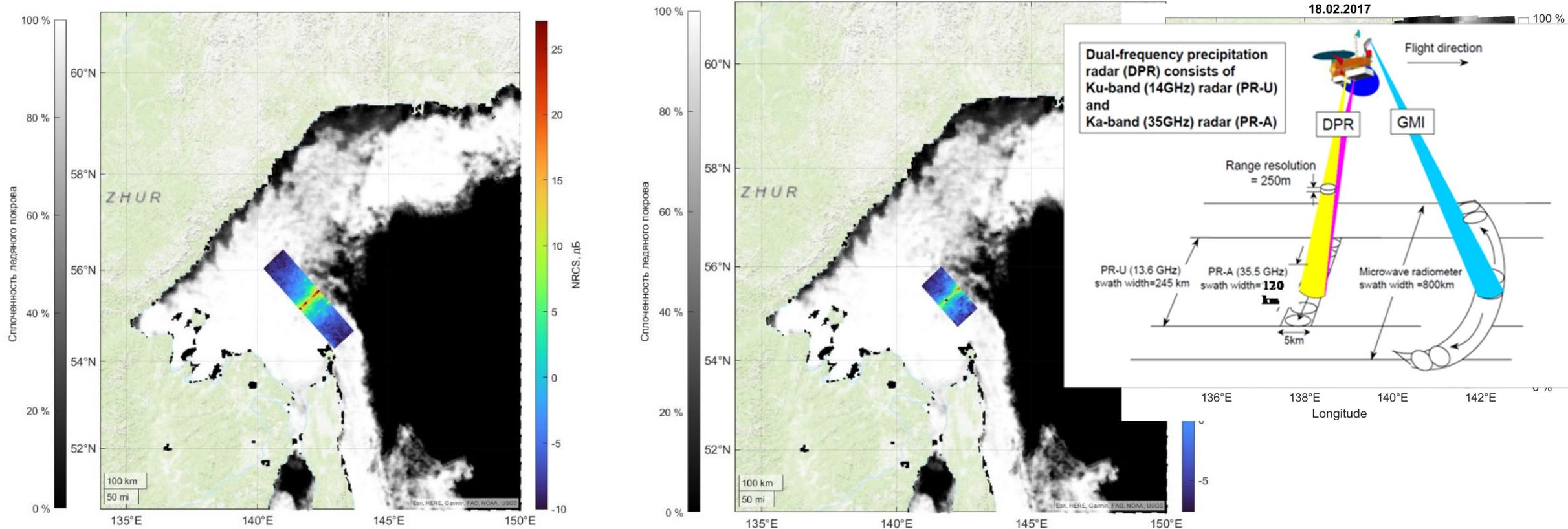


Рис. 14. Карта сплоченности ледяного покрова от 13.03.17 с нанесённой частью трека DPR в Ku диапазоне (слева) и Ka диапазоне (справа).

## Эмпирическая модель рассеяния в L диапазоне.

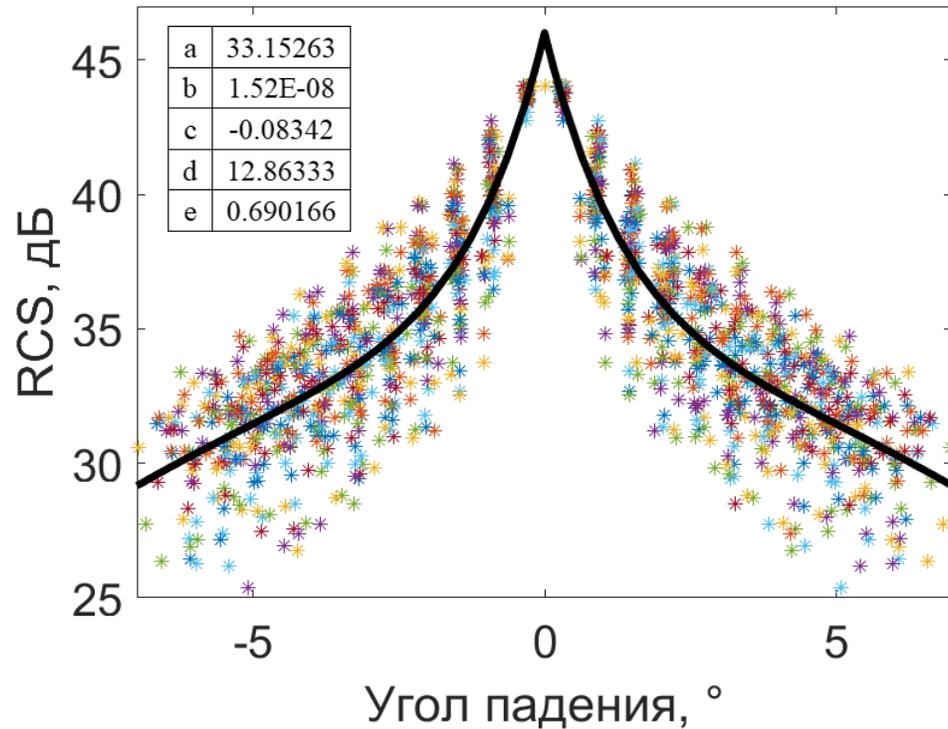


Рис. 15. Диаграмма рассеяния морского ледяного покрова (точками) в L диапазоне и аппроксимация (черная кривая), коэффициенты аппроксимации указаны на рисунке в таблице.

При работе с данным двухчастотного радиолокатора (DPR), установленного на спутнике миссии GPM, была предложена модель для описания зависимости нормированного сечения обратного рассеяния отражающей поверхности (NRCS) от угла падения (Karaev et al., 2022). Для сравнения диаграмм рассеяния в L диапазоне с диаграммами в Ku и Ka диапазонах воспользуемся данной моделью:

$$F(\theta) = a + b \cdot \theta + c \cdot \theta^2 + d \cdot \exp(-e|\theta|)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  – коэффициенты, которые подбираются и  $\theta$  – угол падения.

## Метод малых возмущение в L и Ku диапазонах.

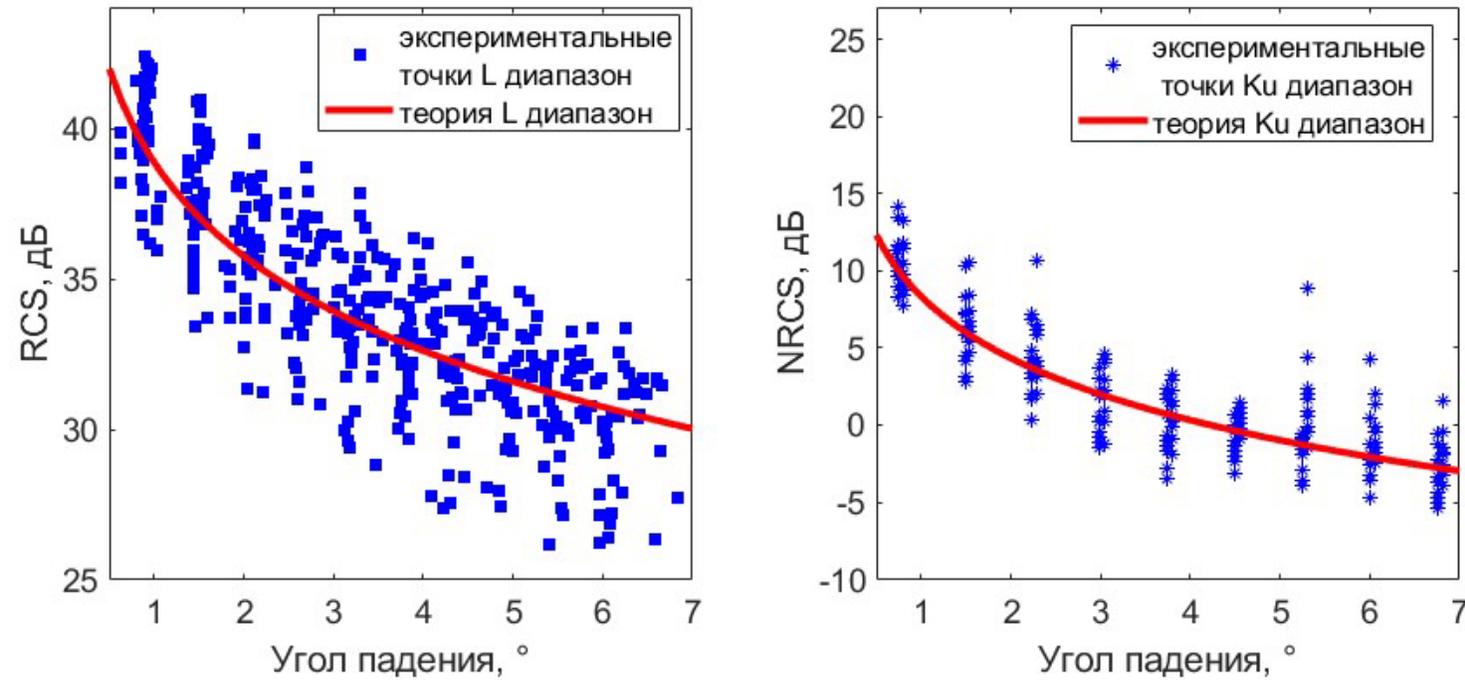


Рис. 16. Диаграмма рассеяния ледяного покрова (синими точками) и теоретическая зависимость (красная кривая) в L диапазоне (слева) и Ku диапазоне (справа).

Зависимость NRCS от угла падения использовалась ранее для проверки различных теоретических моделей рассеяния СВЧ сигнала ледяным покровом (Караев и др., 2021). Результаты показали, что наиболее удачная теория, описывающая рассеяние ледяным покровом, может быть получена в рамках метода малых возмущений и выражается следующим уравнением:

$$\sigma_0 = 4\pi k^4 \cdot \cos^4 \theta \cdot |F_{pp}(\varepsilon, \theta)|^2 S_{eff}(\kappa_{br})$$

где  $\kappa_{br} = 2k \cdot \sin(\theta)$ ;  $F_{pp}(\varepsilon, \theta)$  — коэффициент отражения, полученный в рамках метода возмущений (Басс, Фукс, 1972, Исимару, 1981). Когда спектры эффективных шероховатостей задаются в виде (Боев и др., 2007):

$$S_{eff}(\kappa_{br}) = A / (2k \cdot \sin\theta)^n$$

Коэффициенты  $A$  и  $n$  подбирались для NRCS в Ku диапазоне, наиболее удачной получилась теория с показателем  $n = 1.3$ . Для диаграммы рассеяния в L диапазоне аналогичная теоретическая аппроксимация приведена с показателем  $n = 1.03$ .

# Сравнение характеристик рассеяния в L, Ka и Ku диапазонах.

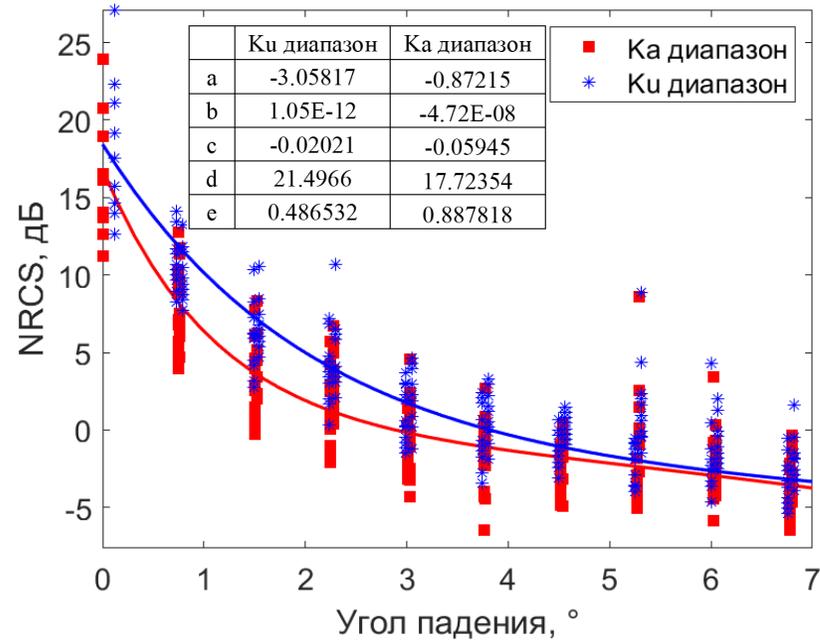
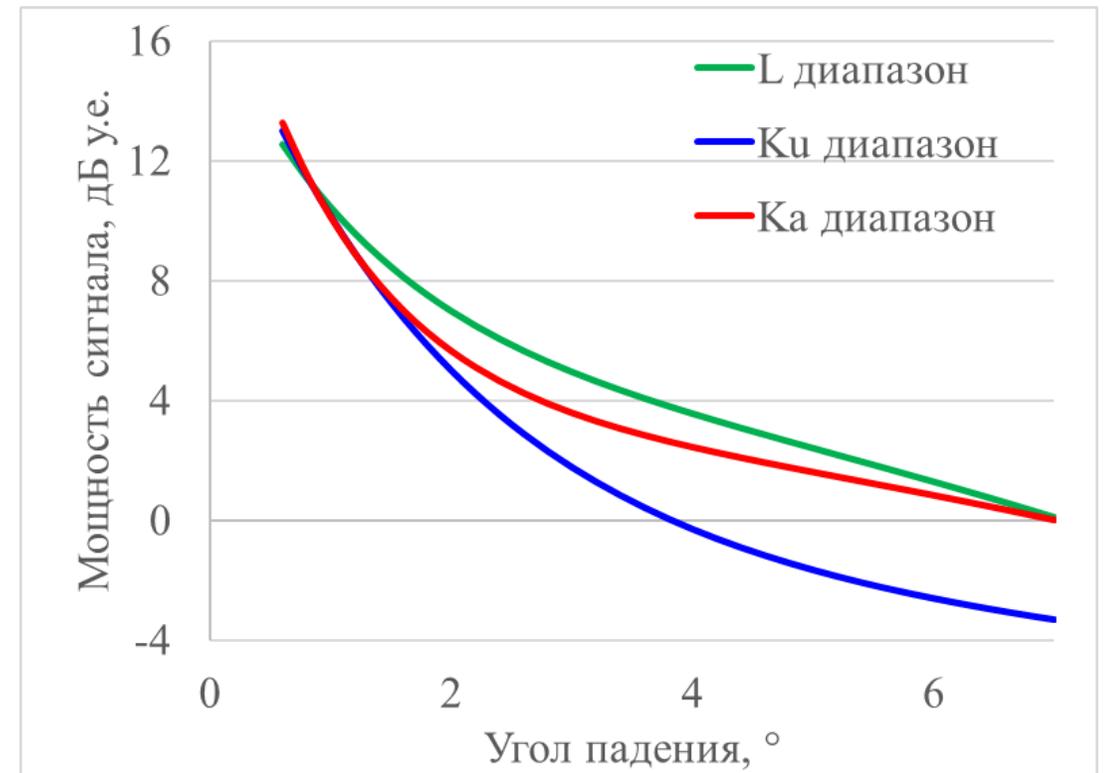


Рис. 17. Экспериментальные точки и аппроксимация данных DPR в Ka и Ku диапазонах (сверху) и сравнение аппроксимаций в L, Ku и Ka диапазонах, приведённых к одному значению при 1° угла падения (справа).



Для полноценного сравнения данных DPR в Ku и Ka диапазонах с диаграммами рассеяния в L диапазоне были выбраны несколько записей вдоль трека над охотским морем 13 марта 2017 года. Зависимости NRCS от угла падения для выбранных треков с построенной аппроксимацией и таблицами подобранных коэффициентов на рис. 17 сверху. Для сравнения характера спада зависимости кривые аппроксимаций в L, Ku и Ka диапазонах совместили при угле падения 1°.

# Изображения GPM в Ku и Ka диапазонах над Ладожским озером 10.02.18.

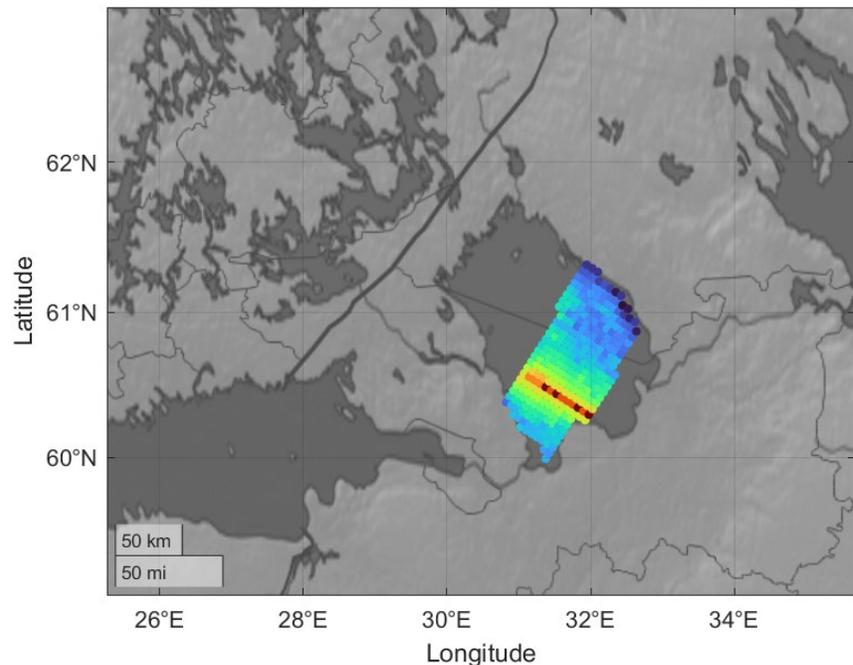


Рис. 18. Треки DPR в Ku диапазоне (слева) и Ka диапазоне (справа) над Ладожским озером.

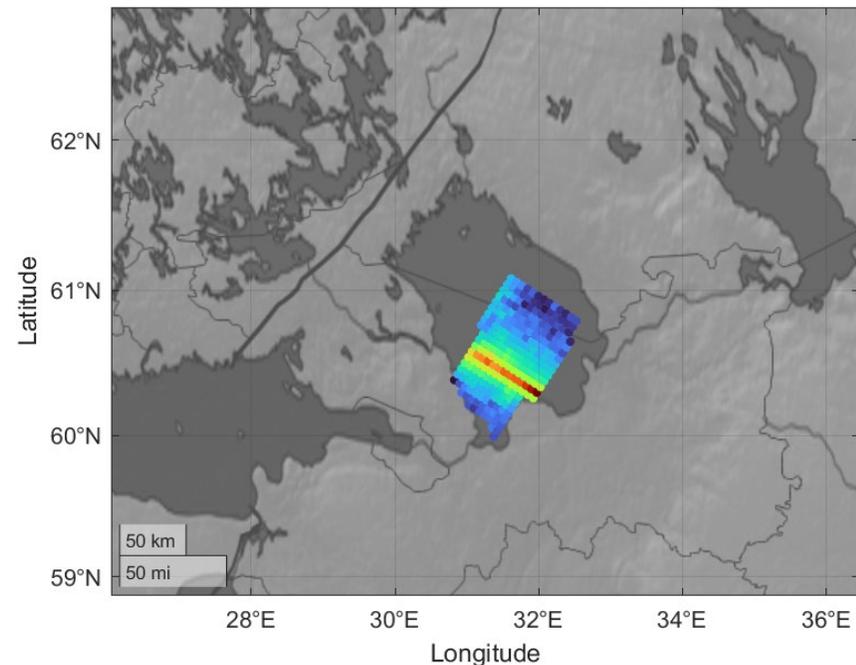
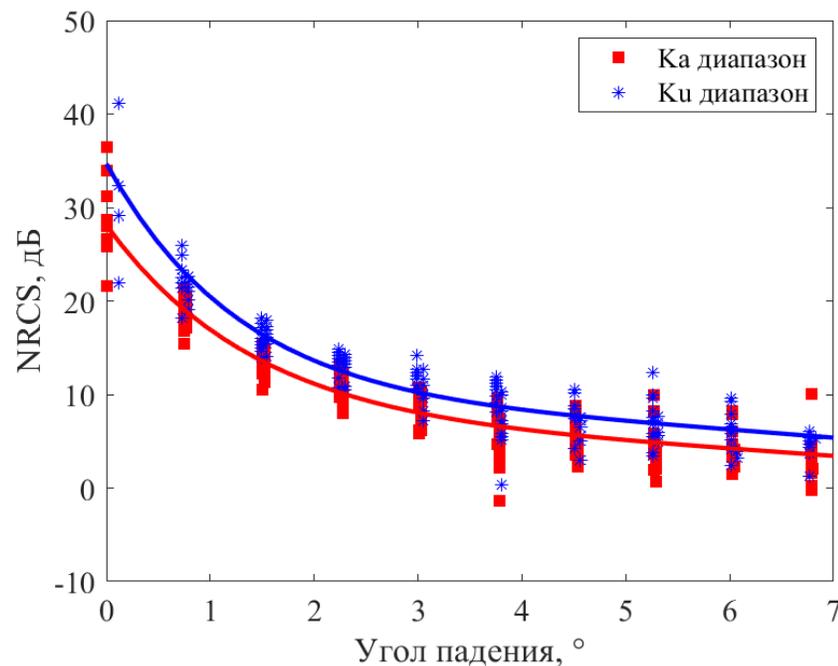


Рис. 19. Экспериментальные точки и аппроксимация данных DPR в Ka и Ku диапазонах.



	Ku диапазон	Ka диапазон
a	8.006438817	5.572023093
b	5.03E-10	-7.58E-09
c	-0.05632244	-0.04754582
d	26.67013741	22.54208472
e	0.759387453	0.681773576

# Сравнение характеристик рассеяния в L диапазоне озерного и морского ледяных покровов.

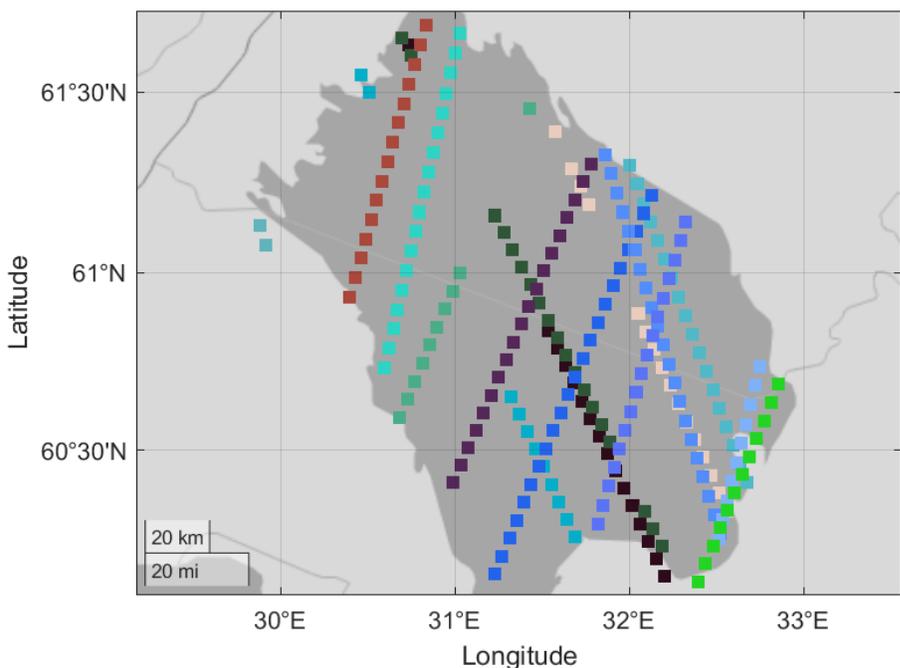


Рис. 20. Карта Ладожского озера с нанесёнными на неё точками зеркального отражения за февраль 2018 года (слева) и Диаграмма рассеяния морского ледяного покрова (точками) в L диапазоне и аппроксимация (красная кривая), коэффициенты аппроксимации указаны на рисунке в таблице (справа).

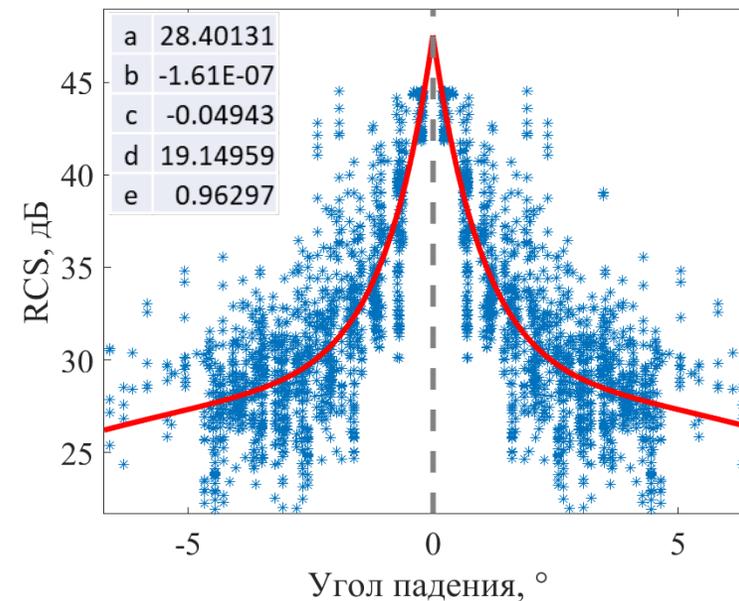
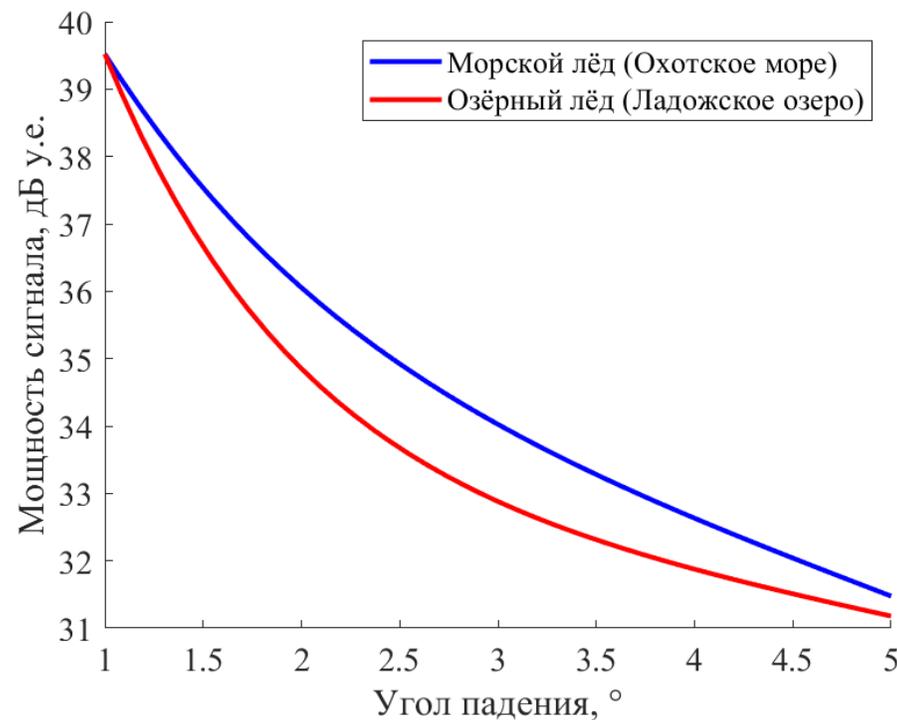


Рис. 21. Сравнение аппроксимаций в L диапазоне для морского и озёрного ледяных покровов, приведённых к одному значению при 1° угла падения.



# Выводы

Предложен **оригинальный** метод позволяющий измерять характеристики отражения ледяным покровом в L-диапазоне.

Для L-диапазона шероховатость поверхности будет меньше чем в Ka и Ku диапазонах, однако диаграмма рассеяния спадает медленнее. Предполагается, что это связано с влиянием объёмного рассеяния.

Диаграмма рассеяния для пресноводного ледяного покрова в L диапазоне спадает медленнее, чем для морского ледяного покрова. Возможно это связано с ослаблением влияния объёмного рассеяния в пресноводном ледяном покрове.

На основе эмпирических данных **впервые** предложена аппроксимация в L диапазоне для квазизеркальной области отражения, которая может быть использована для проверки теоретических моделей отражения ледяным покровом и создания новых моделей.

Такая модель необходима для моделирования характеристик отраженных сигналов существующих и перспективных радиолокаторов, в том числе и спутникового базирования

Так как L диапазон чувствителен к солености и температуре, возможно необходимо создавать региональные модели ледяного покрова