



Сравнительный анализ возможностей дождевого радиолокатора спутника GPM и спектрометра SWIM при решении задачи мониторинга ледяного покрова на примере Охотского моря

**В.Караев , М.Панфилова, Ю.Титченко, М.Рябкова,
Е.Мешков, Л.Митник, С.Ковалев***

ИПФ РАН, Нижний Новгород

** ААНИИ, Санкт-Петербург*

Введение

Данные орбитальных радиолокаторов применяются для решения задач дистанционного зондирования морской поверхности и получения информации о поле приводного ветра, параметрах волнения и ледяном покрове.

Наиболее известными радиолокаторами, установленными на спутниках, являются скаттерометр, радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) и радиовысотометр. Для оценки эффективности мониторинга ледяного покрова используются данные в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.



Снимок MODIS

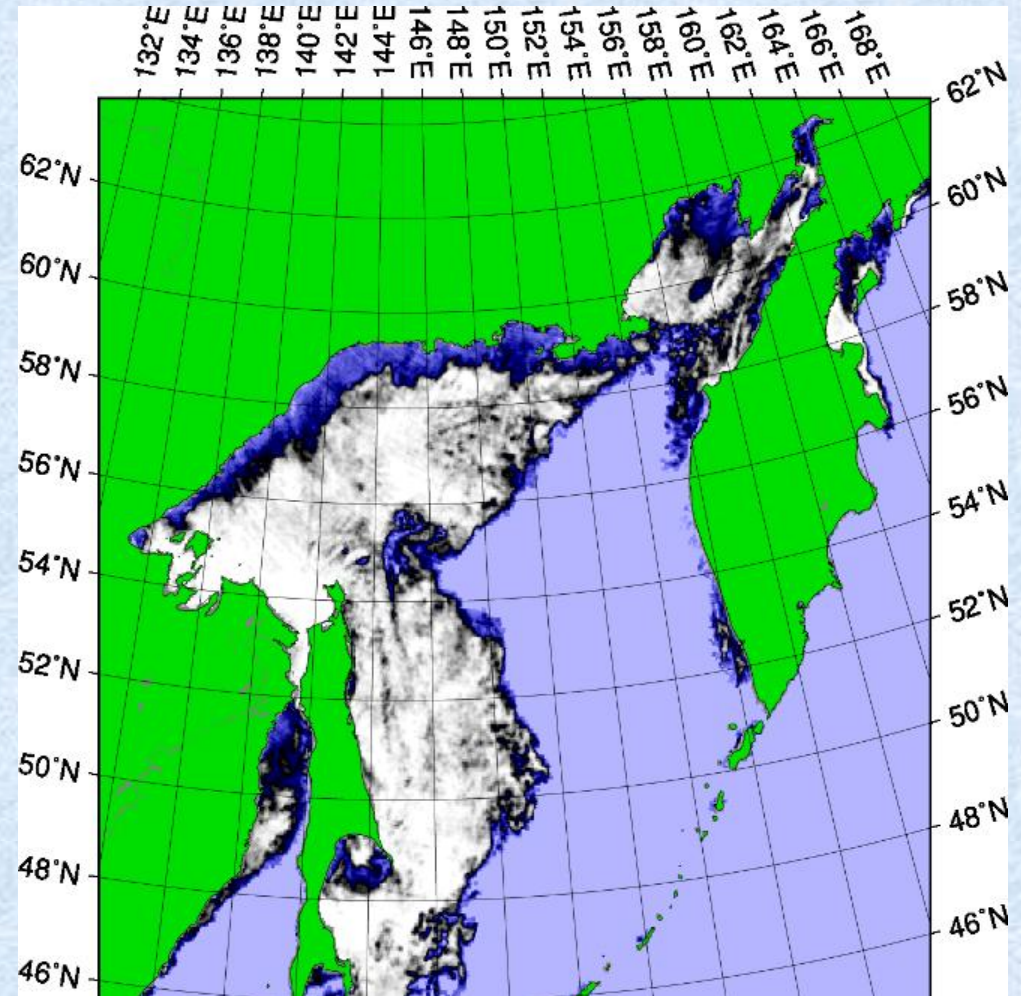
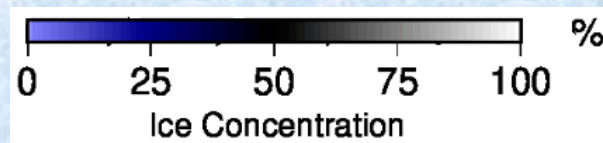


РСА изображение Sentinel-1

Введение

Регулярная информация о состоянии ледяного покрова с низким разрешением (от нескольких километров) может быть получена микроволновыми радиометрами. Разработанные алгоритмы позволяют определять сплоченность ледяного покрова.

На рисунке показан пример ежедневной карты сплоченности ледяного покрова, формируемой университетом Бремен.



Сплоченность ледяного покрова по данным AMSR2 (данные университета Бремен, 16.02.2020)

Введение

При малых углах падения механизм обратного рассеяния является квазизеркальным и отраженное поле вычисляется в приближении метода Кирхгофа.

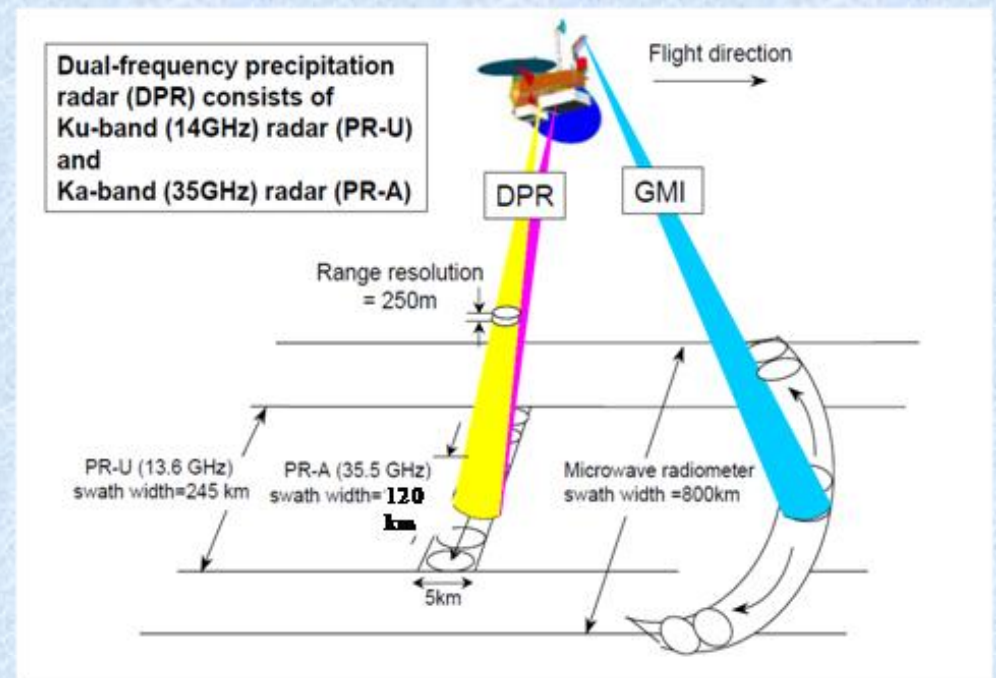
Измерения при малых углах падения выполняют дождевые радиолокаторы, установленные на спутниках TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) и GPM (Global Precipitation Measurement). Наклонение орбиты последнего спутника составляет 65 градусов и в полосу обзора попадают территории с долговременным снежным и ледяным покровом, в частности, Охотское море. Измерения выполняются при малых углах падения: 0-19 градусов. Были разработаны алгоритмы классификации подстилающей поверхности по критерию «лед-вода» [1, 2].

1. Караев В.Ю., Панфилова М.А., Митник Л.М., Рябкова М.С., Титченко Ю.А., Мешков Е.М., Андреева З.В., Волгутов Р.В. Особенности радиолокационного зондирования ледяного покрова при малых углах падения на примере Охотского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. т. 17. № 7. С. 187-202.
2. Караев В.Ю., Панфилова М.А., Митник Л.М., Титченко Ю.А., Мешков Е.М., Андреева З.В., Волгутов Р.В. К вопросу об обратном рассеянии электромагнитных волн СВЧ-диапазона ледяным покровом в Охотском море при малых углах падения на примере данных дождевого радиолокатора // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”, Москва: ИКИ РАН, 2020. С. 212. DOI 10.21046/18DZZconf-2020a

Двухчастотный дождевой радиолокатор (DPR)

DPR установлен на спутнике GPM (Global Precipitation Measurement), выведенном на орбиту JAXA в 2014 году. Радиолокатор предназначен для измерения вертикального профиля осадков в полосе обзора шириной ≈ 240 км в Ku-диапазоне (длина волны $\lambda = 2,2$ см) и ≈ 125 км в Ka-диапазоне, $\lambda = 0,8$ см с пространственным разрешением ≈ 5 км. Углы падения меняются в пределах $\pm 18,3^\circ$ в Ku- и в $\pm 9,1^\circ$ в Ka-диапазоне. Последний отсчет по дальности относится к отражению от поверхности и измеряется сечение обратного рассеяния.

Кроме того, на спутнике установлен многочастотный радиометр GMI, имеющий полосу обзора около 900 км. По данным радиометра можно определять сплоченность ледяного покрова и использовать эту информацию для валидации и верификации радиолокационного канала.



Спектрометр (wave scatterometer) SWIM

Разработка новых радиолокационных систем продолжается и в конце 2018 на орбиту был выведен Китайско-французской спутник CFOSAT (Chinese-French Oceanic SATellite). На его борту установлен французский спектрометр (wave scatterometer) SWIM (Surface Waves Investigation and Monitoring instrument) и китайский скаттерометр RFSCAT.

Особенностью схемы измерения SWIM (Ku-диапазон) является то, что измерения выполняются при малых углах падения ($< 11^\circ$) и впервые при таких углах падения сечение обратного рассеяния измеряется под разными азимутальными углами.

Для ледяного покрова схема измерения SWIM дает дополнительный критерий для классификации «лед-вода» по азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния, которая для льда, в отличие от морской поверхности, практически отсутствует.

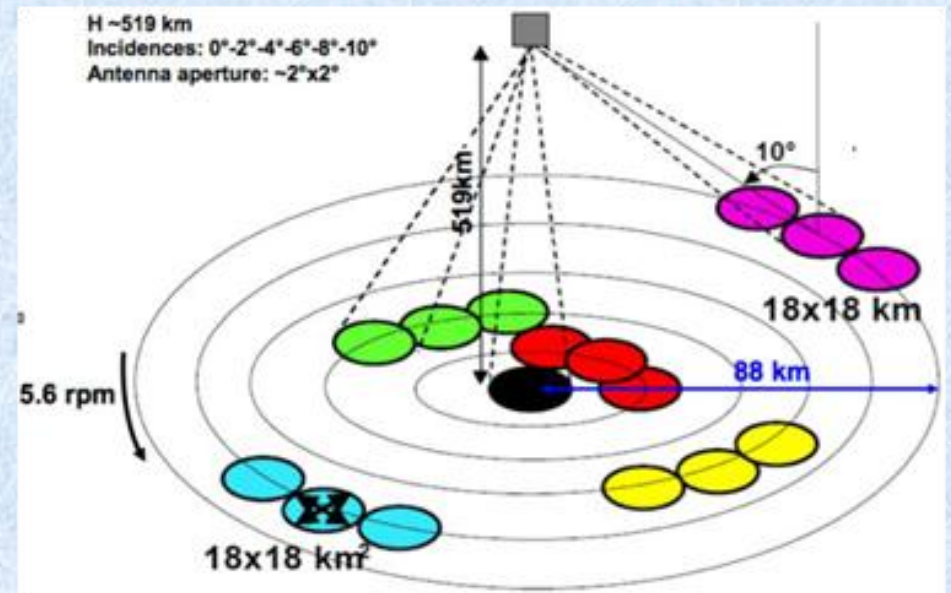
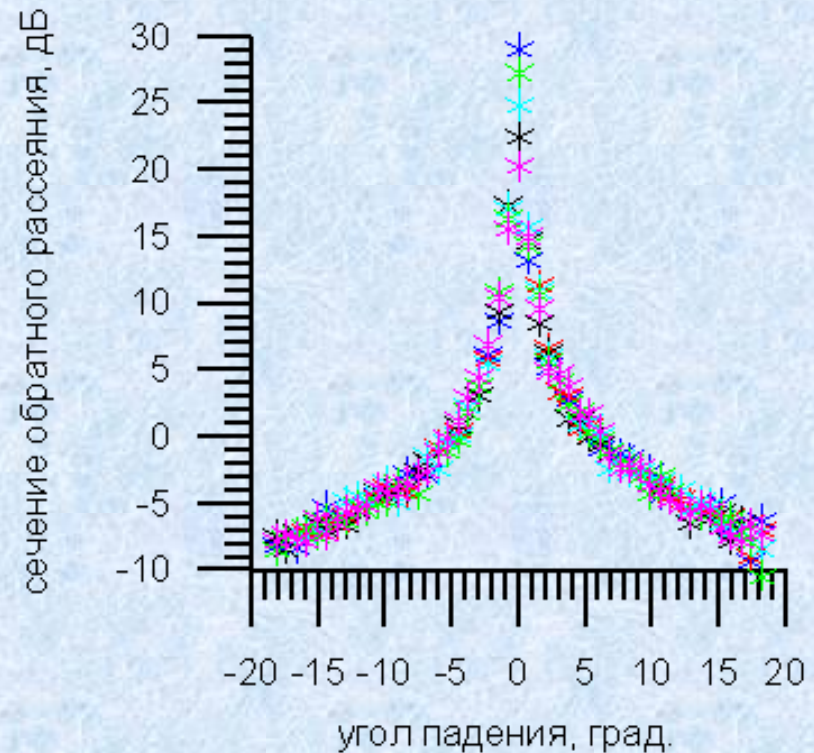
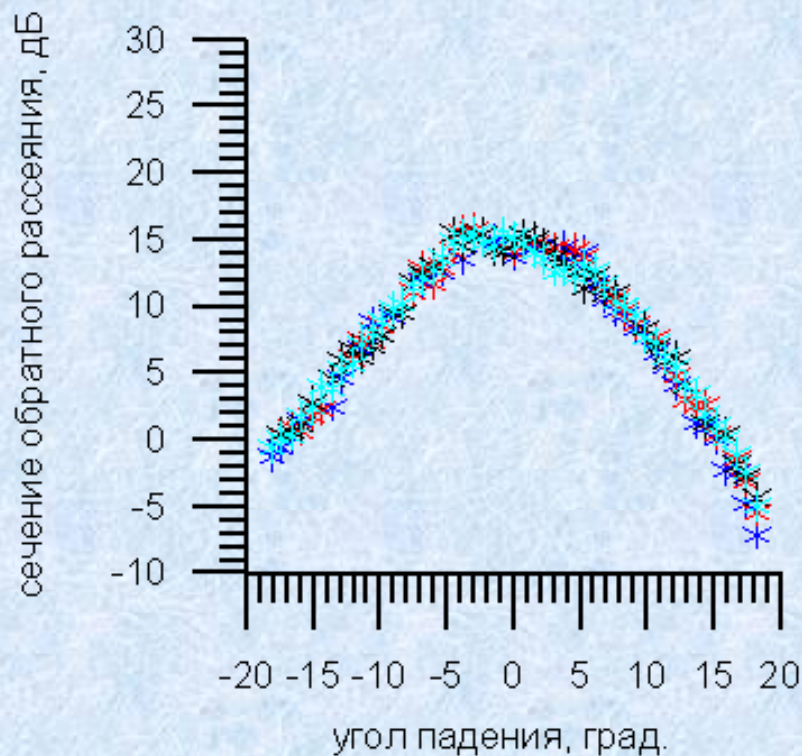


Схема измерения SWIM

Обратное рассеяние при малых углах падения

На рисунке приведены типичные зависимости сечения обратного рассеяния в Ки-диапазоне от угла падения для водной поверхности (слева) и сплошного ледяного покрова при отрицательной температуре воздуха (справа) по данным DPR. Звездочками разного цвета показаны сечения обратного рассеяния для нескольких последовательных сканов. Расстояние между сканами ≈ 5 км, что примерно равно размеру рассеивающей площадки.



Характерный вид зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения для водной поверхности (слева) и ледяного покрова (справа) в Ки-диапазоне.

Обратное рассеяние при малых углах падения

Двухчастотный дождевой радиолокатор обладает рядом преимуществ по сравнению со SWIM, если рассматривать зондирование ледяного покрова, где практически отсутствует азимутальная зависимость сечения обратного рассеяния.

1. Лучшее пространственное разрешение: 5x5 км у DPR и 18x18 км (или 4,5x18км) у SWIM.
2. Шире полоса обзора: 245 км у DPR и 180 км у SWIM.
3. DPR измеряет осадки, что позволяет исключить эти области из обработки.
4. На спутнике GPM установлен многочастотный радиометр, что дает дополнительную информацию о типе подстилающей поверхности.

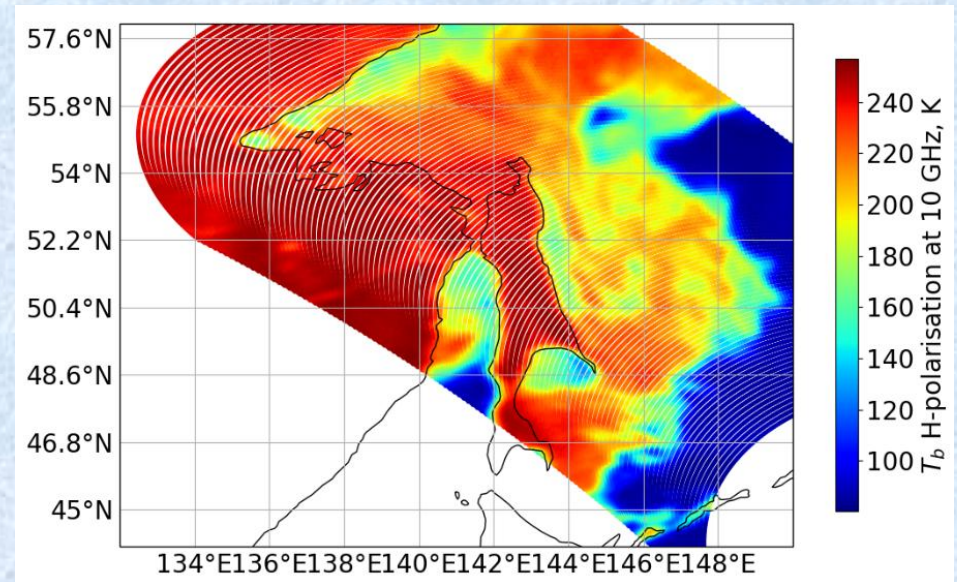
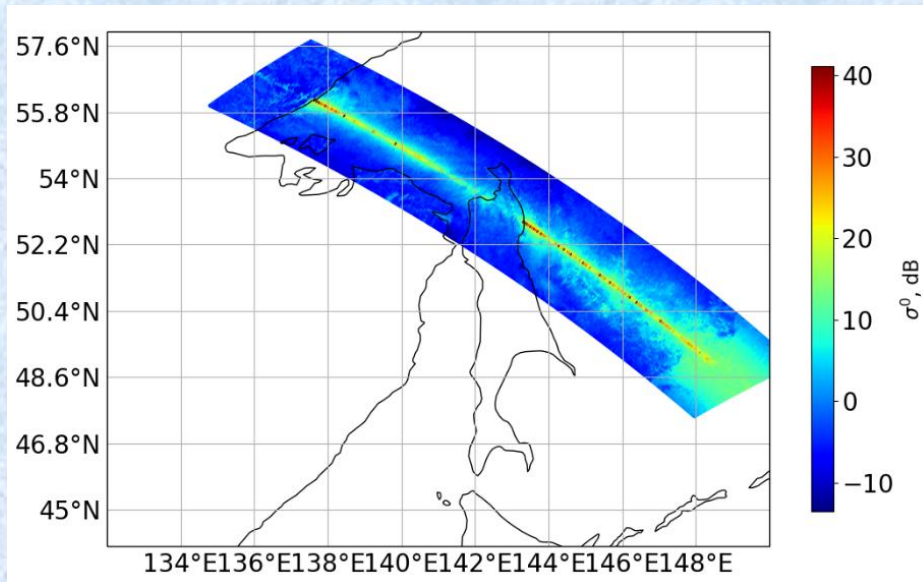
Преимуществом SWIM является полярная орбита спутника CFOSAT (наклонение 97°), в то время как у спутника GPM наклонение орбиты всего 65° .

Таким образом, для SWIM доступна вся Арктика и Антарктика.

Охотское море

В результате ограничений DPR, связанных с его орбитой, для сравнения было выбрано Охотское море в период максимальной площади ледяного покрова. В данном исследовании анализируются измерения в феврале 2020.

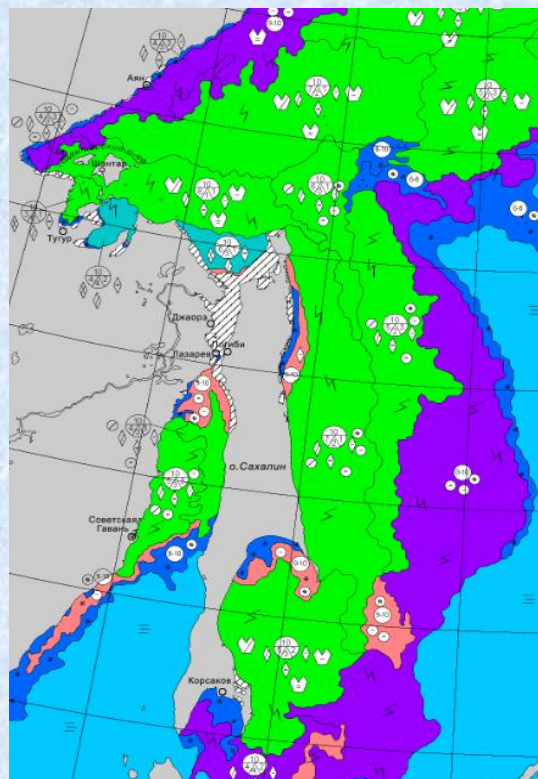
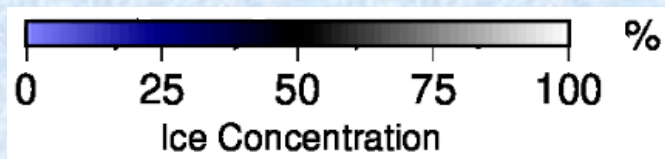
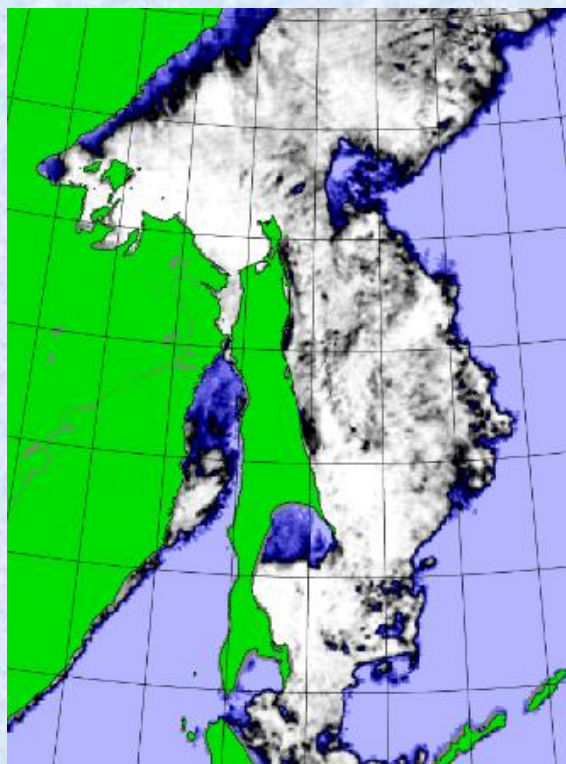
На рисунке приведены радиолокационное изображение дождевого радиолокатора (Ku-диапазон) и радиояркостное изображение радиометра GMI (10 ГГц, H-pol) спутника GPM.



Радиолокационное изображение DPR (слева) и поле радиояркостных температур (справа), полученные 18 февраля 2020.

Охотское море

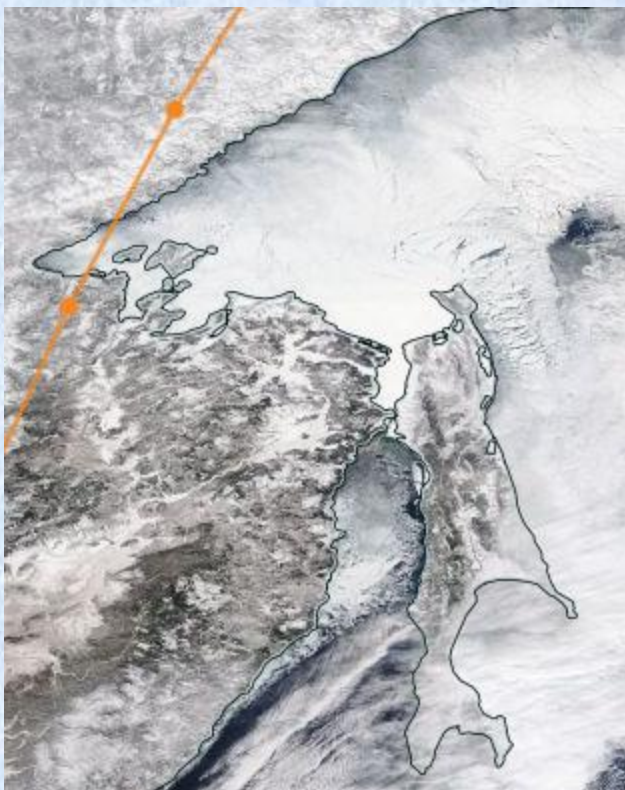
Независимую информацию о состоянии ледяного покрова можно найти на сайте университета Бремен. На рисунке слева приведена карта сплоченности ледяного покрова за 18 февраля 2020. На рисунке справа приведена карта-схема ледовой обстановки, формируемая НИЦ Планета.



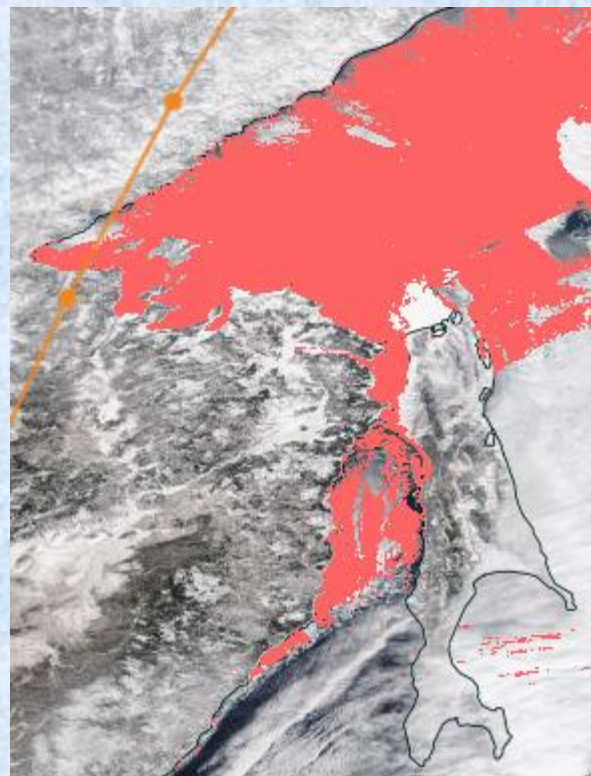
- чистая вода
- начальные виды
- нилас (до 10)
- молодой лед (10-30)
- серый лед (10-15)
- серо-белый лед (15-30)
- однолетний лед (30-200)
- тонкий лед (30-70)
- средний лед (70-120)

Охотское море

В феврале устанавливается низкая среднесуточная температура, что способствует увеличению толщины ледяного покрова. Снежный покров остается сухим.



а

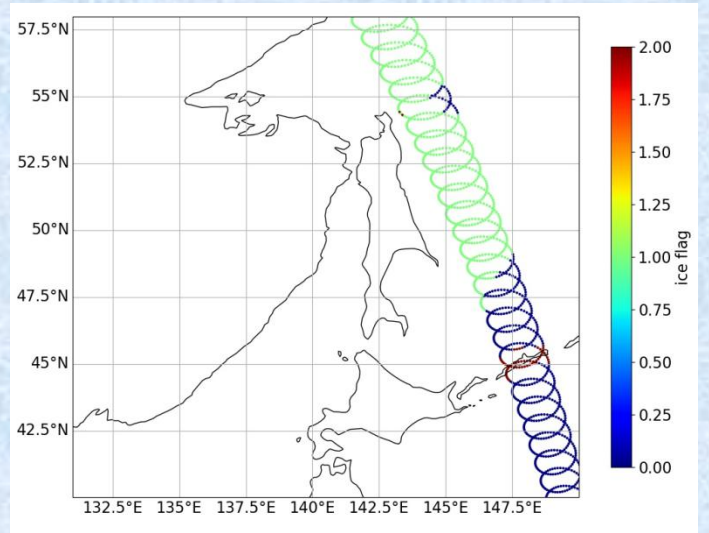
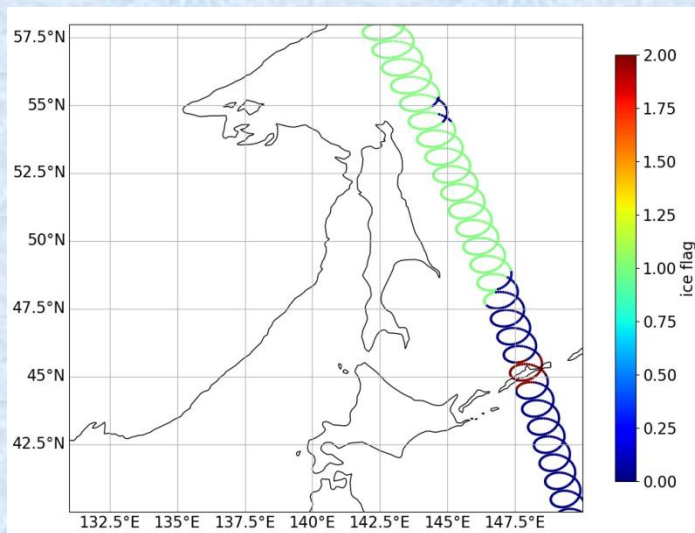
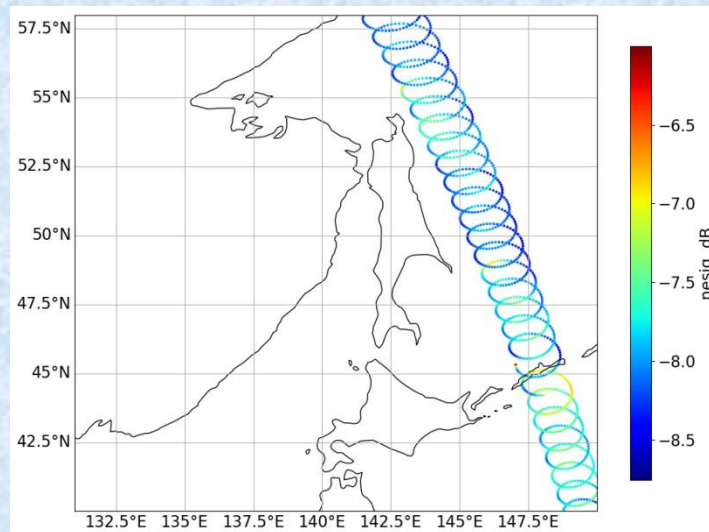
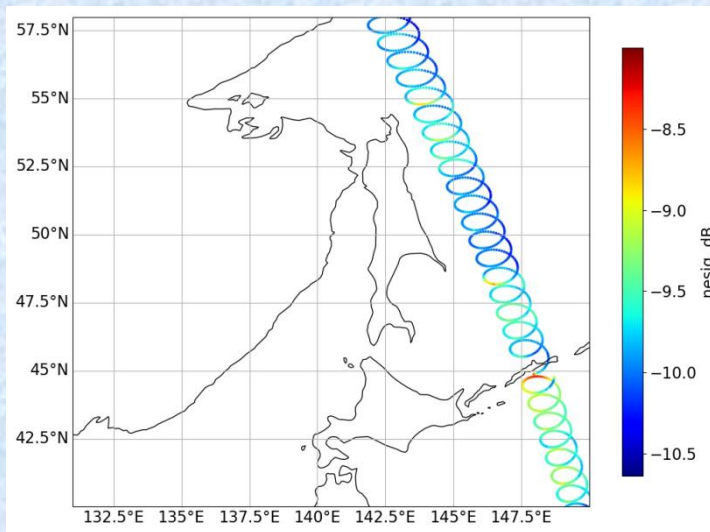


б

Карта ледяного покрова в Охотском море: а) на изображении MODIS 18 февраля 2020 02:10 UTC б) красным цветом показана область льда.

Охотское море

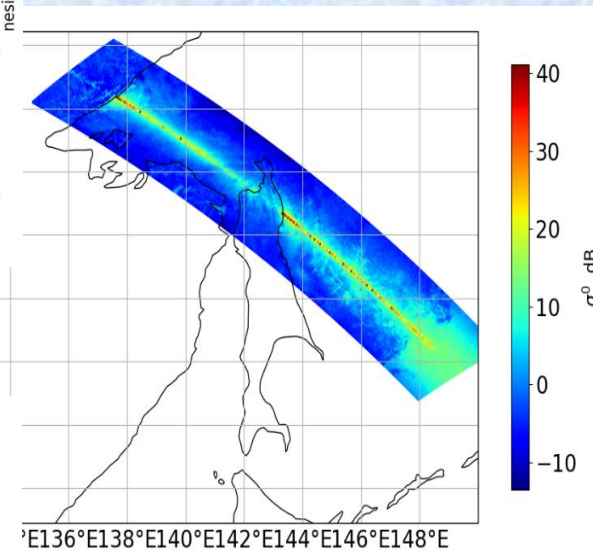
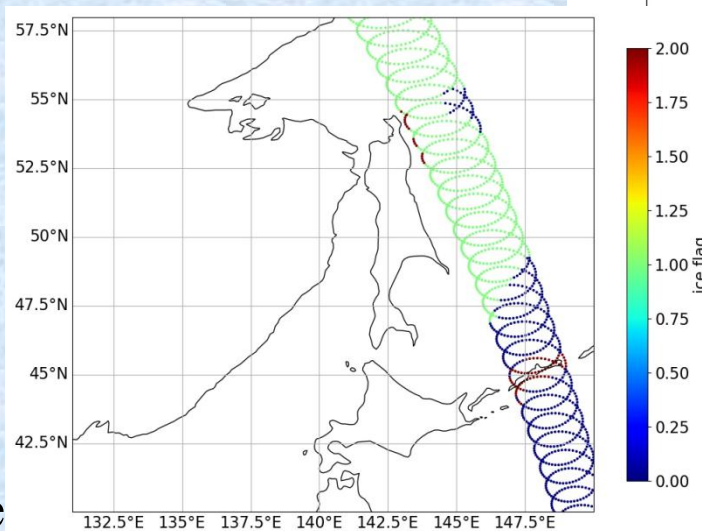
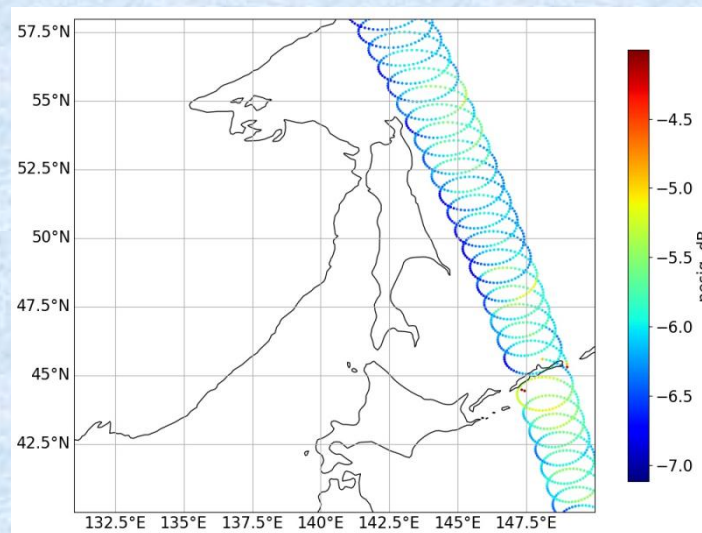
На рисунке приведены данные SWIM для углов падения 6° (левый столбец) и 8° (правый столбец). Верхние рисунки показывают сечение обратного рассеяния, а нижние являются индикатором льда («flag_ice») на основе модели “ECMWF ice concentrations”.



Охотское море

На рисунке приведены данные SWIM для угла падения 10° . Верхний рисунок показывает сечение обратного рассеяния, а нижний является индикатором льда («flag_ice») на основе модели “ECMWF ice concentrations”.

Видно, что для всех углов падения наблюдается хорошая корреляция сечения обратного рассеяния и ледяного покрова: сечение обратного рассеяния выше для открытой воды и меньше для ледяного покрова.



В области пересечения радиолокационного изображения DPR и данных SWIM наблюдается хорошая корреляция.

Выводы

Сравнение орбитальных радиолокаторов Ku-диапазона (DPR и SWIM), выполняющих измерения при малых углах падения, показало, что при мониторинге ледяного покрова дождевой радиолокатор превосходит SWIM по следующим параметрам: 1) ширине полосы обзора, 2) лучшему пространственному разрешению.

Дополнительное преимущество DPR связано с синхронным измерением осадков, что позволяет исключать эти области из обработки.

На спутнике GPM установлен многочастотный радиометр, что дает дополнительную информацию о типе подстилающей поверхности.

Благодаря наклонению орбиты спутника CFOSAT измерения SWIM охватывают Арктику и Антарктику, что позволит улучшить достоверность информации о площади ледяного покрова.

В ходе дальнейших исследований впервые будут исследованы свойства обратного рассеяния многолетнего арктического льда при малых углах падения.