



Сергей А. Лебедев



*Геофизический Центр РАН*



*Майкопский государственный  
технологический университет*



*Национальный исследовательский  
университет «МИЭТ»*

# ИССЛЕДОВАНИЕ МОРСКОГО ЛЬДА МЕТОДАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ



«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Морской лёд – как часть климатической системы



Одно из самых ярких проявлений происходящих изменений климата – стремительное сокращение арктических морских льдов в последние десятилетия. Арктический морской лёд не только служит индикатором

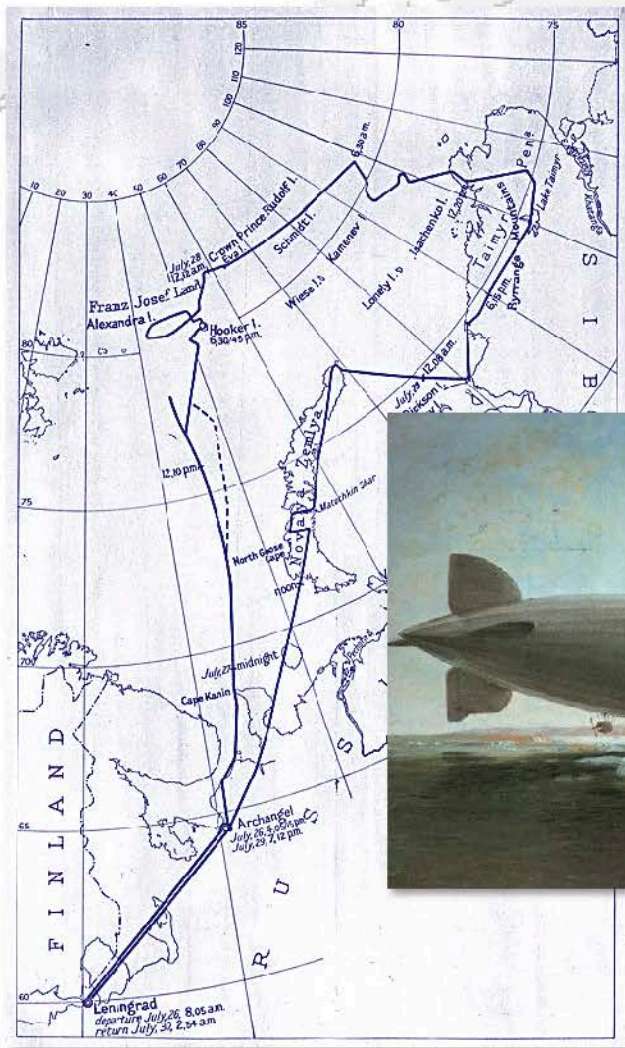
изменений климата, но и играет ключевую роль в важных обратных связях в земной климатической системе. Площадь и толщина ледяного покрова модулируют потоки тепла на границе океан–атмосфера и связаны с изменениями атмосферной, океанической циркуляции и радиационным балансом

«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев

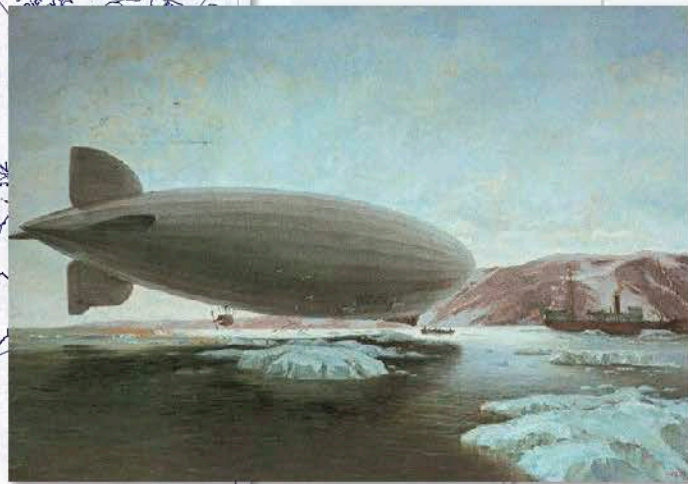


# Дистанционные измерения морского льда Аэрофотосъемка



Аэрофотосъемка – это фотографирование земной поверхности при помощи летательного аппарата, который тяжелее, чем воздух.

Первая аэрофотосъемка Арктики выполнена в 1931 г. с дирижабля «Граф Цепелин»



Дирижабль LZ-127  
«Граф Цепелин»



Ледник на Новой Земле



# Дистанционные измерения морского льда Ледовая авиационная разведка

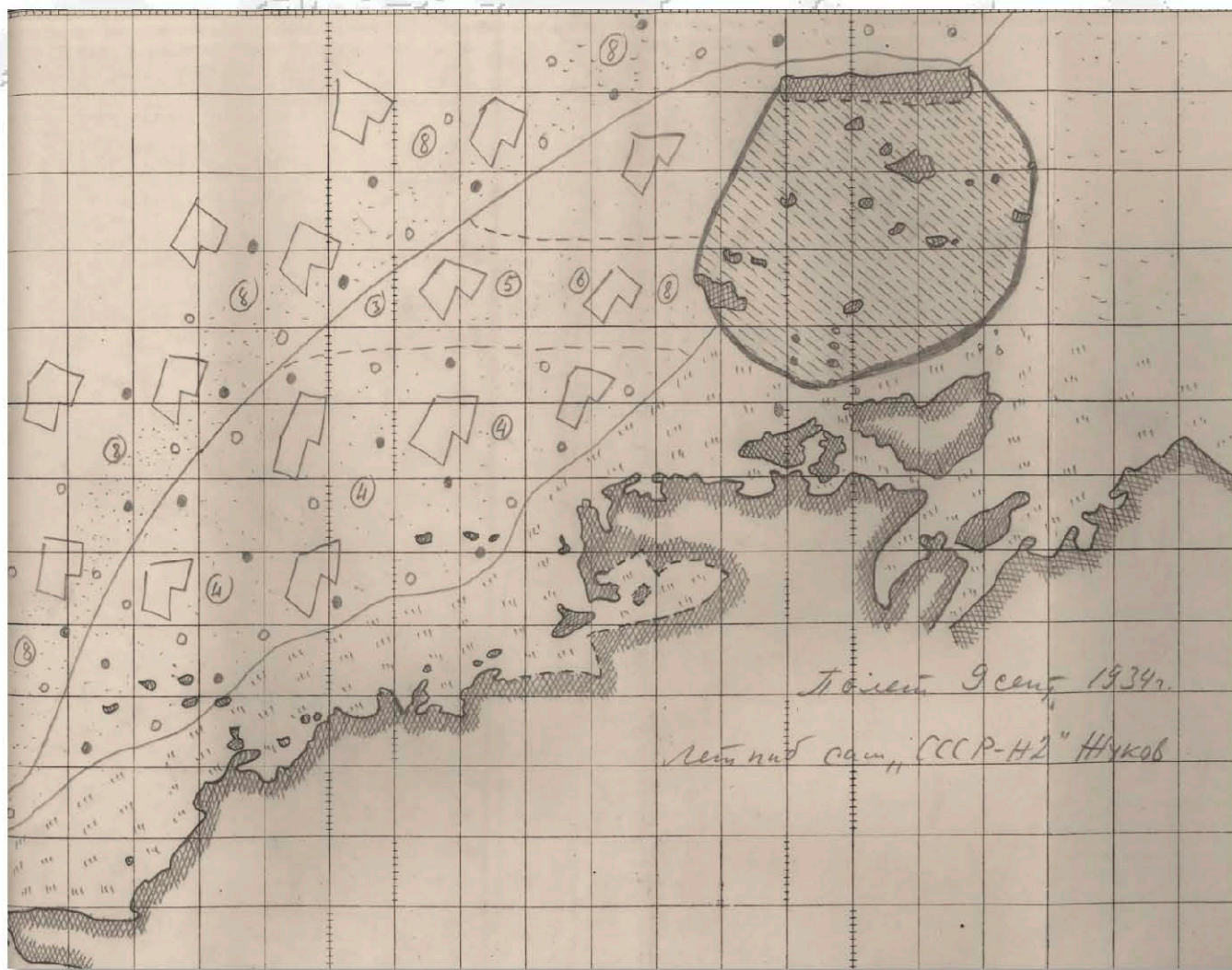
История ледового картирования берёт начало с середины 20-х годов XX века, когда начались эпизодические ледовые авиаразведки в Арктике. С 1929 г. полёты стали регулярными в Карском море, а с 1935 г. – в море Лаптевых. С 1938 г. пионерский период авиаразведки льдов закончился, и авиационные наблюдения стали выполняться регулярно по всей трассе Северного морского пути, и не только в навигационный период



*ИЛ-14 перед вылетом на разведку*



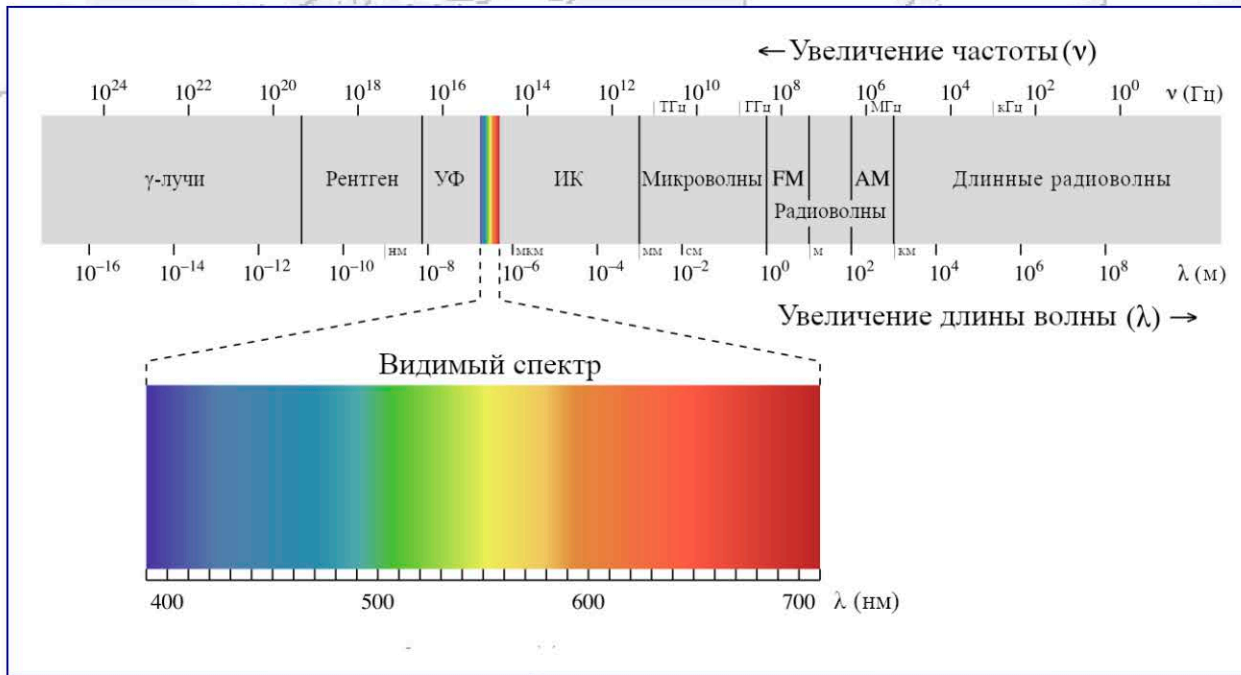
# Дистанционные измерения морского льда Ледовая авиационная разведка



*Карта ледовой обстановки вдоль Таймырского побережья между бухтой Михайлова и Таймырским заливом (берег Харитона Лаптева), Карское море. Карта выполнена в ходе ледовой авиаразведки 9 сентября 1934 г. и хранится в фондах ААНИИ.*

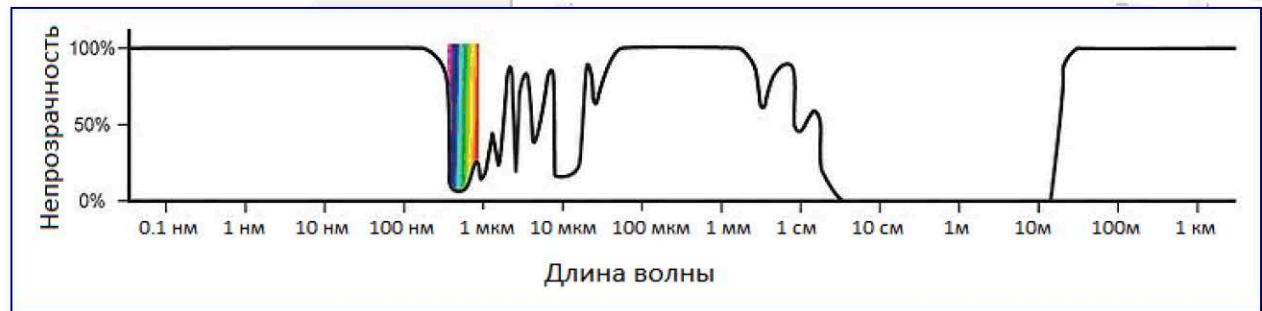


# Спектр электромагнитного излучения поверхности Земли



## Спектр электромагнитного излучения поверхности Земли

**Зависимость непрозрачности земной атмосферы (измеряется в процентах) от длины волны излучения ( $\lambda$ )**



# Типы методов дистанционного зондирования

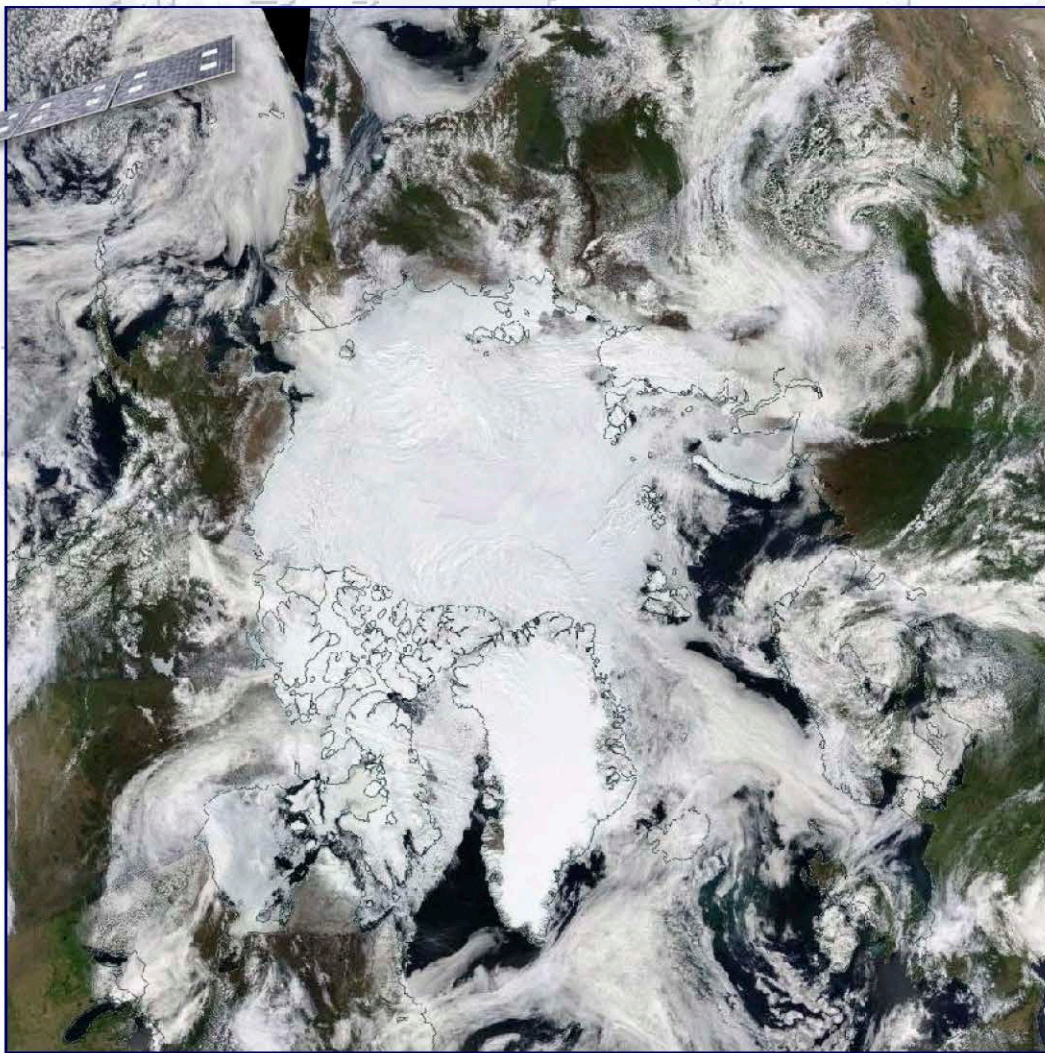


Методы дистанционного зондирования подразделяют на три типа: пассивные, полуактивные и активные.

- Пассивные методы основаны на регистрации теплового излучения (ИК и СВЧ) и естественного гамма-излучения с поверхности моря.
- Полуактивные методы основаны на облучении естественными и искусственными источниками электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне и в анализе сопоставления изменения спектрального состава отраженного сигнала.
- При использовании активных методов исследуемая водная поверхность облучается источниками излучения заданного спектрального состава с регистрацией или отраженного излучения, или флуоресценции, или комбинационного рассеяния.



# Дистанционные измерения морского льда Сканеры видимого диапазона



*Цвето  
синтезированное  
изображение в  
видимом диапазоне  
спектрорадиометра  
VIIRS (Visible Infrared  
Imaging Radiometer  
Suite) спутника  
NOAA-20 на 4 июня  
2022 г.*

«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев

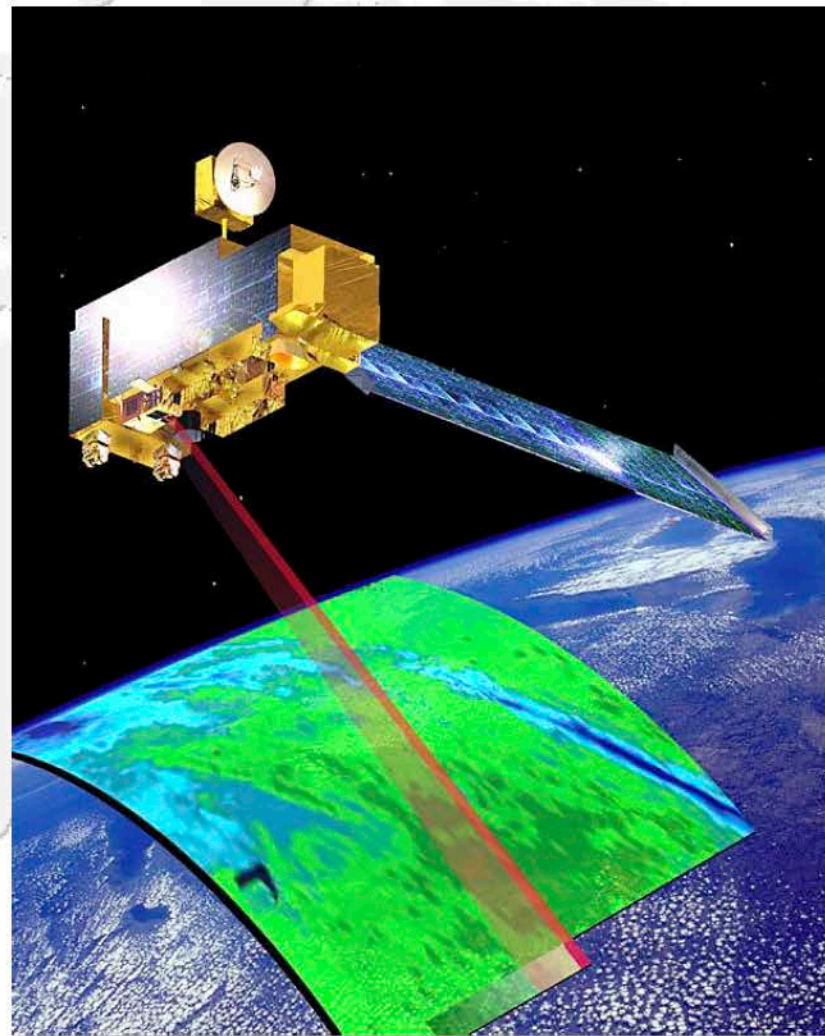




# Дистанционные измерения морского льда Сканеры видимого диапазона

## Спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

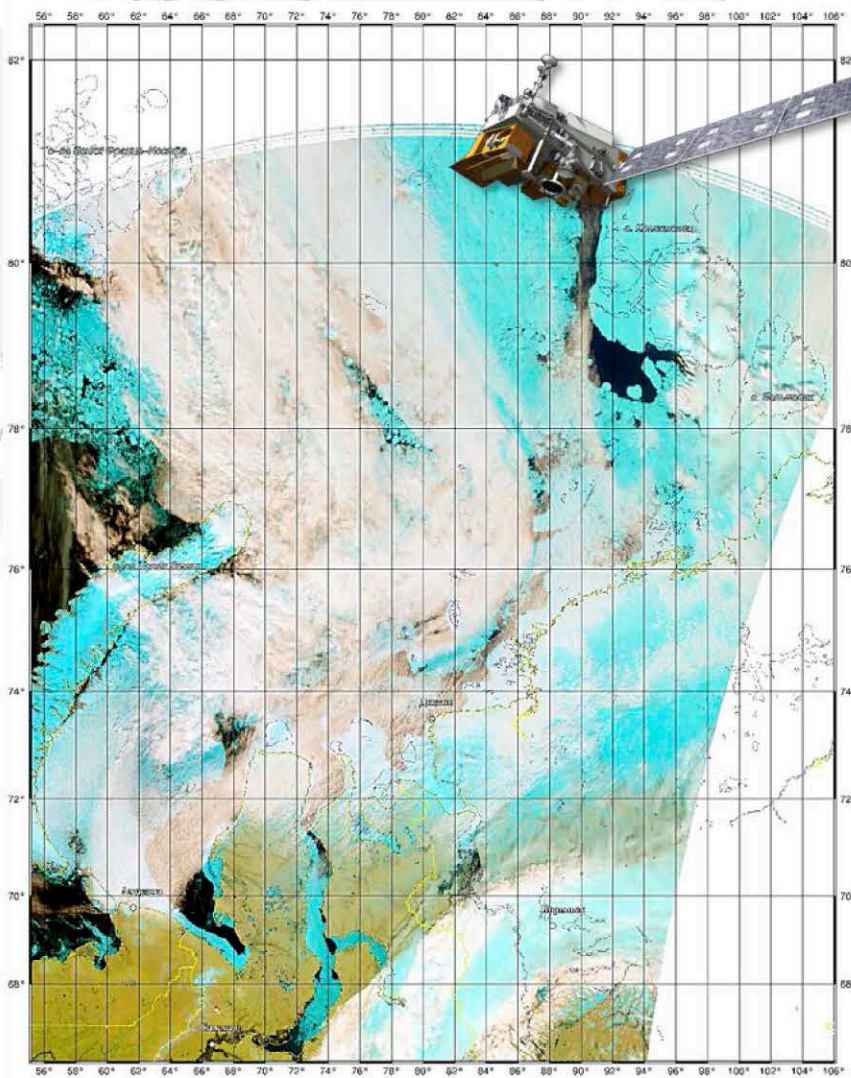
Спектральные каналы	36 спектральных каналов в видимом, ближнем, среднем и тепловом ИК-диапазонах
Пространственное разрешение в надире, м	250 (каналы 1-2); 500 (каналы 3-7); 1000 (каналы 8-36)
Ширина полосы съемки, км	2330
Период повторной съемки	1-2 раза в сутки, в зависимости от широты места съемки



*Схема сканирования  
спектрорадиометром MODIS*



# Дистанционные измерения морского льда Сканеры видимого диапазона



*Цвет синтезированное изображение в видимом диапазоне спектрорадиометра VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) спутника NOAA-20 на 4 июня 2022 г.*

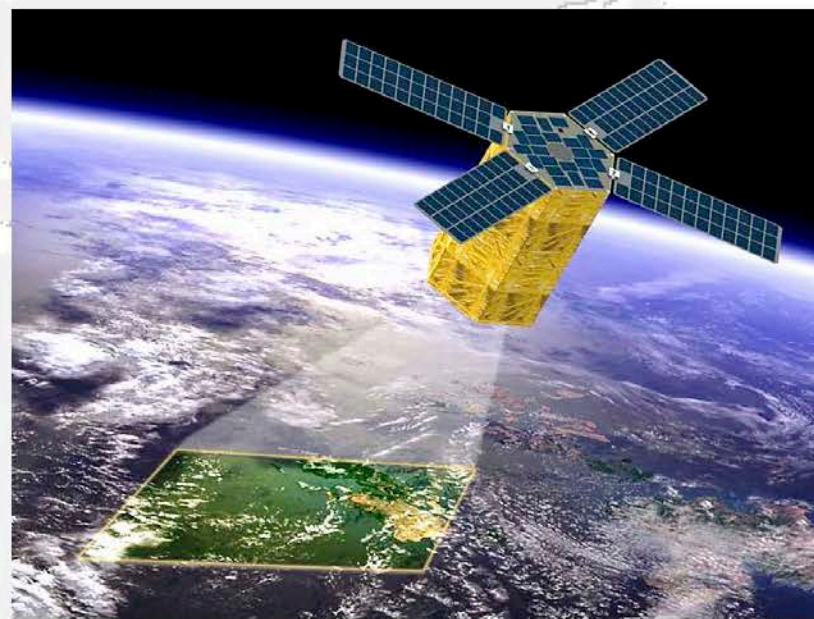
«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Дистанционные измерения морского льда Сенсоры видимого диапазона высокого разрешения

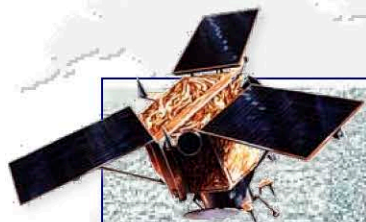
<b>Спутник Landsat-8</b>	
<b>Датчик OLI (Operational Land Imager)</b>	
Спектральные каналы	9 спектральных каналов в видимом и ближнем ИК-диапазонах
Пространственное разрешение в надире, м	30 (каналы 1-7, 9); 15 (канал 8)
<b>Датчик TIRS (Thermal InfraRed Sensor)</b>	
Спектральные каналы	92 спектральных канала в дальнем ИК-диапазоне
Пространственное разрешение в надире, м	100 (каналы 1-2)
Размеры кадра съемки, км	185 x 185
Период повторной съемки	7-10 суток, в зависимости от широты места съемки



*Схема сканирования датчиков OLI и TIRS спутника Landsat-8*



# Дистанционные измерения морского льда Сенсоры видимого диапазона высокого разрешения



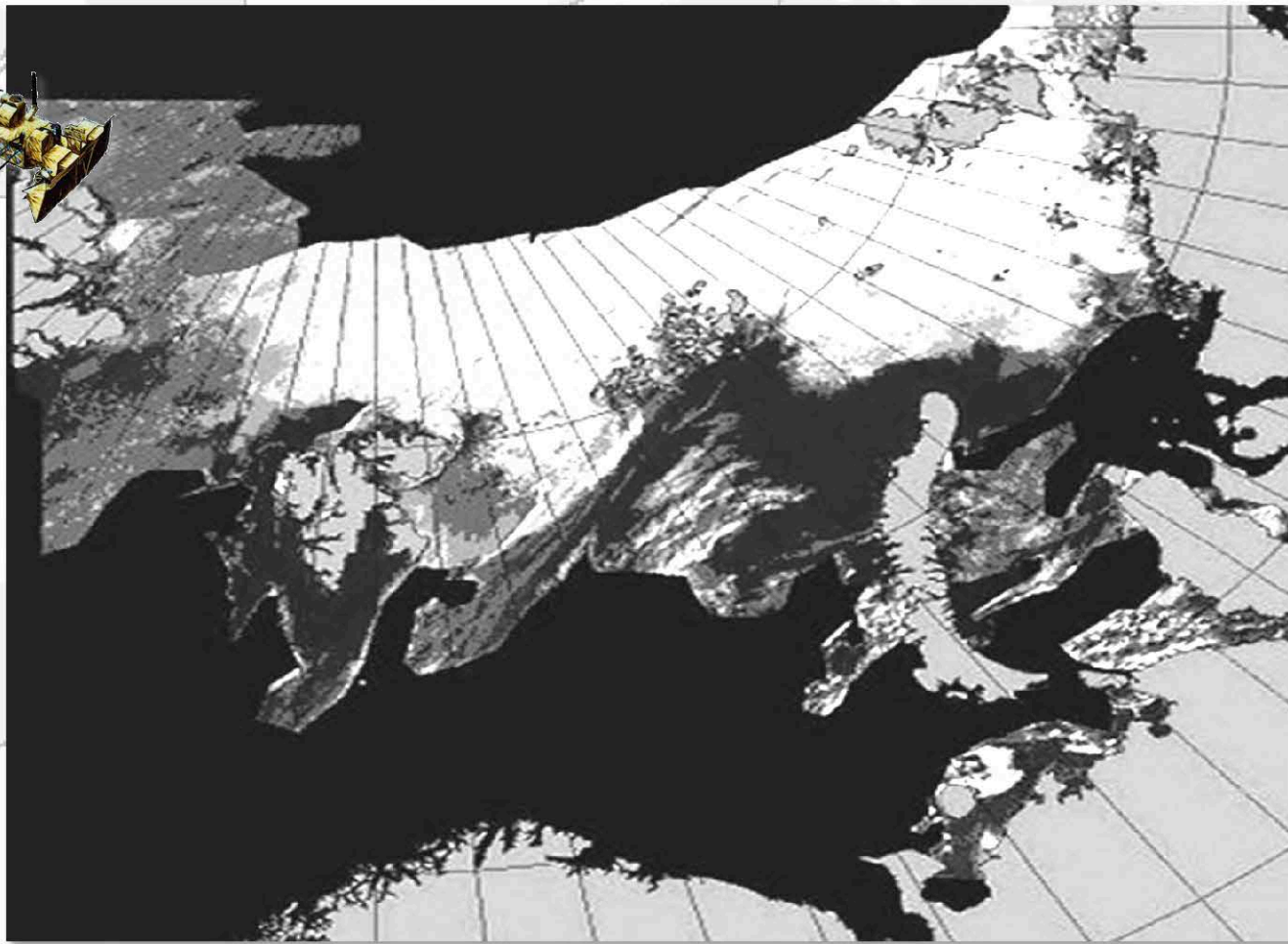
*Спутниковое изображение залива Содружества (Антарктида) в видимом диапазоне сенсора спутника IKONOS на 31 января 2001 г. Пространственное разрешение 0,81 м.*

«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Дистанционные измерения морского льда Инфракрасная радиометрия



*Композитное  
изображение в  
инфракрасном  
диапазоне  
радиометра AVHRR  
(Advanced Very High  
Resolution Radiometer)  
спутника NOAA-20 на  
26-28 июля 2021 г.*



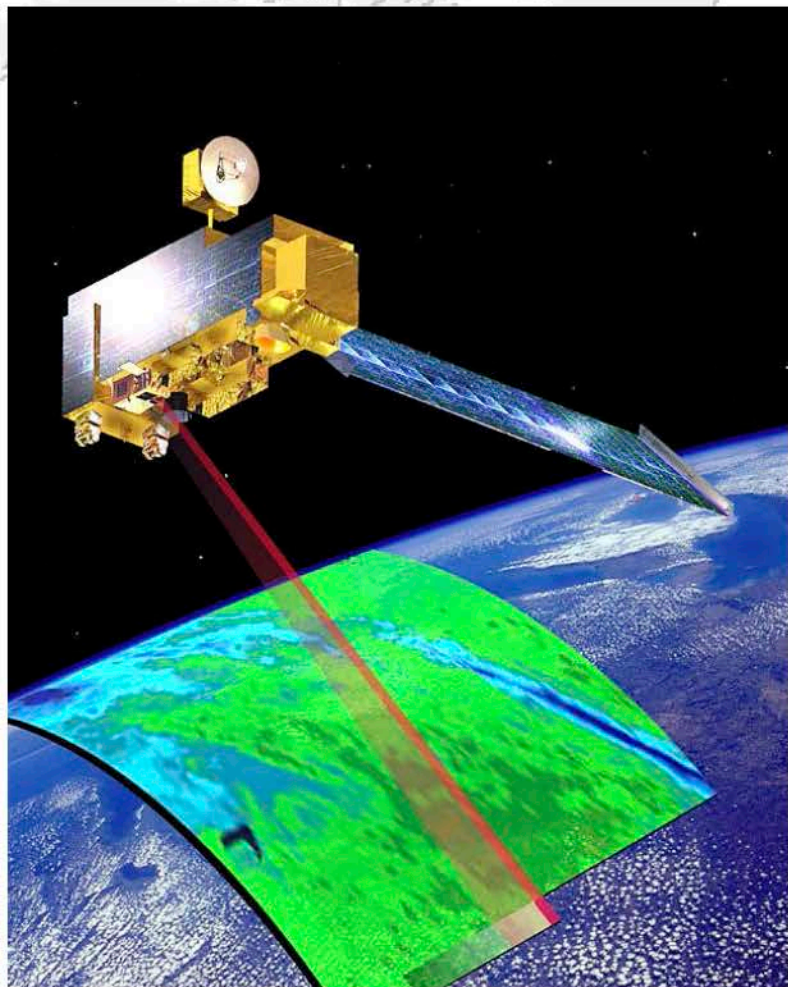
«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Дистанционные измерения морского льда

## Инфракрасная радиометрия



Усовершенствованный радиометр высокого разрешения AVHRR  
(Advanced Visible High Resolution Radiometer)

Спектральные каналы	6 спектральных каналов в видимом, ближнем, среднем и тепловом ИК-диапазонах
Пространственное разрешение в надире, м	1100
Ширина полосы съемки, км	3000
Период повторной съемки	1-2 раза в сутки, в зависимости от широты места съемки

*Схема сканирования радиометра AVHRR*



«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Идентификация льда по данным дистанционного зондирования в видимом и инфракрасном диапазонах

Для обнаружения снега и льда используется индекс нормализованной разности снега (Normalized Difference Snow Index, *NDSI*):

$$NDSI = (R_1 - R_2) / (R_1 + R_2)$$

где  $R_1$  – отражательная способность в видимом канале, 0,55, 0,67 или 0,86 мкм,  $R_2$  – коэффициент отражения в коротковолновом ИК-канале (1,6 или 2,2 мкм). Пиксель считается занят льдом, если  $NDSI > 0,45$ , а  $R_1 > 0,08$ .

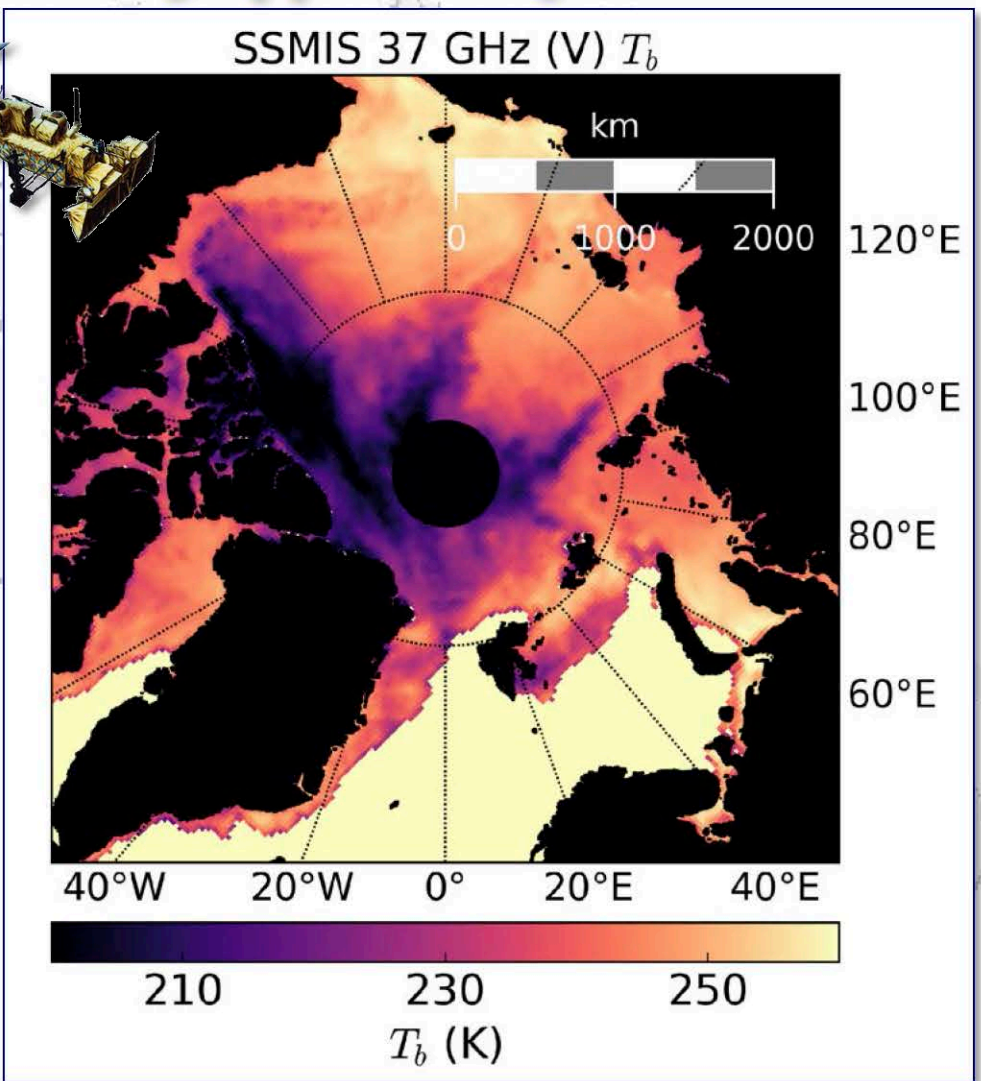
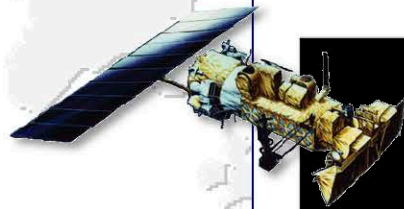
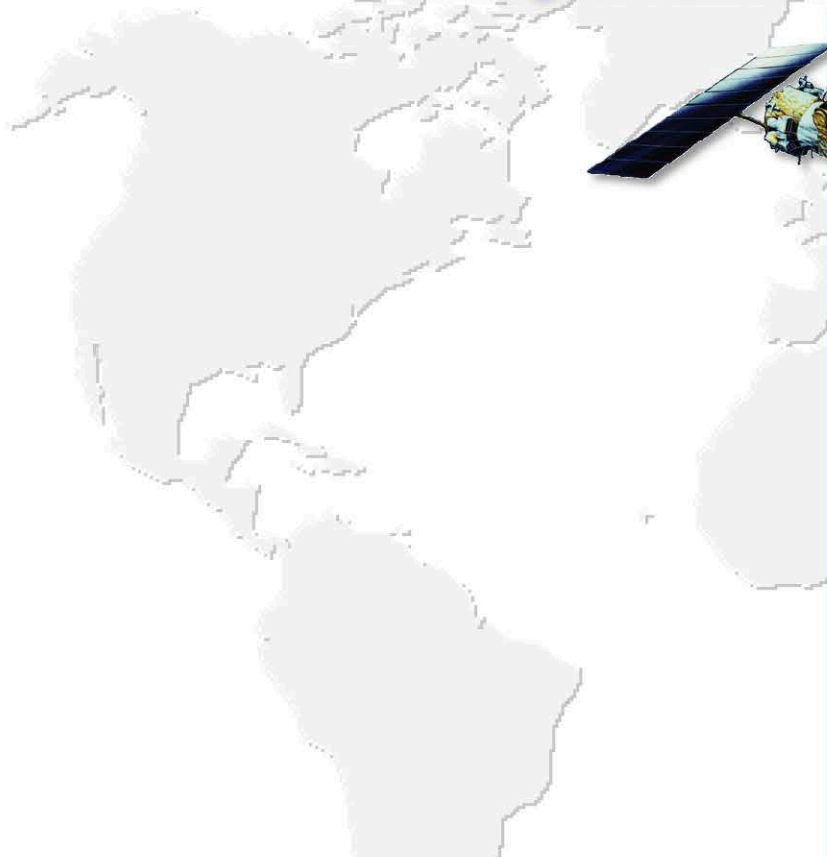
Также может использоваться нормализованный относительный индекс растительности (Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*) обычно называемый индексом вегетации:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

где  $NIR$  – отражательная способность в ближней инфракрасной области спектра  $RED$  – отражательная способность в красной области спектра. Пиксель считается занят льдом, если  $NDVI \approx -0,05$ . Для воды  $NDVI \approx -0,25$ .



# Дистанционные измерения морского льда Микроволновая радиометрия

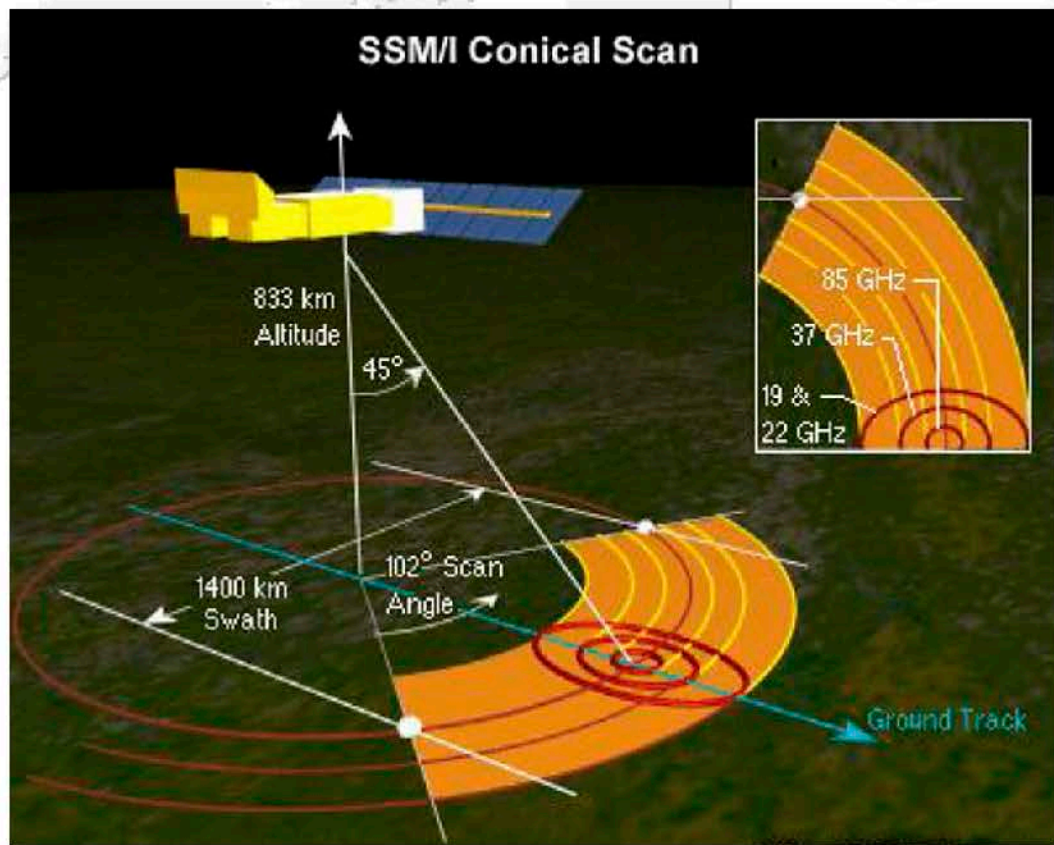


*Значения радиояркостной температуры микроволнового радиометра SSMIS по данным канала 37 ГГц (V) на 2 марта 2011 года*





# Дистанционные измерения морского льда Микроволновая радиометрия



*Схема сканирования многоканального СВЧ-радиометра SSM/I, установленного на спутниках серии DMSP*

## Датчик SSMIS (Special Sensor Microwave Imager / Sounder)

Спектральные каналы	24 спектральных каналов в СВЧ-диапазонах
Поляризация	V, H, правая круговая
Ширина полосы съемки, км	1700
Пространственное разрешение в надире, км	12,5 x 12,5 (каналы 8-11, 17-18); 25,0 x 12,5 (каналы 12-16); 37,5 x 12,5 (каналы 1-7); 75,0 x 12,5 (каналы 19-12)
Период повторной съемки	1-2 раза в сутки, в зависимости от широты места съемки



# Идентификация льда по данным дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне

Одним из главных параметров морского ледяного покрова является сплоченность морских льдов – процентное соотношение морского льда и чистой воды в одном пикселе:

$$C_{ice} = \frac{T_{b-water} - T_b}{T_{b-water} - T_{b-ice}}$$

где  $T_b$  – радиояркостная температура пиксела,  $T_{b-water}$  – радиояркостная температура пиксела соответствующего чистой воде и  $T_{b-ice}$  – радиояркостная температура пиксела соответствующего чистому льду.

За площадь морского льда принимают сумму площадей пикселей умноженных на сплоченность морских льдов для каждого пикселя при сплоченности не менее 15%, а за протяженность льда – кумулятивную площадь всех пикселей, имеющих сплоченность морских льдов не менее 15%.



# Идентификация льда по данным дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне

Для идентификации льда используется два соотношения: поляризационное  $PR(19)$  (H горизонтальная и V вертикальная поляризации канала 19 ГГц) (Алгоритм NASA team):

$$PR(19) = \frac{T_b(19V) - T_b(19H)}{T_b(19V) + T_b(19H)}$$

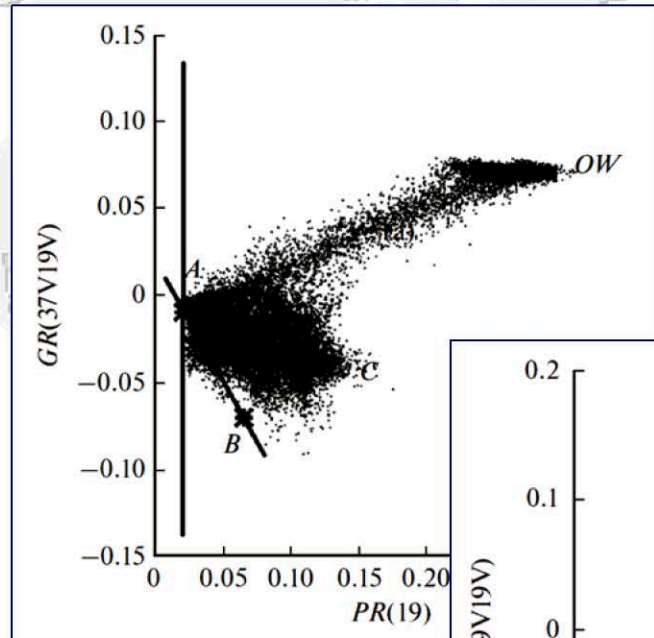
и градиентное  $GR(37V19V)$  (V вертикальная поляризация каналов 19 и 37 ГГц):

$$GR(37V19V) = \frac{T_b(37V) - T_b(19V)}{T_b(37V) + T_b(19V)}$$

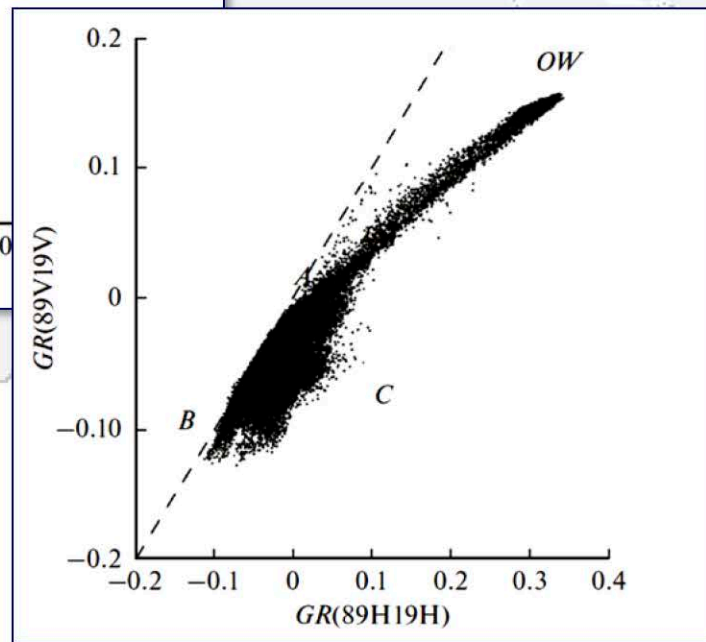
где  $T_b$  – яркостная температура спутникового канала



# Идентификация льда по данным дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне



*Зависимости соотношений:  $GR(37V19V)$  от  $PR(19)$  – слева и  $GR(85V19V)$  от  $GR(85H19H)$  – справа. Море Уэдделла 15.09.1992. Область А соответствует льду А для Антарктики, или однолетнему льду для Арктики; область В – льду В для Антарктики, или многолетнему льду для Арктики;*

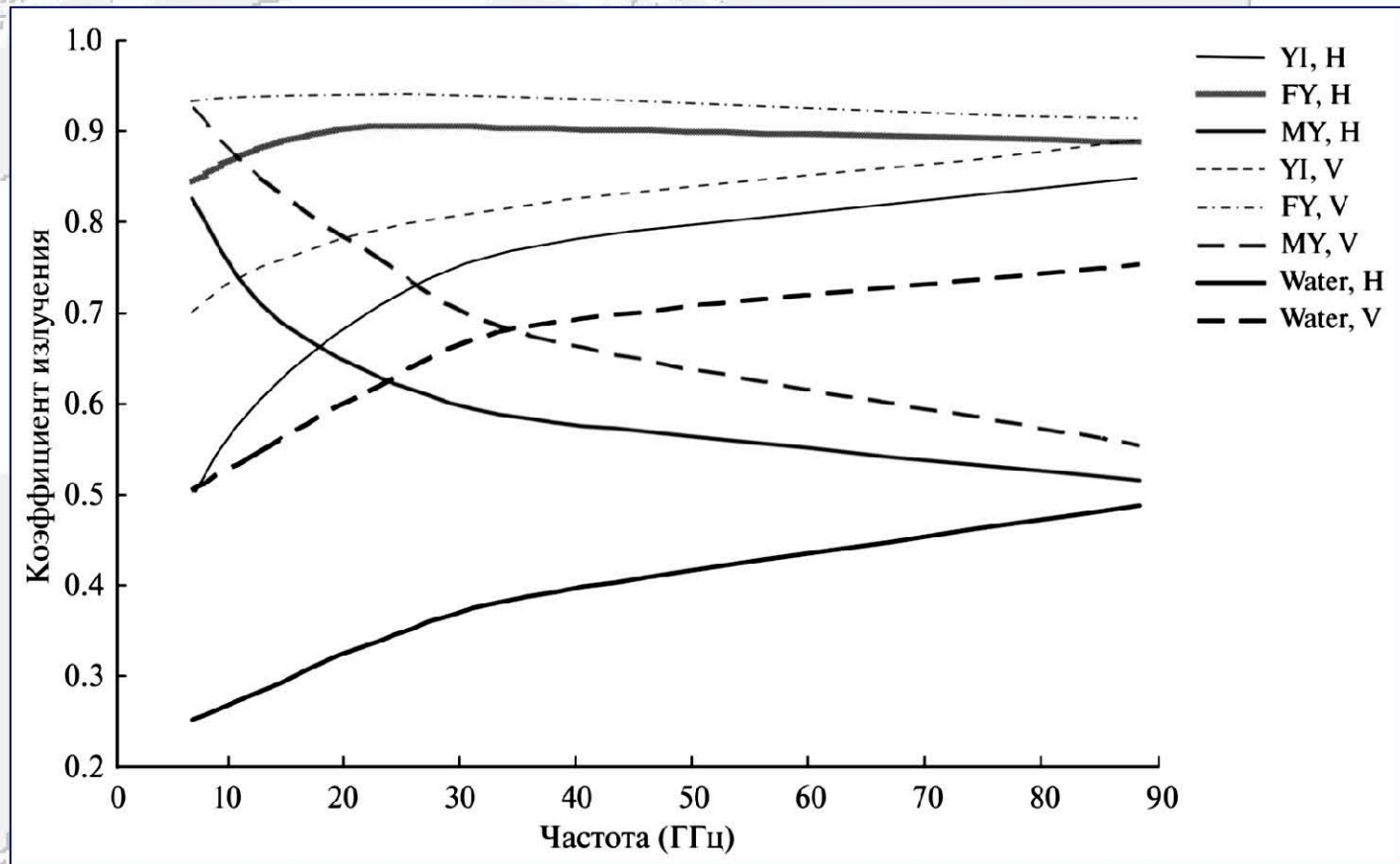


*а область OW – открытой морской поверхности. Линия АВ является линией 100% концентрации льда, а участки между АВ и OW участками с различной сплоченностью льда. Сплошной лед с поверхностными эффектами образует на графике область С, которая находится в зоне меньших сплоченностей (слева)*

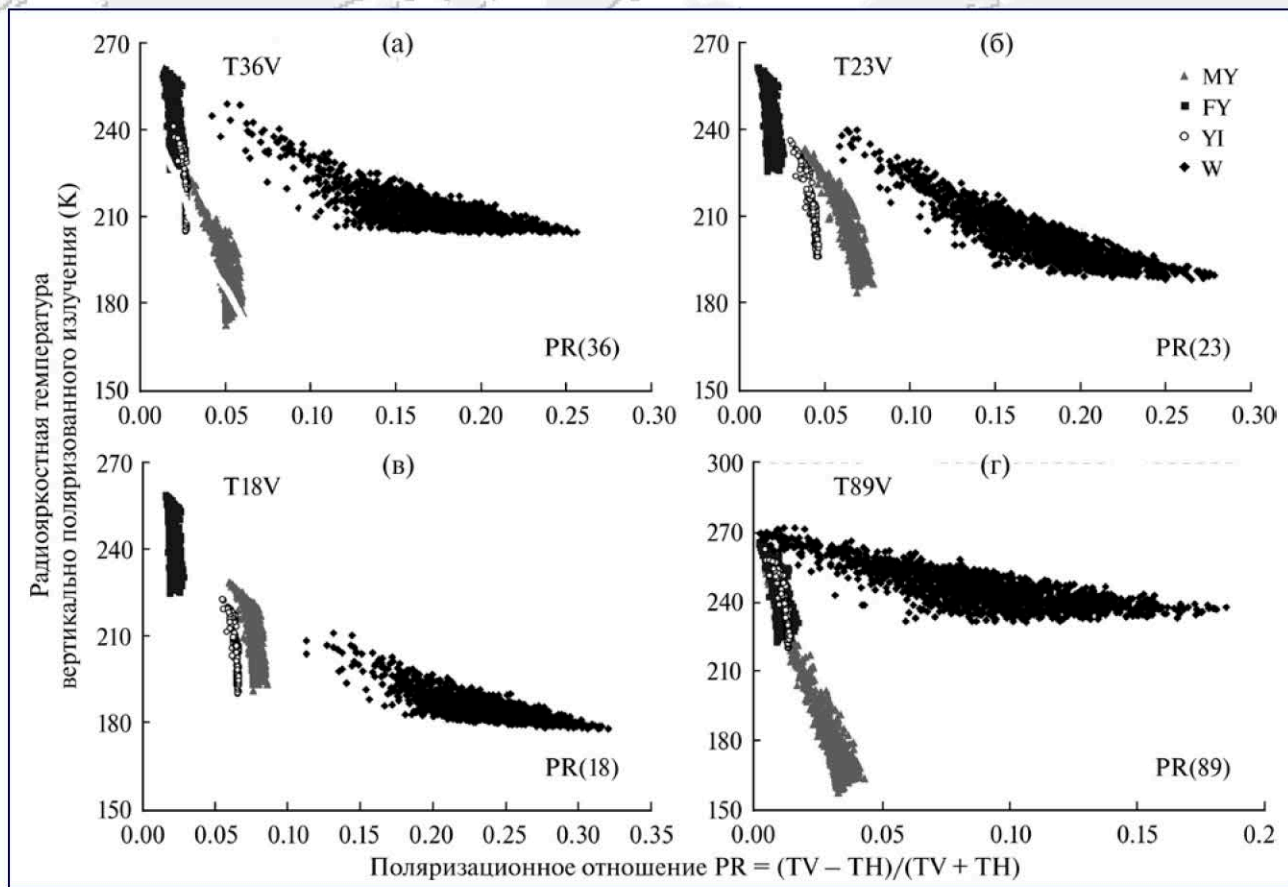


# Идентификация льда по данным дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне

Частотная зависимость коэффициентов излучения однолетнего (FY), многолетнего (MY) и молодого (YI) морского льда и свободной морской поверхности (Water) при отсутствии ветра для вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризации.



# Идентификация льда по данным дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне



*Зависимости радиоярких температур вертикально поляризованного микроволнового излучения при 100% сплоченности для однолетнего (FY), многолетнего (MY) и молодого (YI) льдов и 100% открытой морской воды (W) от поляризационных отношений на соответствующих частотах:*

- а – 36.5,*
- б – 23.8,*
- в – 18.7,*
- г – 89 ГГц.*



# Идентификация льда по данным дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне



*Снежницы*



«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Идентификация льда по данным дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне

Алгоритмы VASIA и VASIA2 (Variation Arctic/Antarctic Sea Ice Algorithm) разработаны сотрудниками трех российских научных институтов: ИКИ РАН, ИФА РАН и АНИИ. В основе него лежат не экспериментальные данные, а теоретическая модель излучения системы «морская поверхность–ледяной покров–снежный покров–атмосфера».

В качестве основных параметров алгоритм использует три тангенса угла наклона прямой, проведенной через значения яркостной температуры для двух разных частот одной поляризации к оси частот: тангенс для частот 85.5 и 19.35 ГГц вертикальной (V) поляризации – тангенс для частот 85.5 и 37 ГГц горизонтальной (H) поляризации – и тангенс для частот 37 и 19.35 ГГц вертикальной (V) поляризации,





# Идентификация льда по данным дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне

$$\tan(85V19V) = \frac{T_b(85V) - T_b(19V)}{85,5 - 19,35}$$

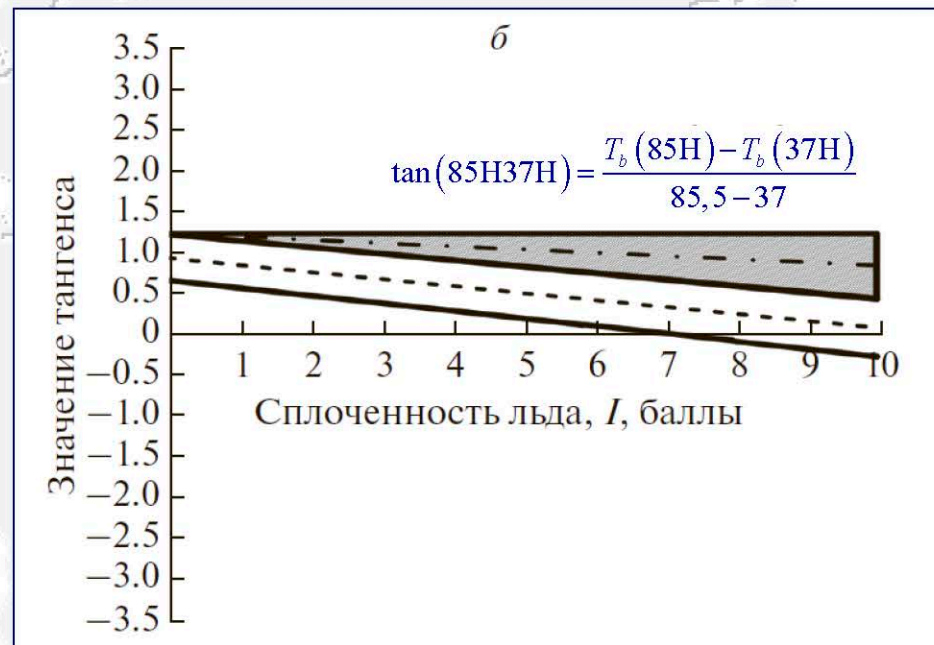
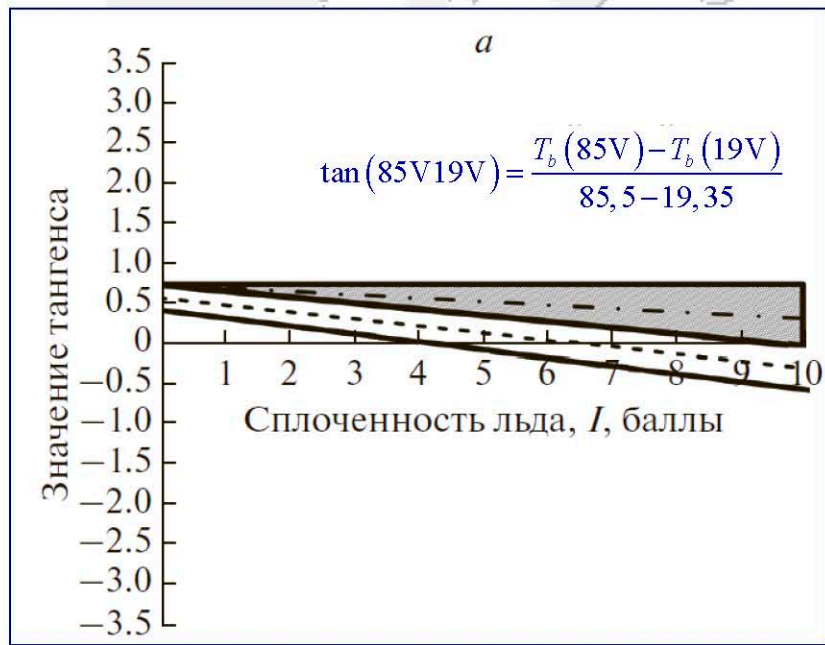
$$\tan(85H37H) = \frac{T_b(85H) - T_b(37H)}{85,5 - 37}$$

$$\tan(37V19V) = \frac{T_b(37V) - T_b(19V)}{37 - 19,5}$$

где  $T_b$  – яркостная температура спутникового канала на вертикальной (V) или горизонтальной (H) поляризации.



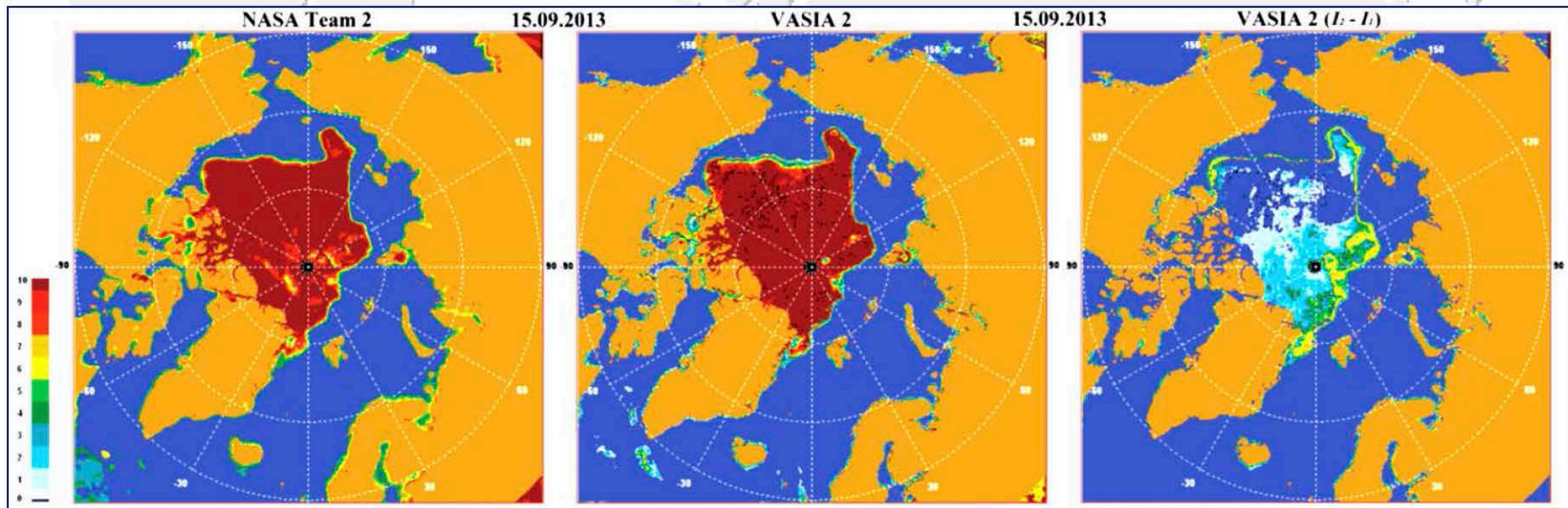
# Идентификация льда по данным дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне



*Зависимости значений тангенсов: а – и б – от сплоченности ледяного покрова. Незаштрихованная область между двумя прямыми – для ледяного покрова, область заштрихованного треугольника – для ледяного покрова со снежниками. Пунктирная и штрихпунктирная линии – средние соответствующих областей.*



# Идентификация льда по данным дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне



*Сплоченность ледяного покрова Арктики в 2013 г., рассчитанная по алгоритмам: NASA Team2, VASIA2, а также удельная площадь снежниц (I2-I1).*

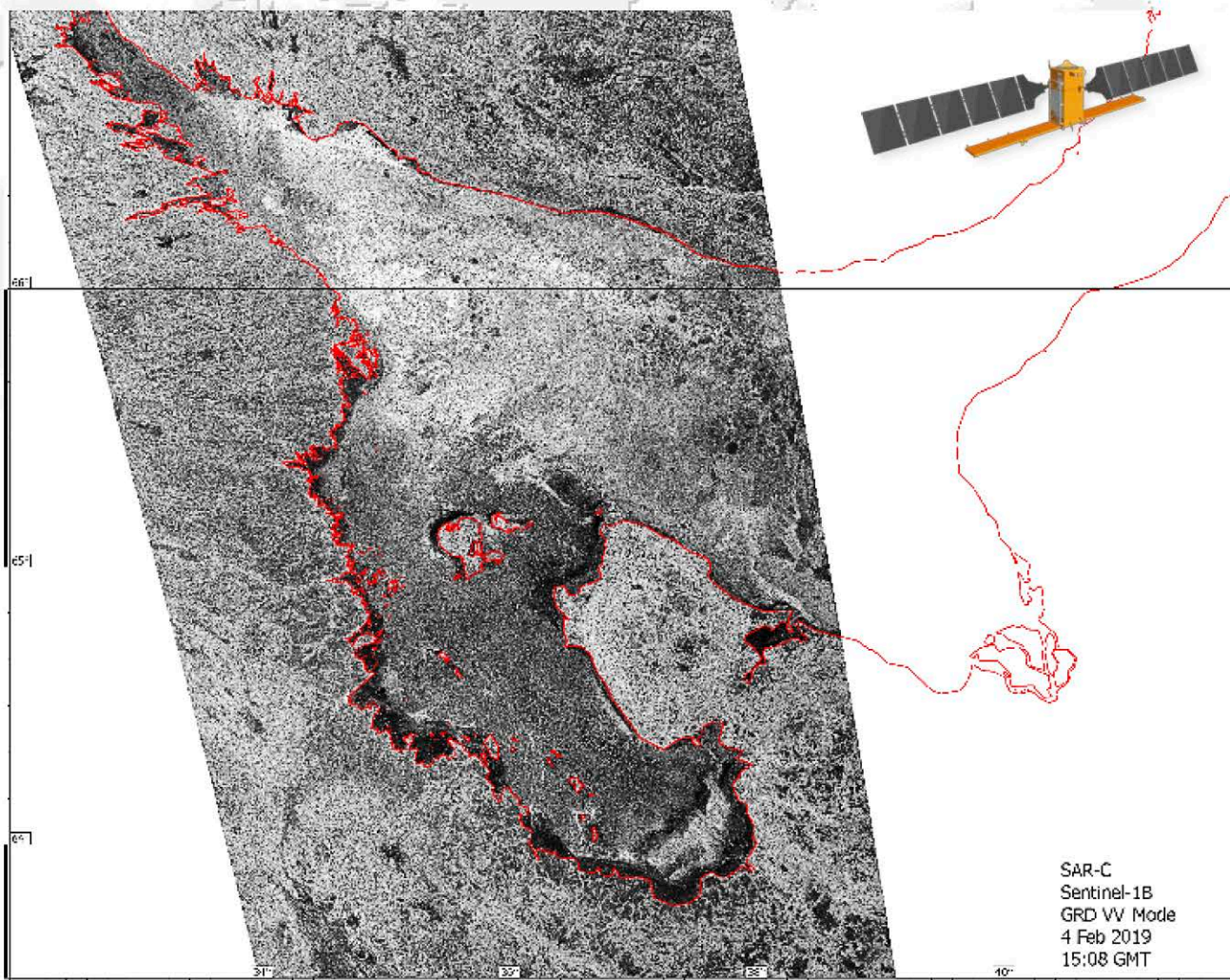


«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Дистанционные измерения морского льда Радар с синтезированной апертурой



*Спутниковые  
изображения с  
радара с  
синтезированной  
апертурой  
спутника  
**Sentinel-1b**  
на 2 февраля 2019 г.*



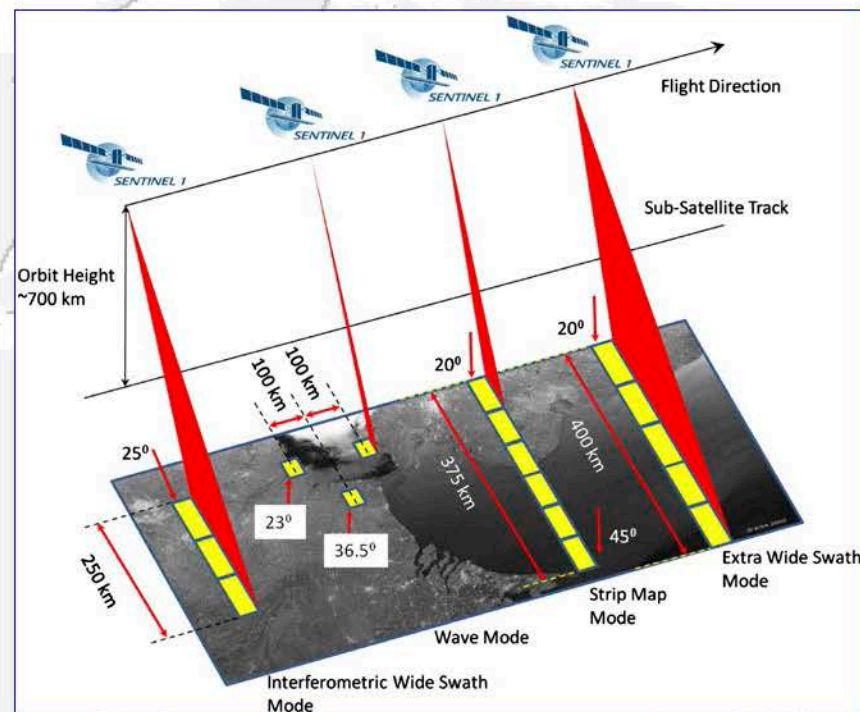
«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Дистанционные измерения морского льда Радар с синтезированной апертурой

Радар с синтезированной апертурой SAR-C спутника Sentinel-1	
Рабочая частота, ГГц	5,405
Режимы работы	Extra-Wide Swath Mode (EWSM) Strip Map Mode (SMM) Wave-Mode (WM) Interferometric Wide Swath (IWSM)
Поляризация	VV+VH или HH+HV (EWSM), VV+VH или HH+HV (SMM), VV или HH (WM), VV+VH или HH+HV (IWSM),
Пространственное разрешение в надире, м	20 x 40 (EWSM), 5 x 5 (SMM), 5 x 5 (WM), 5 x 20 (IWSM)
Ширина полосы обзора, км	400 (EWSM), 80 (SMM), 20 x 20 (WM), 250 (IWSM)
Период повторной съемки	1-3 суток, в зависимости от широты места съемки



*Схема сканирования радара с синтезированной апертурой спутника Sentinel-1b*



«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Идентификация льда по данным радара с синтезированной апертурой

Основное уравнение радиолокации

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 k \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

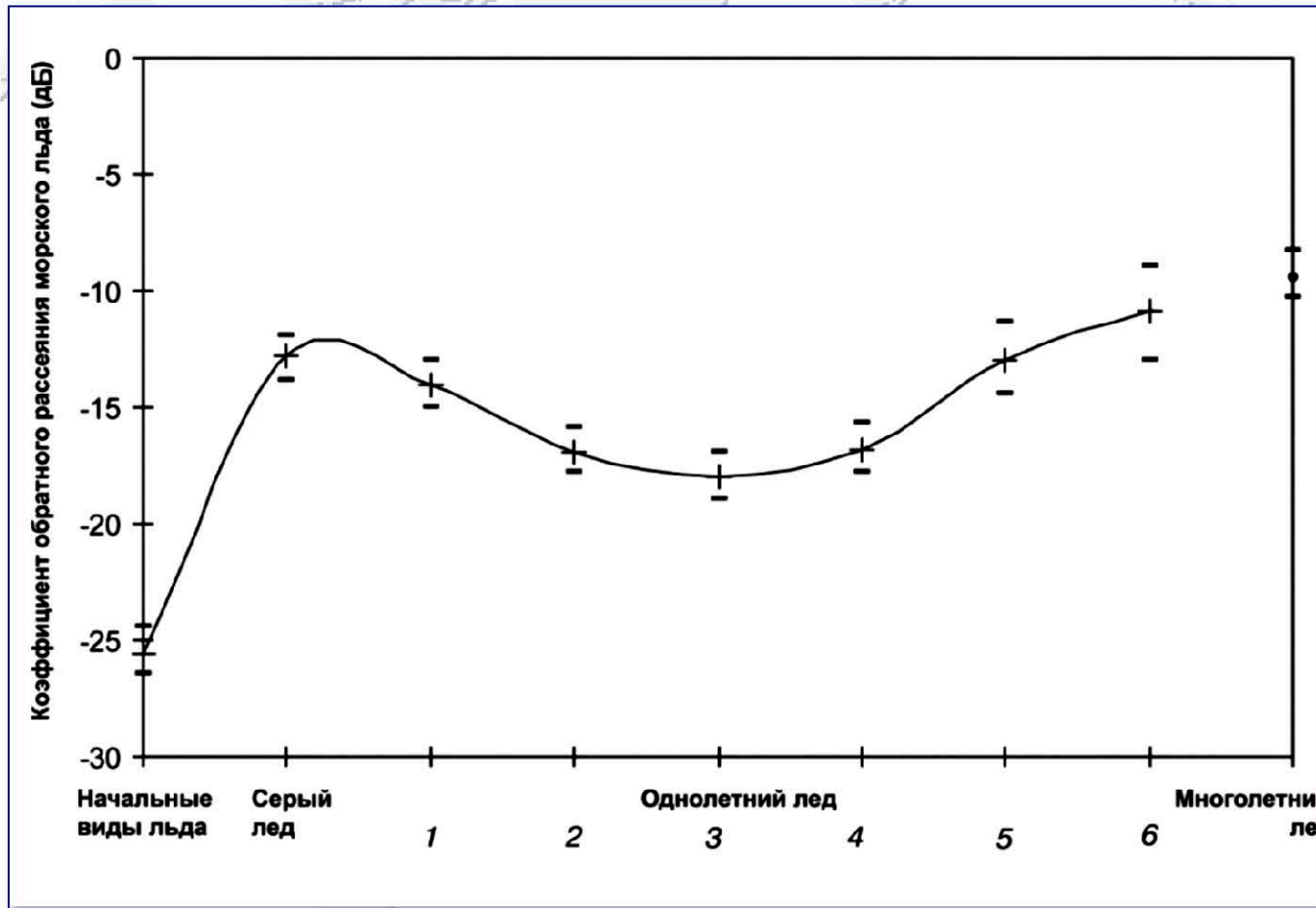
где  $P_r$  – мощность принимаемого отклика радиосигнала,  $P_t$  – мощность зондирующего импульса,  $\lambda$  – длина волны,  $G$  – коэффициент усиления антенны,  $k$  – коэффициент ослабления радиоволн в атмосфере,  $R$  – наклонная дальность до цели,  $\sigma$  – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) площадки разрешения.

В основном уравнении радиолокации ЭПР определяет обратное рассеяние как площадь ( $m^2$ ) дискретного объекта и является энергетической характеристикой, то есть определяет величину мощности принимаемого сигнала. Для протяженных поверхностей мерой рассеяния является удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР или  $\sigma^0$ ), которая является усредненной характеристикой эффективной площади рассеяния, отнесенной к единице площади зондируемого объекта ( $A$ ) и выражающейся в децибелах:

$$\sigma^0 = 10 \log_{10} (\sigma(\theta)/A)$$



# Идентификация льда по данным радара с синтезированной апертурой



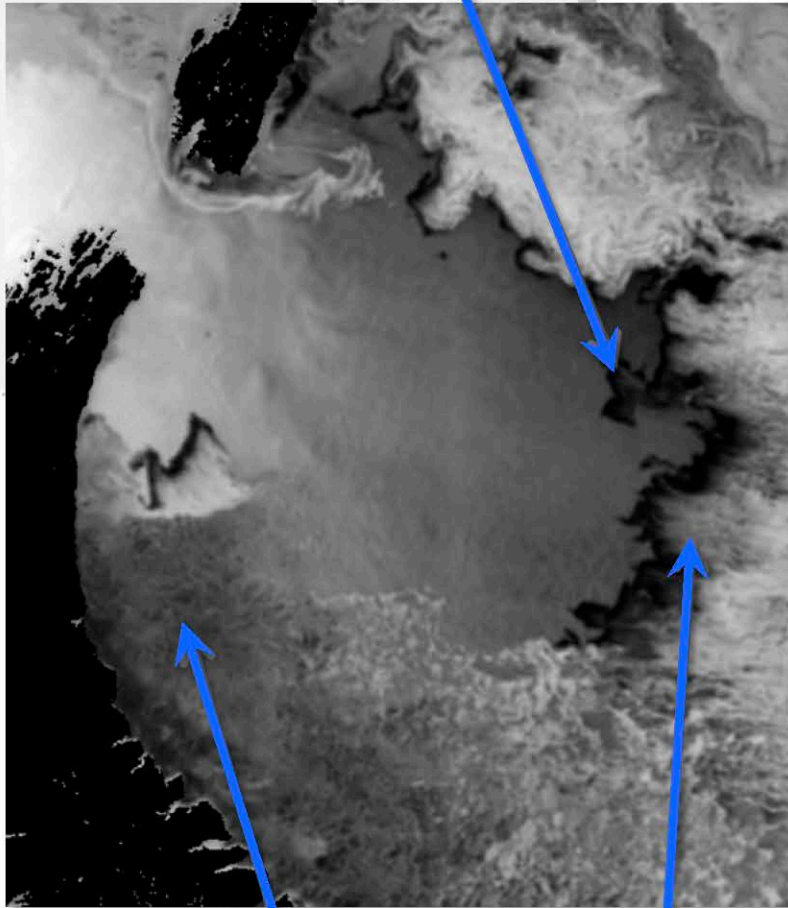
На величину обратного рассеяния поверхности влияют: шероховатость – мелко-масштабные и крупно-масштабные (относительно длины волны) неровности; диэлектрические свойства зондируемого объекта; частота радиолокатора; угол падения; поляризация.

1 – тонкий, 2 – ровный средний, 3 – ровный, толстый, 4 – торосистый, 5 – сильно торосистый, 6 – очень сильно торосистый



# Идентификация льда по данным радара с синтезированной апертурой

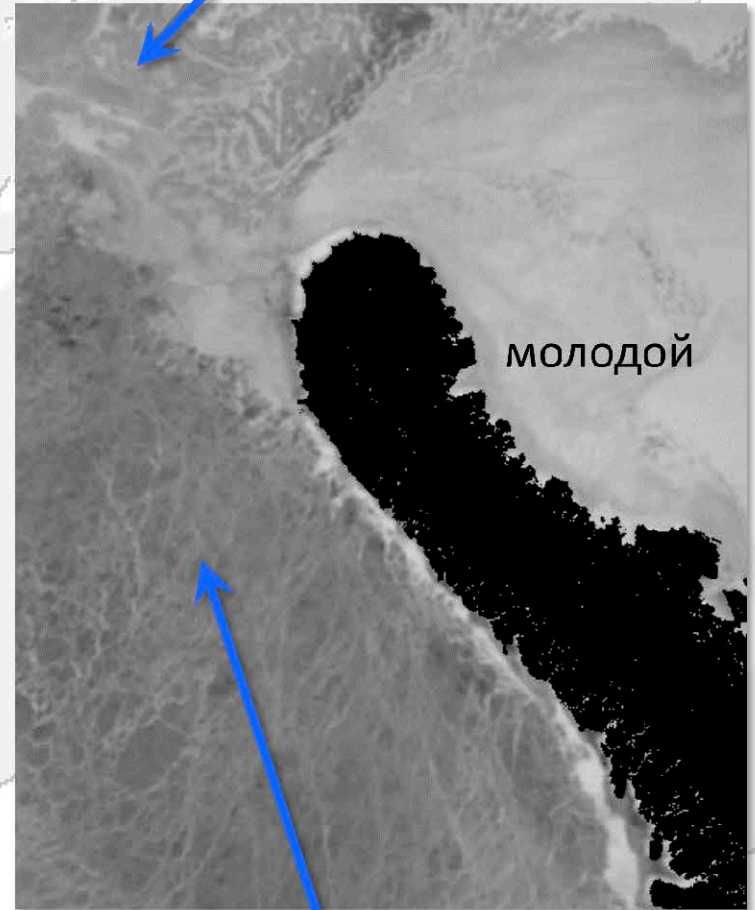
Нилас



Серый лед

Блинчатый +  
мелкобитый лед

Тонкий однолетний лед



МОЛОДОЙ

Однолетний средний  
лед

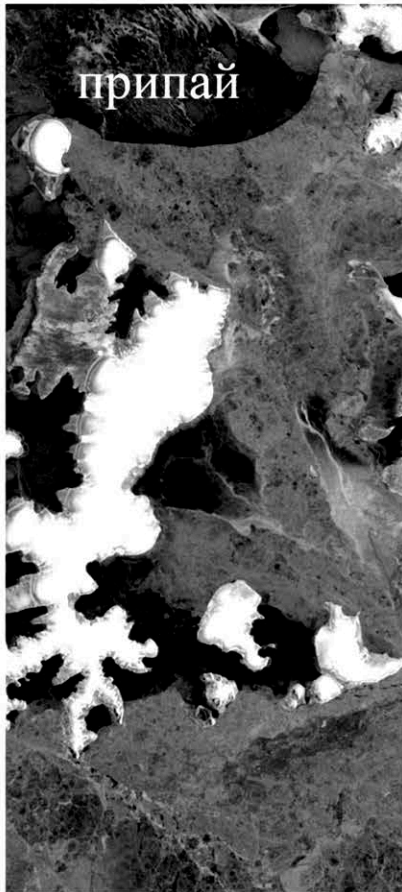
«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев

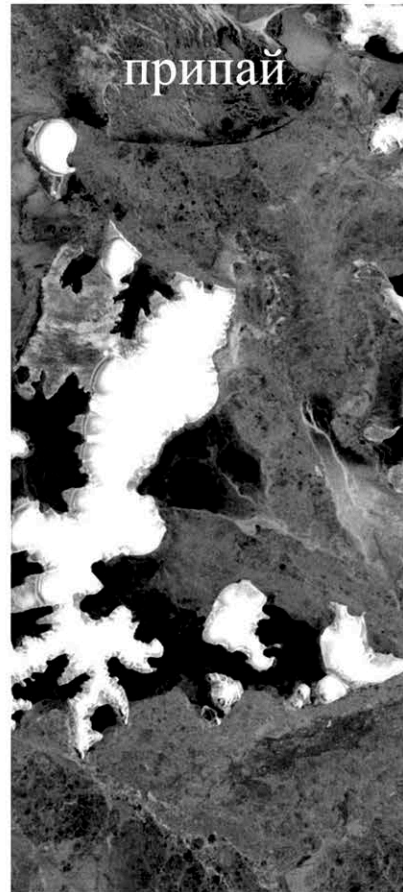




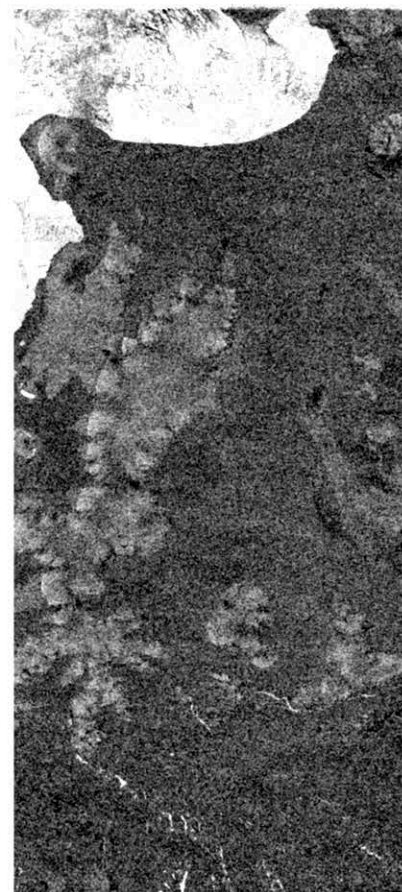
# Идентификация льда по данным радара с синтезированной апертурой



HH



VV



VV-HH

*Изображение, полученное со спутника ENVISAT в режиме APM (15.04.2006; полоса IS-4). На кросс-поляризации лучше выделяются начальные льды, нилас, открытая вода и граница припая*



# Дистанционные измерения морского льда спутниковой скаттерометрии



*Спутниковое изображение  
коэффициента обратного  
рассеяния скатерометра  
SeaWinds спутника QuikSCAT  
на 23 января 2003 г.*

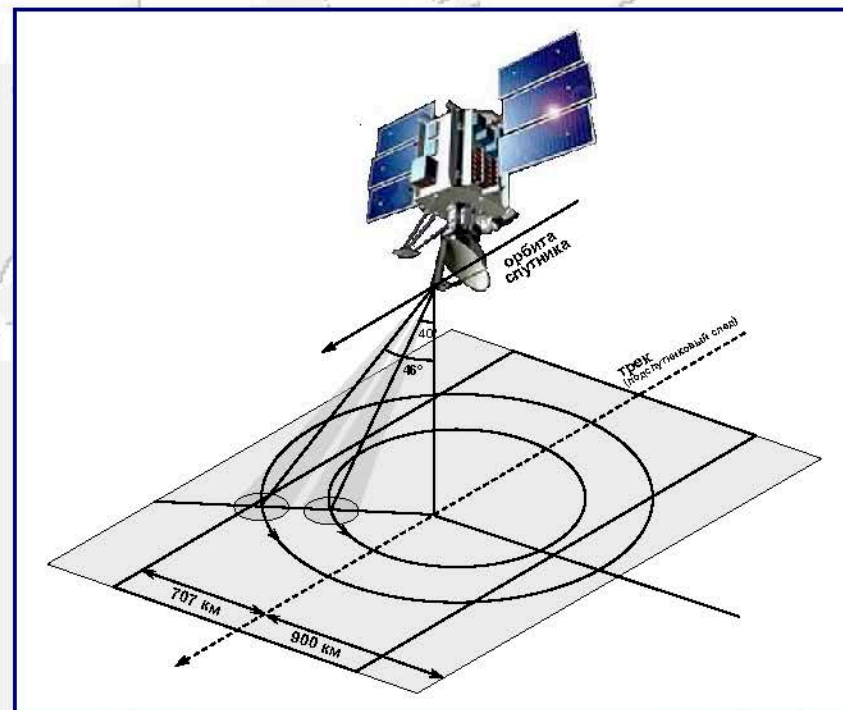
«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Дистанционные измерения морского льда спутниковой скаттерометрии

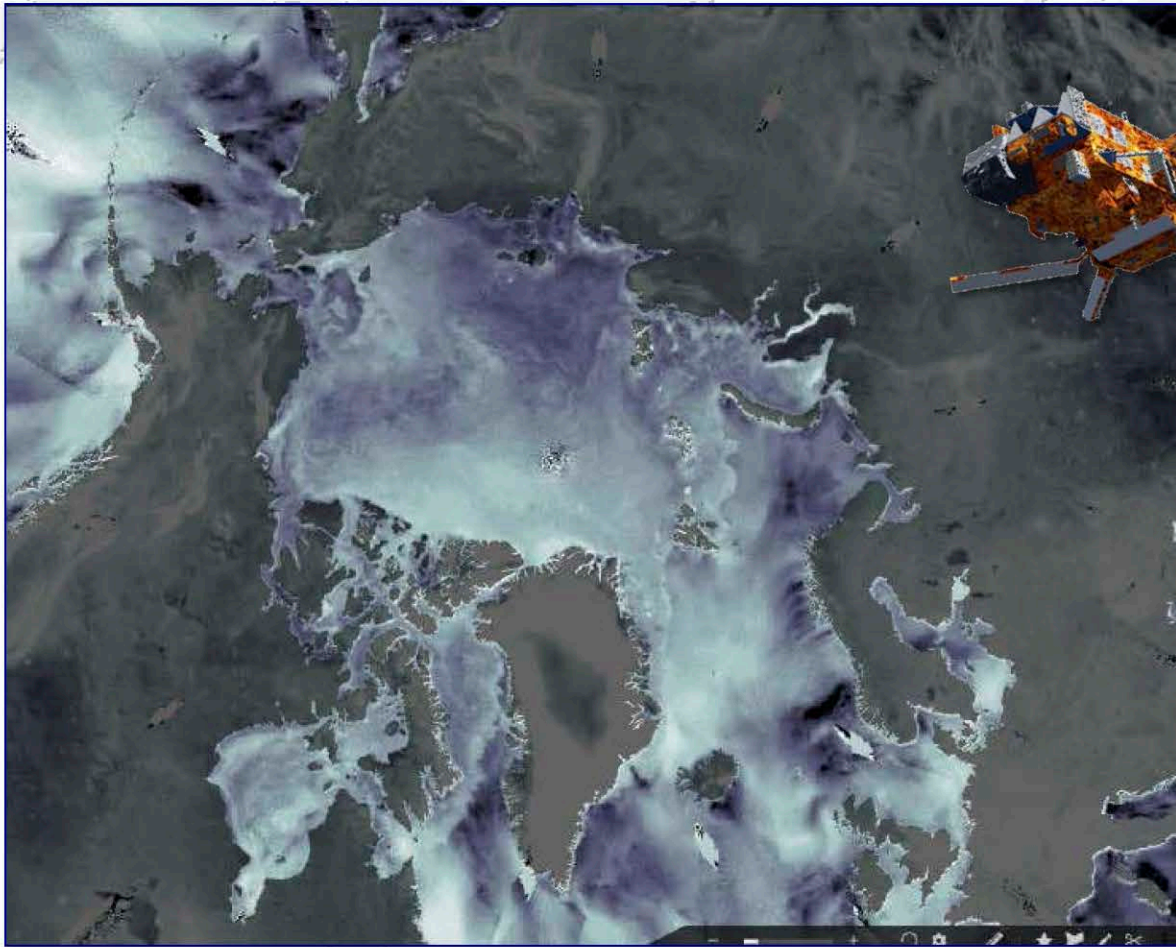
Скатерометр SeaWinds спутника QuikSCAT	
Рабочая частота, ГГц	13,4
Схема сканирования	Круговая
Поляризация	VV HH
Угол сканирования	$\pm 47^\circ$ (HH) $\pm 55^\circ$ (VV)
Пространственное разрешение, км	12,5 (Basic sampling) 25 (Standard quality) 50 (Best quality)
Ширина полосы обзора, км	1400 (HH) 1600 (VV)
Период повторной съемки	4 суток



*Скатерометр SeaWinds спутника QuikSCAT*



# Дистанционные измерения морского льда спутниковой скаттерометрии



*Спутниковые изображения  
коэффициента обратного  
рассеяния скатерометра  
ASCAT (Advanced  
SCATterometer) спутника  
Metop-C на 15 декабря 2019 г.*



«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

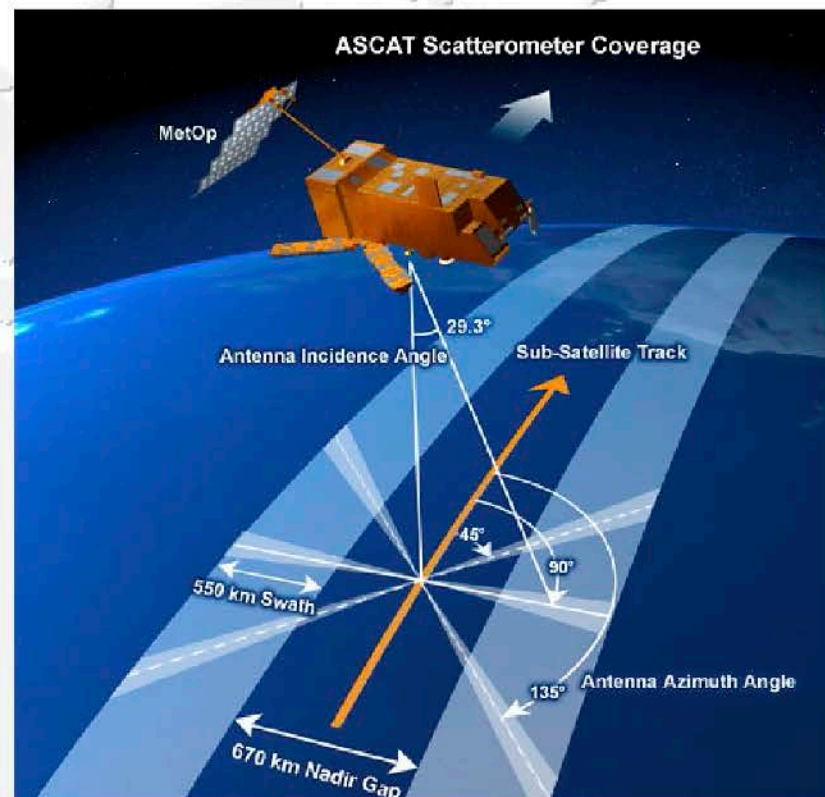
© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Дистанционные измерения морского льда спутниковой скаттерометрии

## Скатерометр ASCAT (Advanced SCATterometer) спутника Metop-C

Рабочая частота, ГГц	5,255
Ориентации антенн по отношения к траектории движения	$\pm 45^\circ$ $\pm 90^\circ$ $\pm 135^\circ$
Поляризация	VV
Пространственное разрешение, км	50 (Nominal mode) 25-37 (High-resolution mode)
Ширина полосы обзора, км	Две полосы по 550 км, разделенные 670-километровым промежутком вдоль пути.
Период повторной съемки	1-3 суток, в зависимости от широты места съемки



*Скатерометр ASCAT спутника Metop-C*



# Идентификация льда по данным спутниковой скаттерометрии

Основное уравнение радиолокации

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 k \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

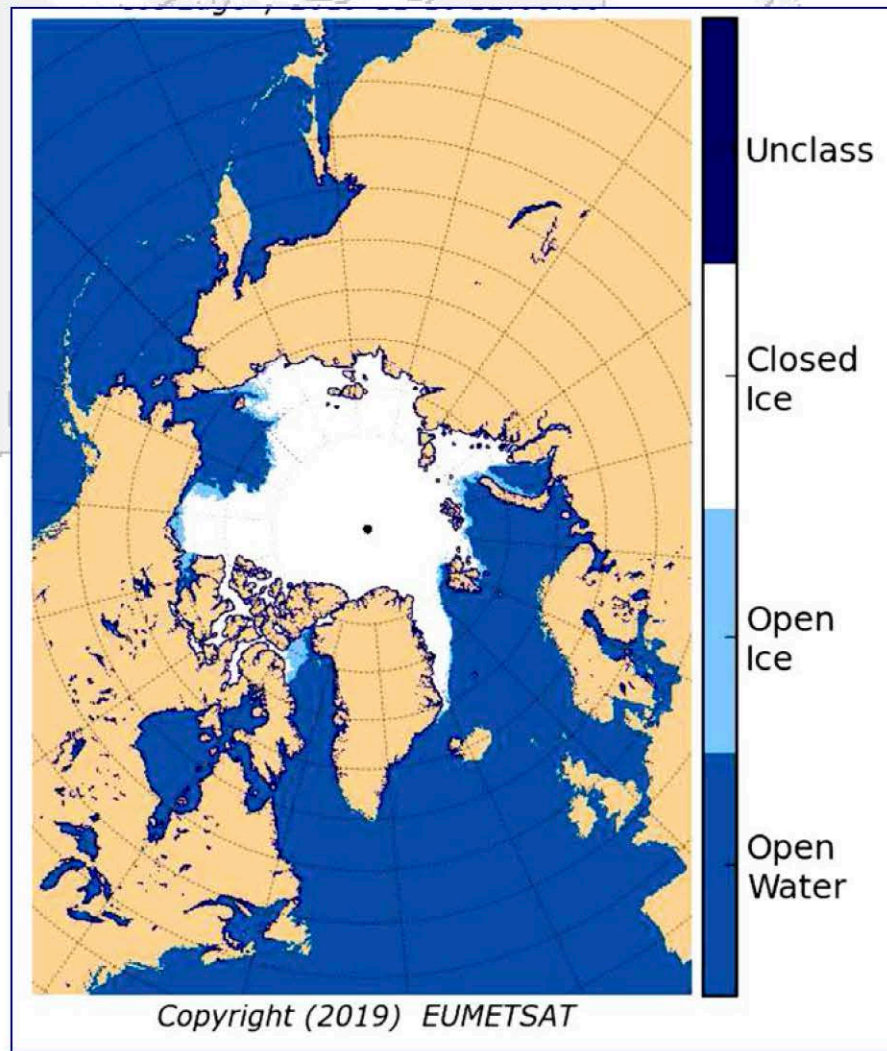
где  $P_r$  – мощность принимаемого отклика радиосигнала,  $P_t$  – мощность зондирующего импульса,  $\lambda$  – длина волны,  $G$  – коэффициент усиления антенны,  $k$  – коэффициент ослабления радиоволн в атмосфере,  $R$  – наклонная дальность до цели,  $\sigma$  – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) площадки разрешения.

В основном уравнении радиолокации ЭПР определяет обратное рассеяние как площадь ( $m^2$ ) дискретного объекта и является энергетической характеристикой, то есть определяет величину мощности принимаемого сигнала. Для протяженных поверхностей мерой рассеяния является удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР или  $\sigma^0$ ), которая является усредненной характеристикой эффективной площади рассеяния, отнесенной к единице площади зондируемого объекта ( $A$ ) и выражающейся в децибелах:

$$\sigma^0 = 10 \log_{10} (\sigma(\theta)/A)$$



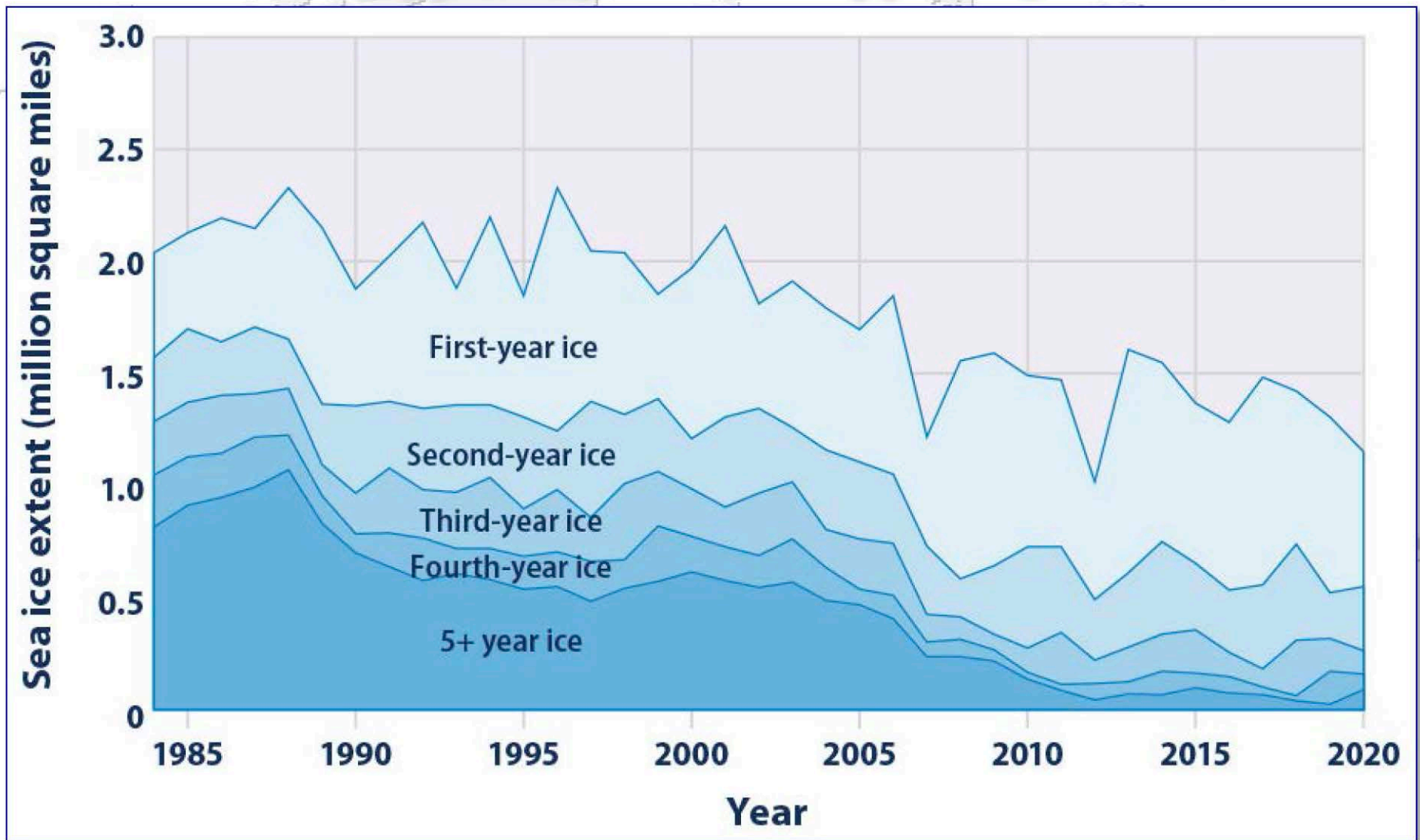
# Идентификация льда по данным спутниковой скаттерометрии



*Классификация морского льда по данным скатерометра ASCAT (Advanced SCATterometer) спутника Metop-C на 12 ноября 2019 г.*



# Климатическая изменчивость площади морского льда в Арктике



«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

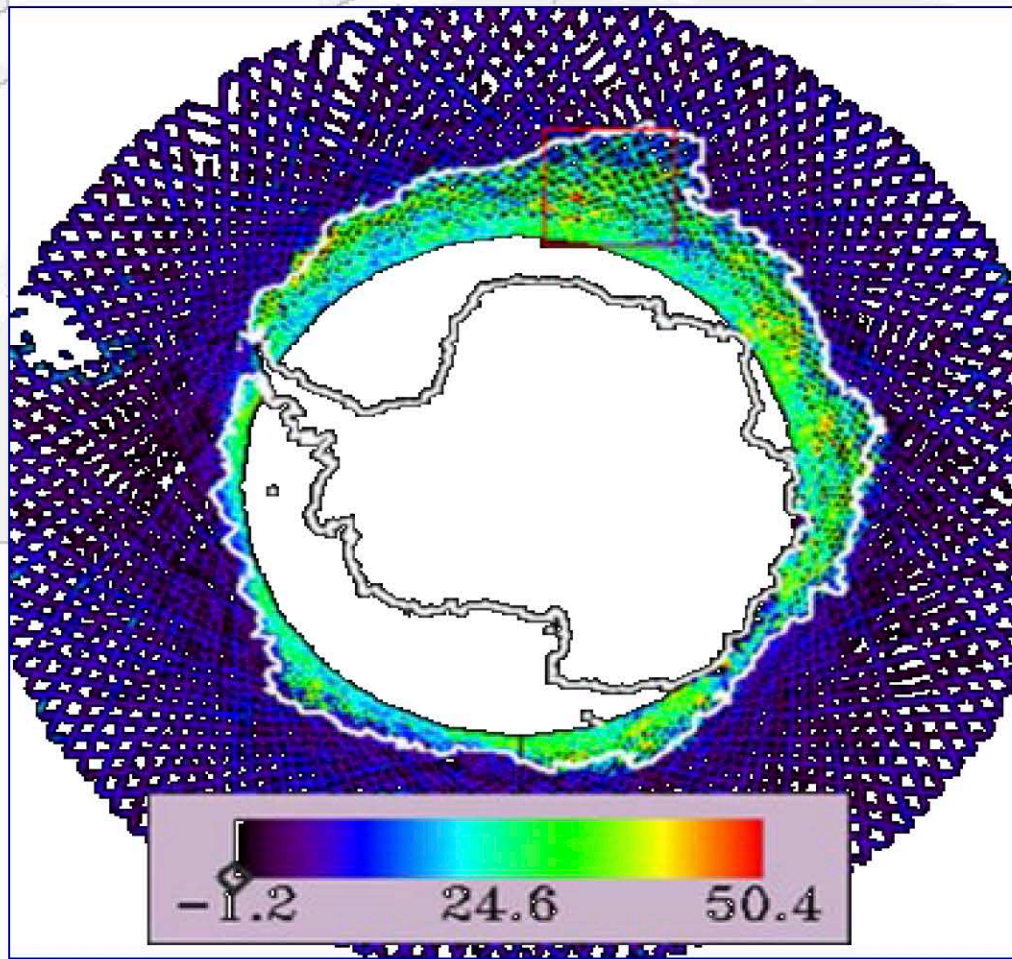
© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев





# Дистанционные измерения морского льда спутниковой альтиметрии

*Спутниковые изображения  
коэффициента обратного  
рассеяния альтиметра AltiKa  
спутника SARAL за декабрь 2019 г.*

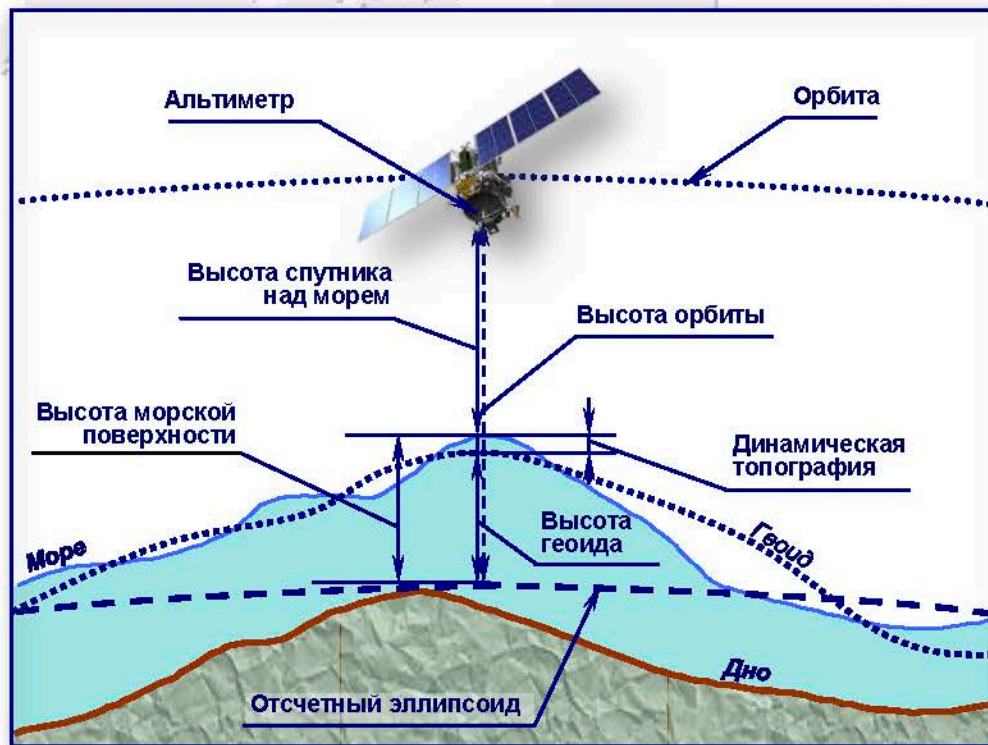


«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Дистанционные измерения морского льда спутниковой альтиметрии



## Радар альтиметр AltiKa спутника SARAL

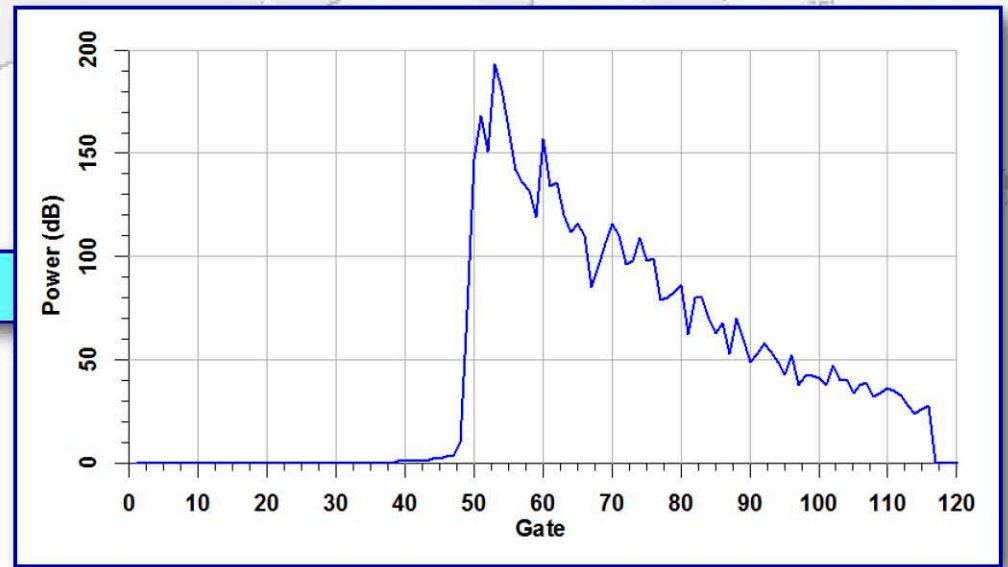
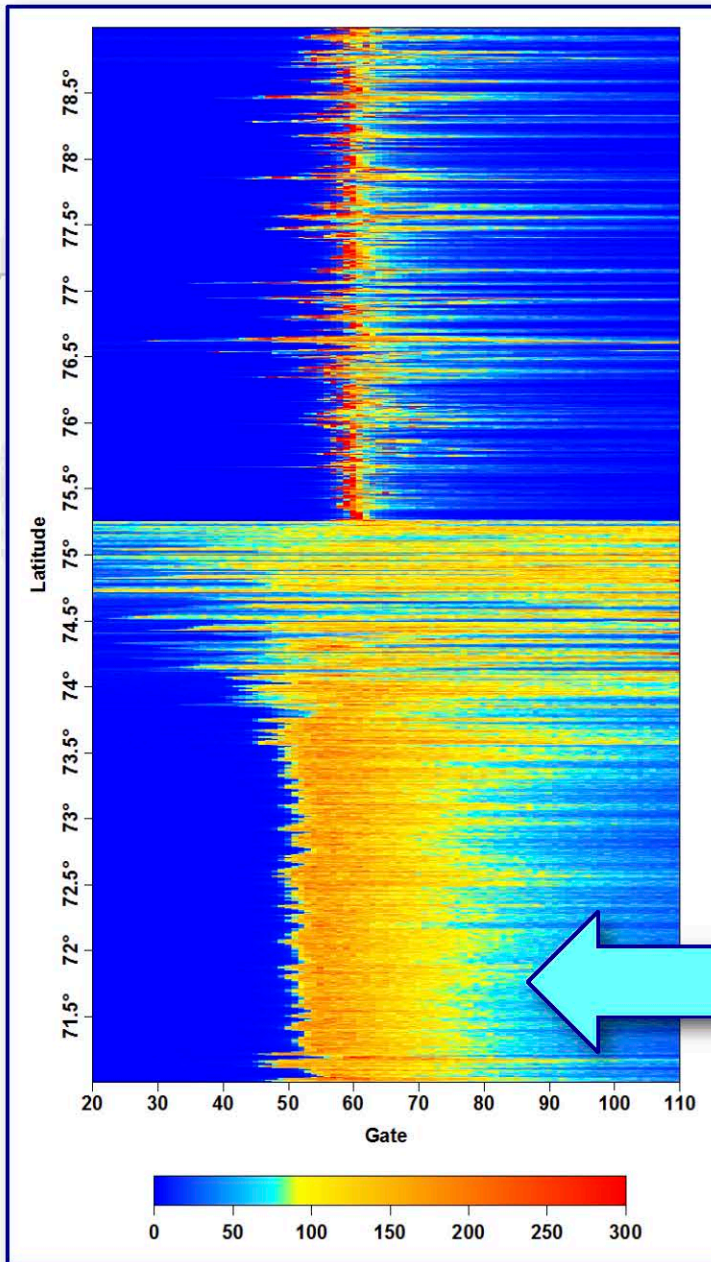
Рабочая частота, ГГц	36,75
Пространственное разрешение в надире, км	10
Период повторной съемки	27 суток, в зависимости от широты места съемки

*Принципиальная схема спутниковой альтиметрии*

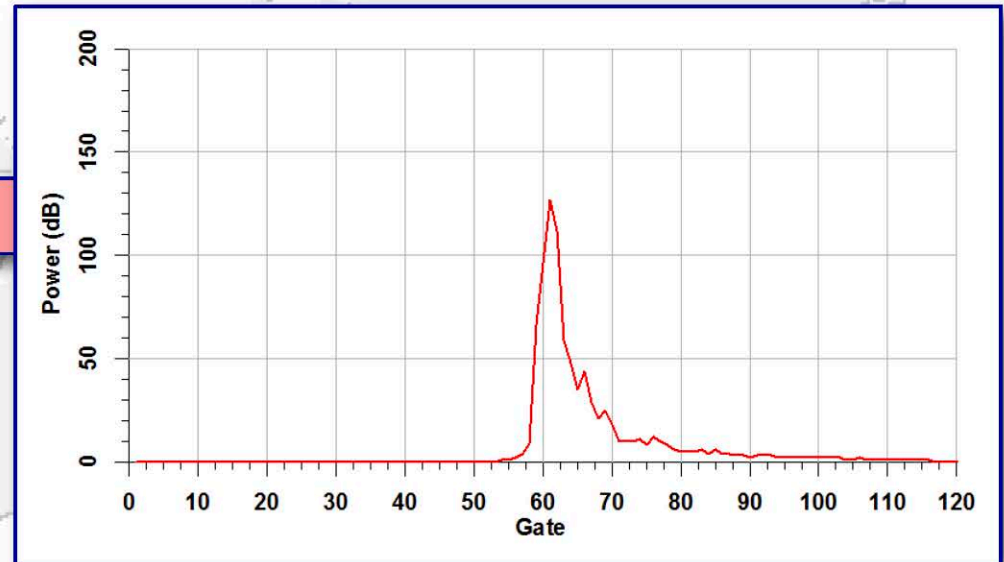
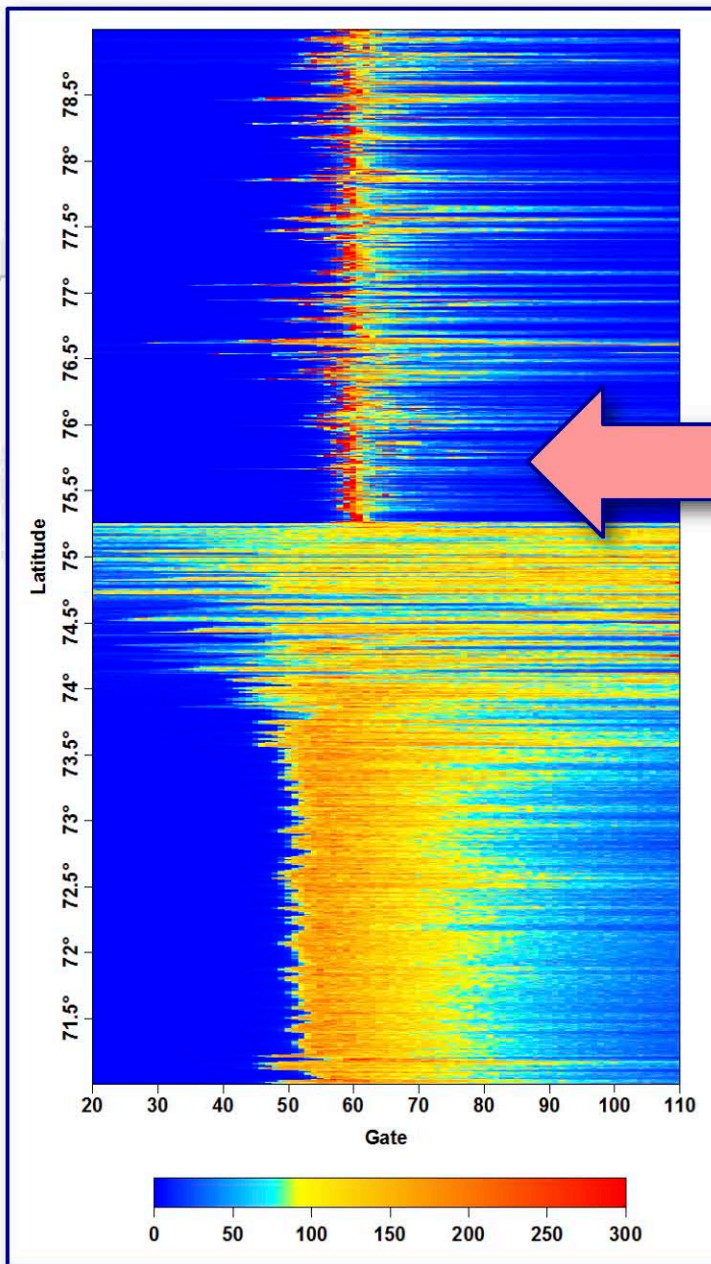


# Метод идентификации положения кромки льда

Зависимость мощности отраженного сигнала от широты вдоль 216 трека спутника SARAL/AltiKa для 104 цикла (12 декабря 2016 г.).



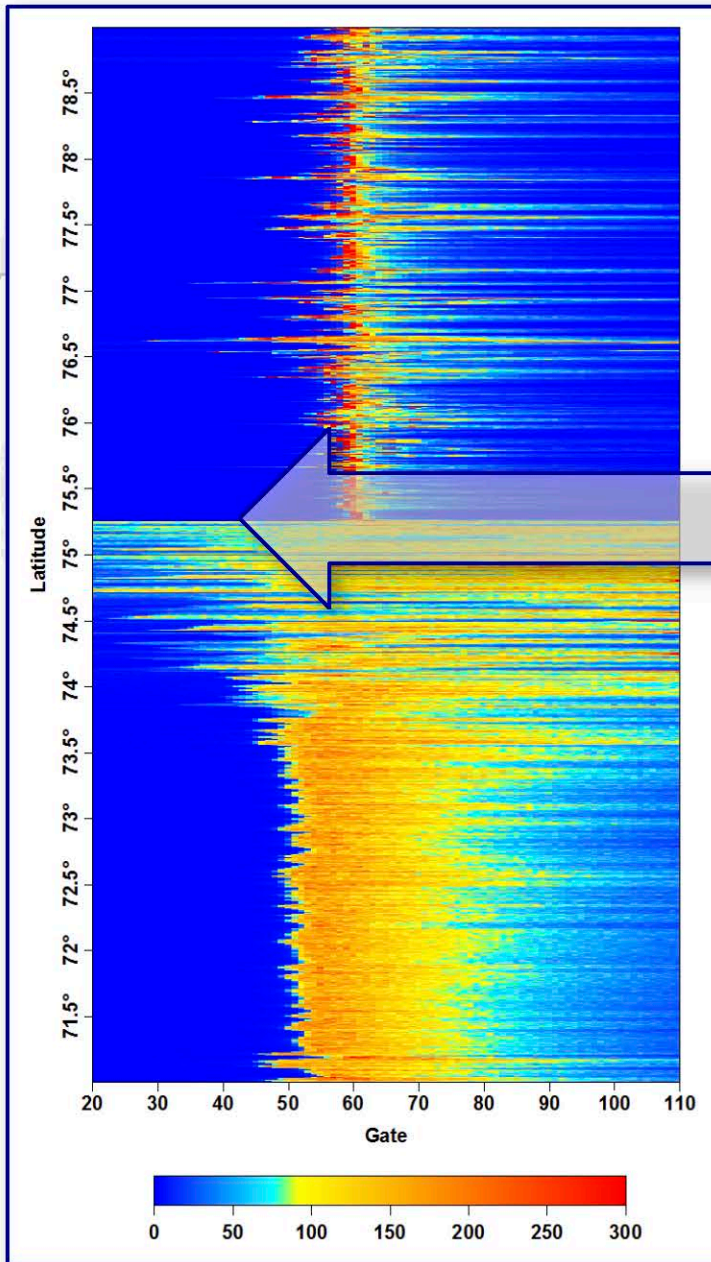
# Метод идентификации положения кромки льда



Зависимость мощности отраженного сигнала от широты вдоль 216 трека спутника SARAL/AltiKa для 104 цикла (12 декабря 2016 г.).



# Метод идентификации положения кромки льда



*Положение кромки льда*

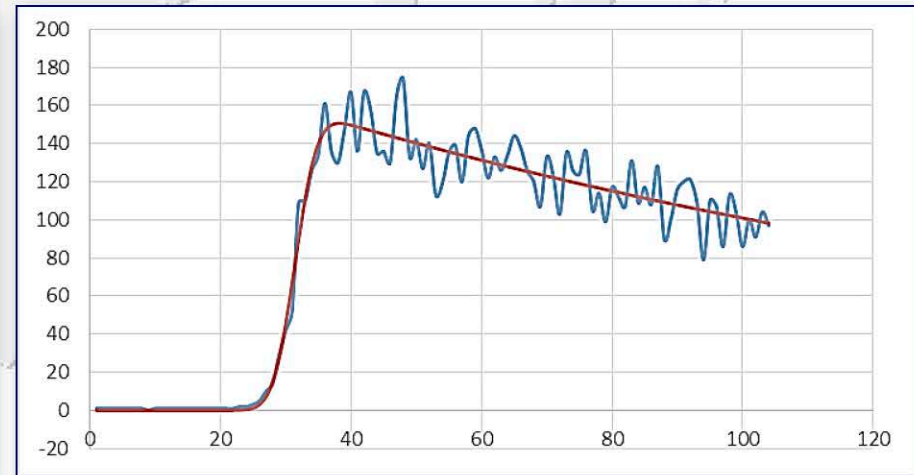
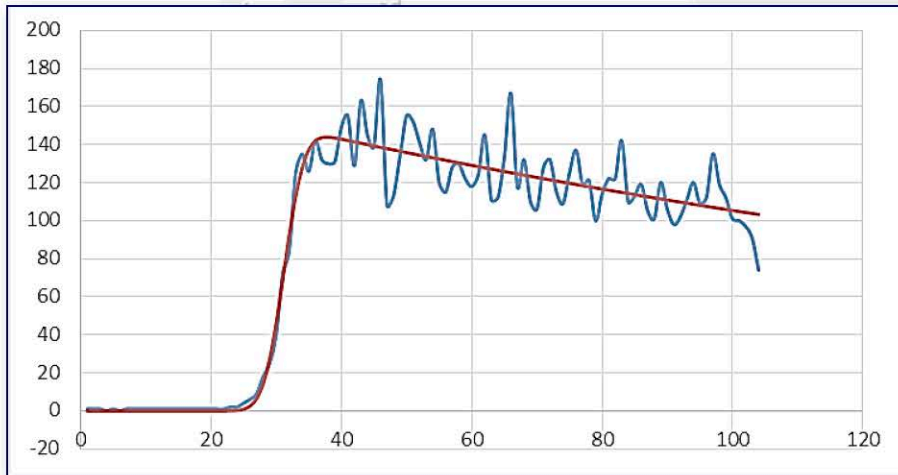
**Зависимость мощности отраженного сигнала от широты вдоль 216 трека спутника SARAL/AltiKa для 104 цикла (12 декабря 2016 г.).**



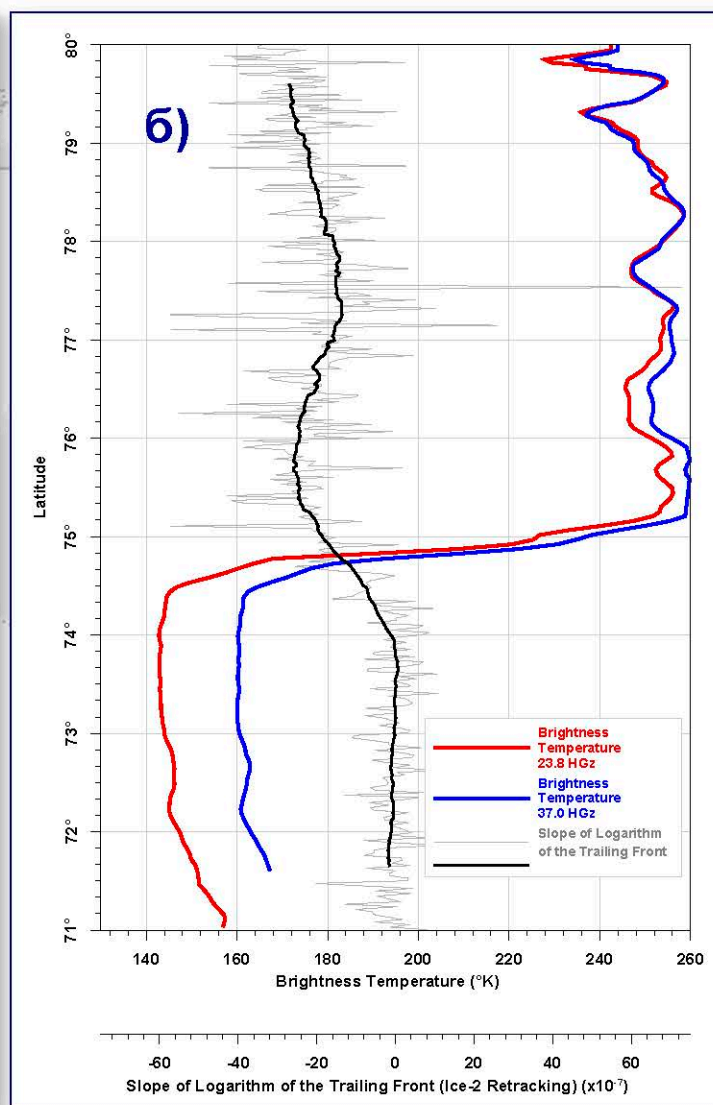
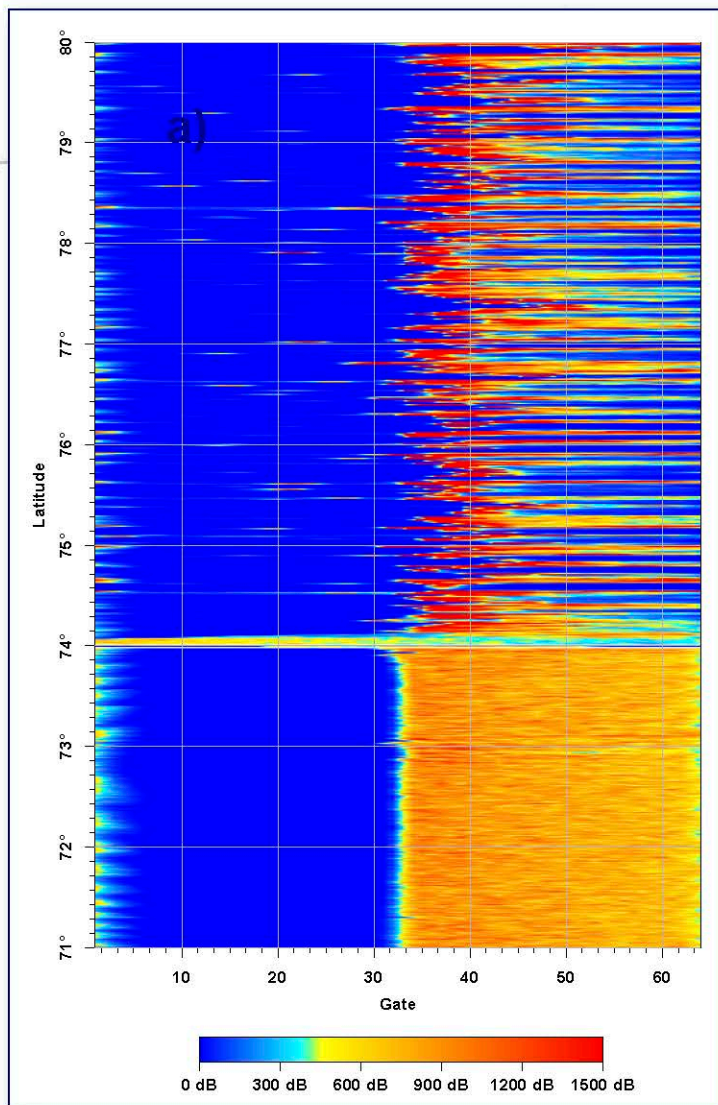
# Алгоритм ретрекинга Ice-2

$$P(t) = \frac{P_u}{2} \exp(S_T(t - \tau)) \left( 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{t - \tau}{\sigma_L} \right) \right) + P_n$$

- $P_u$  – амплитуда отраженного сигнала
- $S_T$  – угол отклонения антенны от положения надира
- $\tau$  – «эпоха», номер гейта
- $\sigma_L$  – **наклон логарифма задней фронта**
- $P_n$  – уровень теплового шума



# Метод идентификации положения кромки льда



Изменчивость мощности отраженного импульса (а), радиояркостных температур на частотах 23,8 и 37 ГГц и коэффициента экспоненциального наклона заднего фронта алгоритма ретрекинга Ice-2 (б) вдоль 118 трека на основании альтиметрических измерений альтиметра RA спутника ERS-2 (11 цикл, 6 мая 1996 г.).

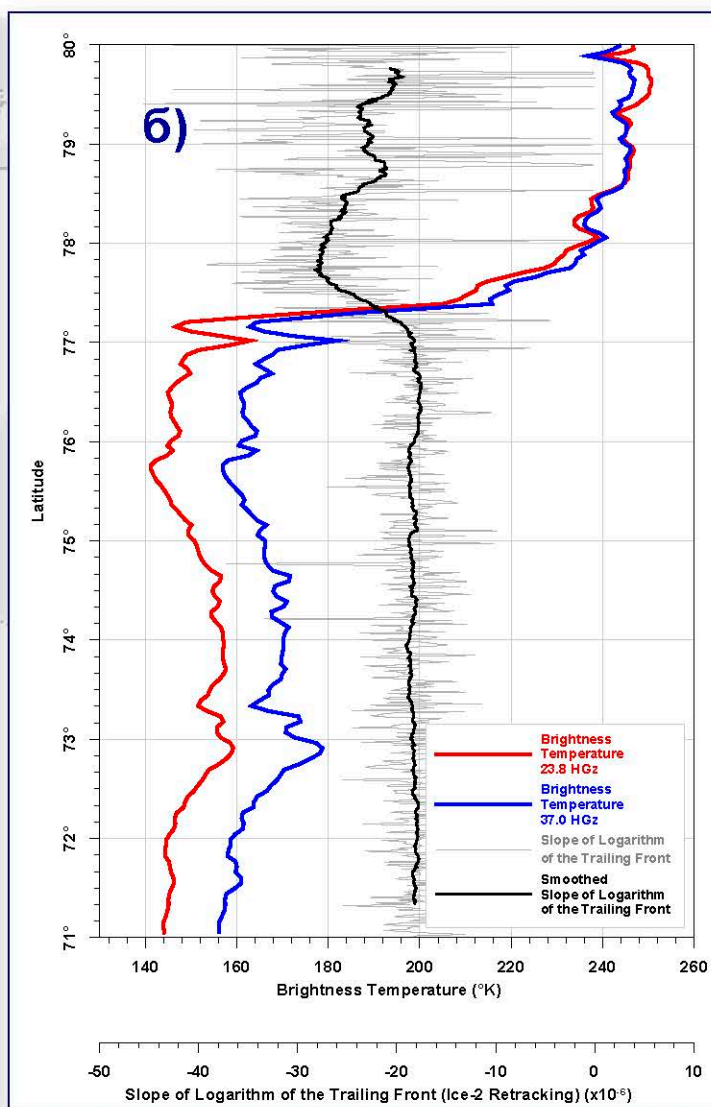
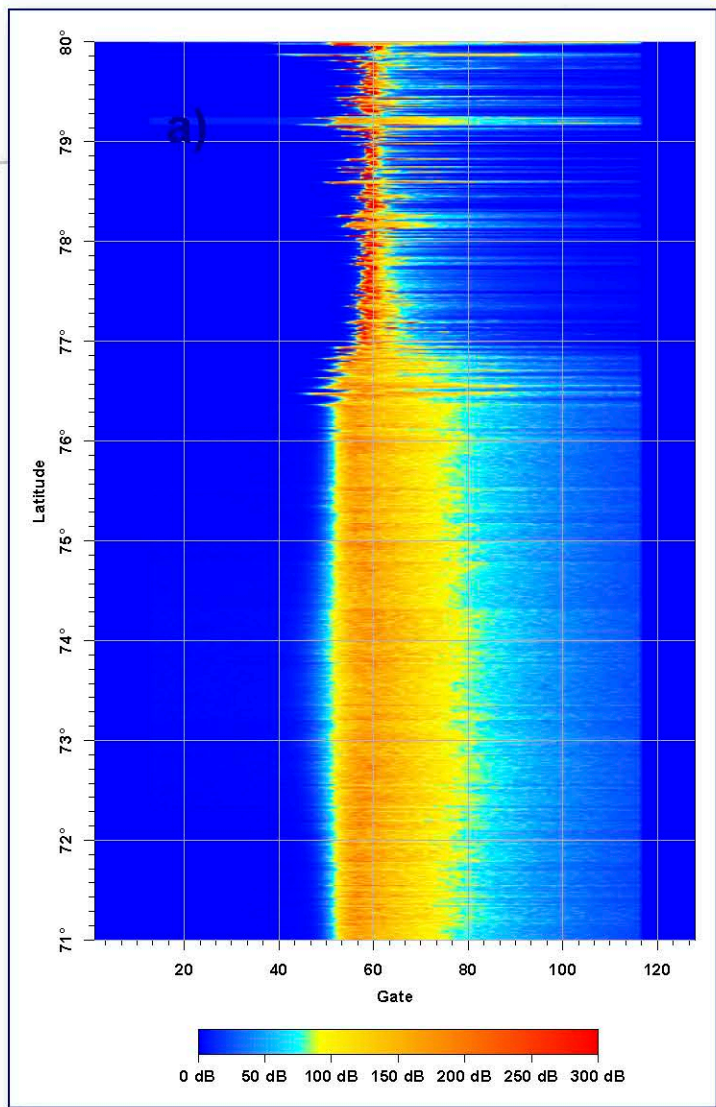


«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Метод идентификации положения кромки льда



Изменчивость мощности отраженного импульса (а), радиоярких температур на частотах 23,8 и 37 ГГц и коэффициента экспоненциально го наклон заднего фронта алгоритма ретрекинга Ice-2 (б) вдоль 118 трека на основании альтиметрических измерений альтиметра AltiKA спутника SARAL (20 цикл, 14 января 2015 г.).



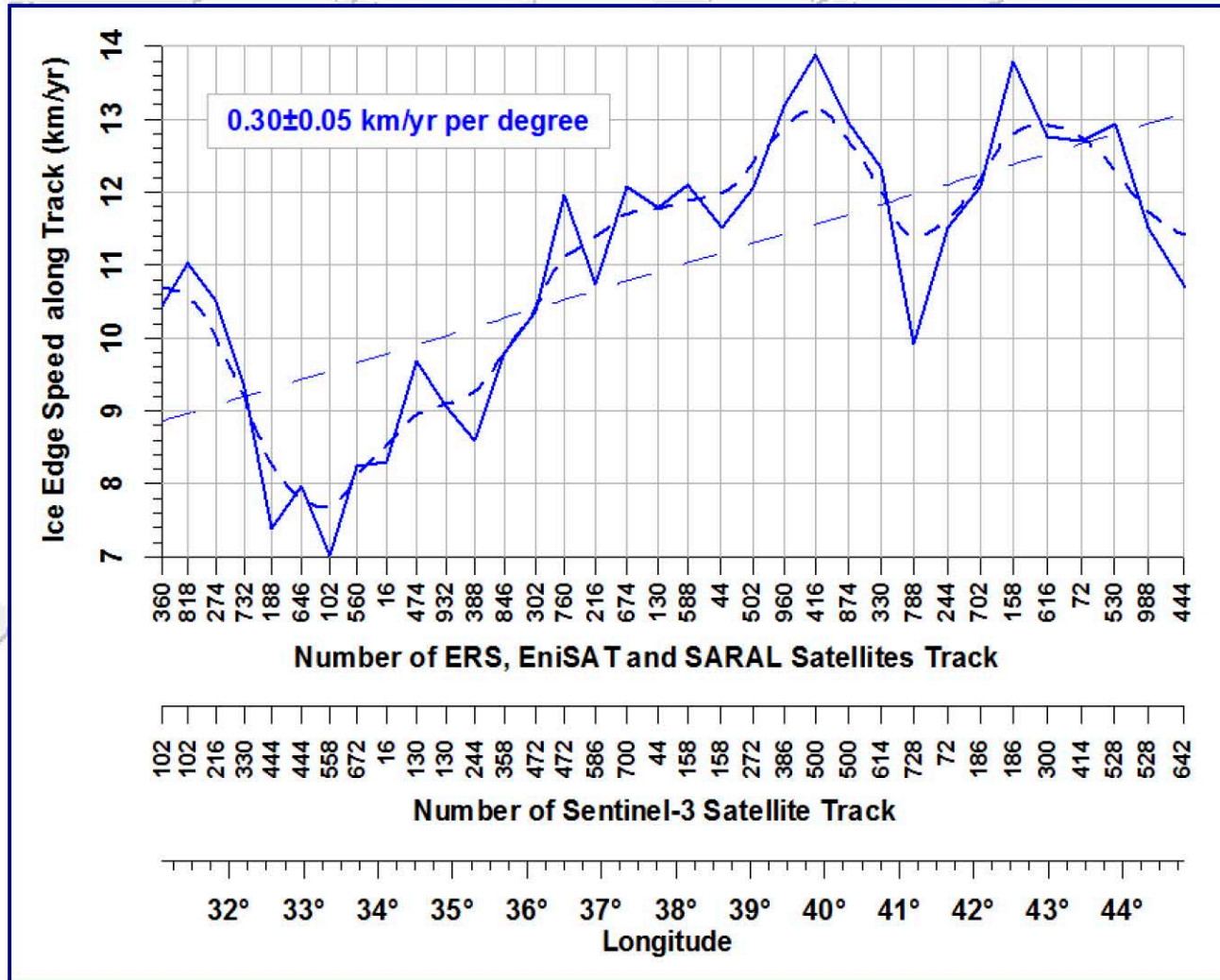
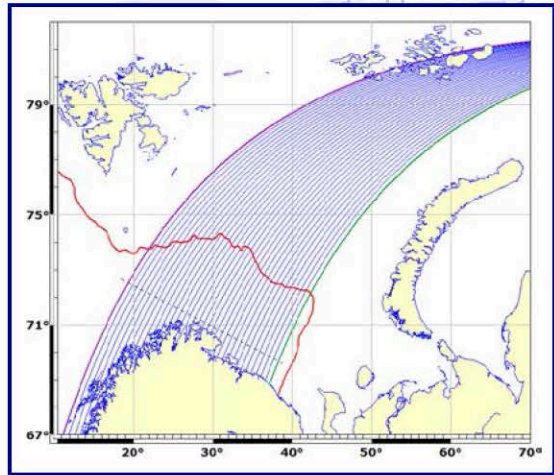
«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев





# Климатическая изменчивость положения кромки льда в Баренцевом море

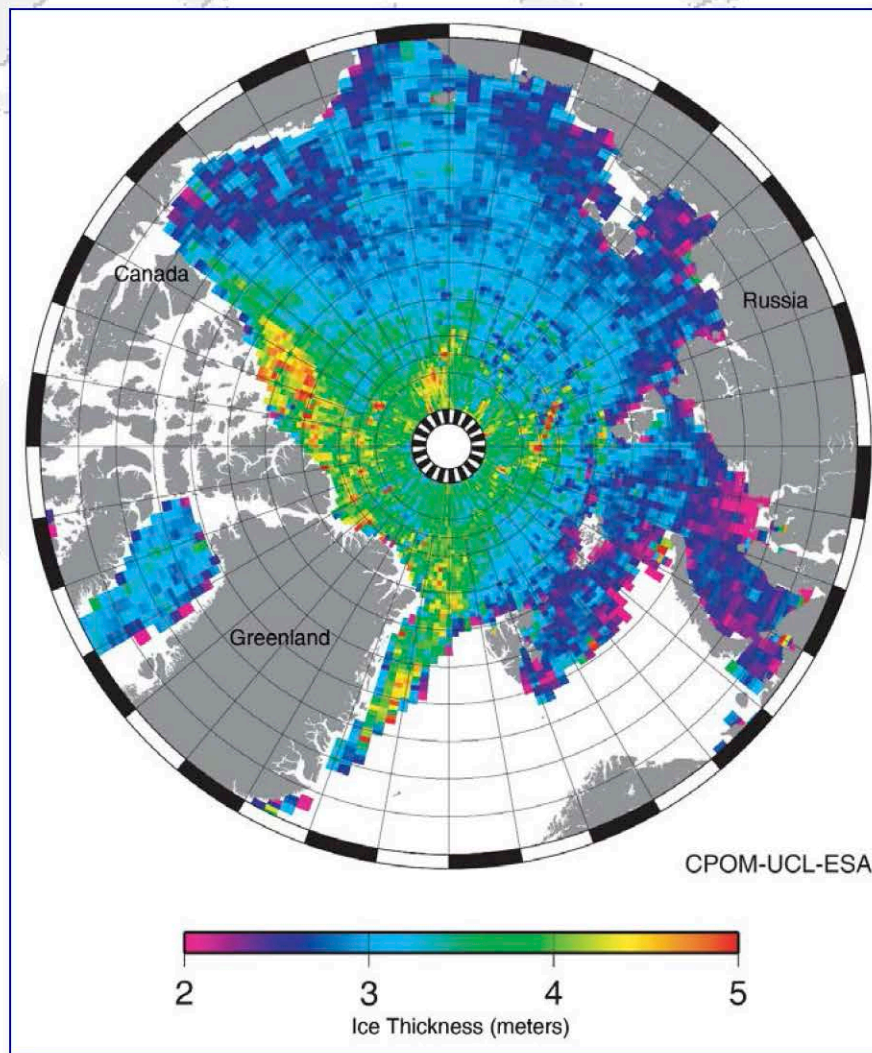


«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Дистанционные измерения морского льда спутниковой альтиметрии



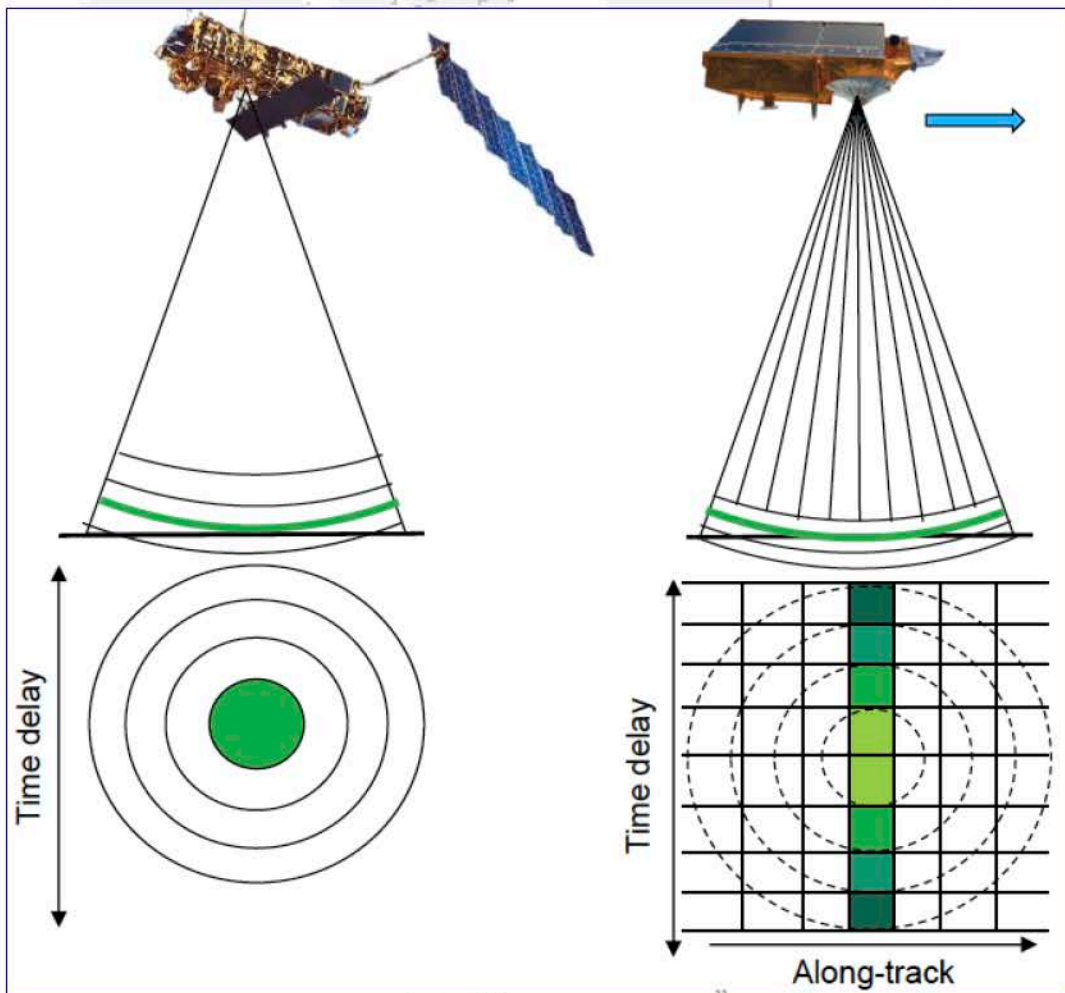
*Карта толщины морского льда в Арктике за январь и февраль 2011 г. По данным спутника CryoSat-2.*

«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Дистанционные измерения морского льда спутниковой альтиметрии



Радар альтиметр SRAL (Synthetic aperture Radar Altimeter) спутника Sentinel-3

Рабочая частота, ГГц	5,4 13,58
Пространственное разрешение в надире, м	300 (SAR mode) 20 000 (вдоль траектории)
Период повторной съемки	27 суток, в зависимости от широты места съемки

*Принципиальная схема измерений альтиметра с синтезированной апертурой SRAL (Synthetic aperture Radar Altimeter) спутника Sentinel-3*



«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев

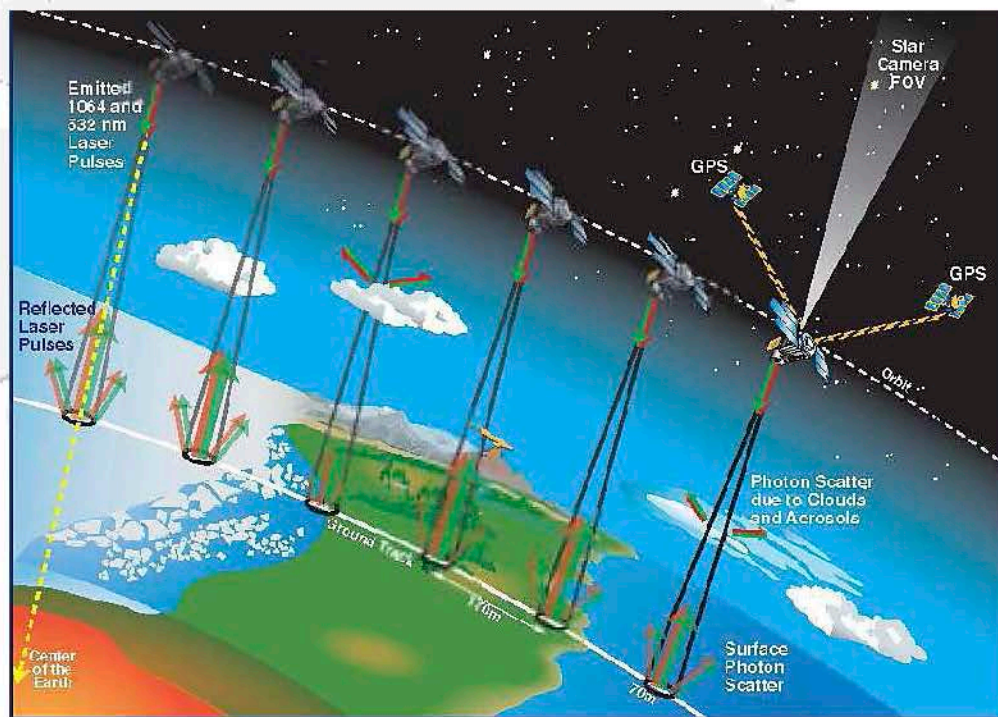


# Дистанционные измерения морского льда спутниковой альтиметрии

Радар альтиметр GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) спутника ICESat

Рабочая частота, нм	532 1064
Пространственное разрешение в надире, м	70
Расстояние между единичными измерениями, м	170
Период повторной съемки	183 суток, в зависимости от широты места съемки

*Принципиальная схема измерений альтиметра с синтезированной апертурой GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) спутника ICESat*

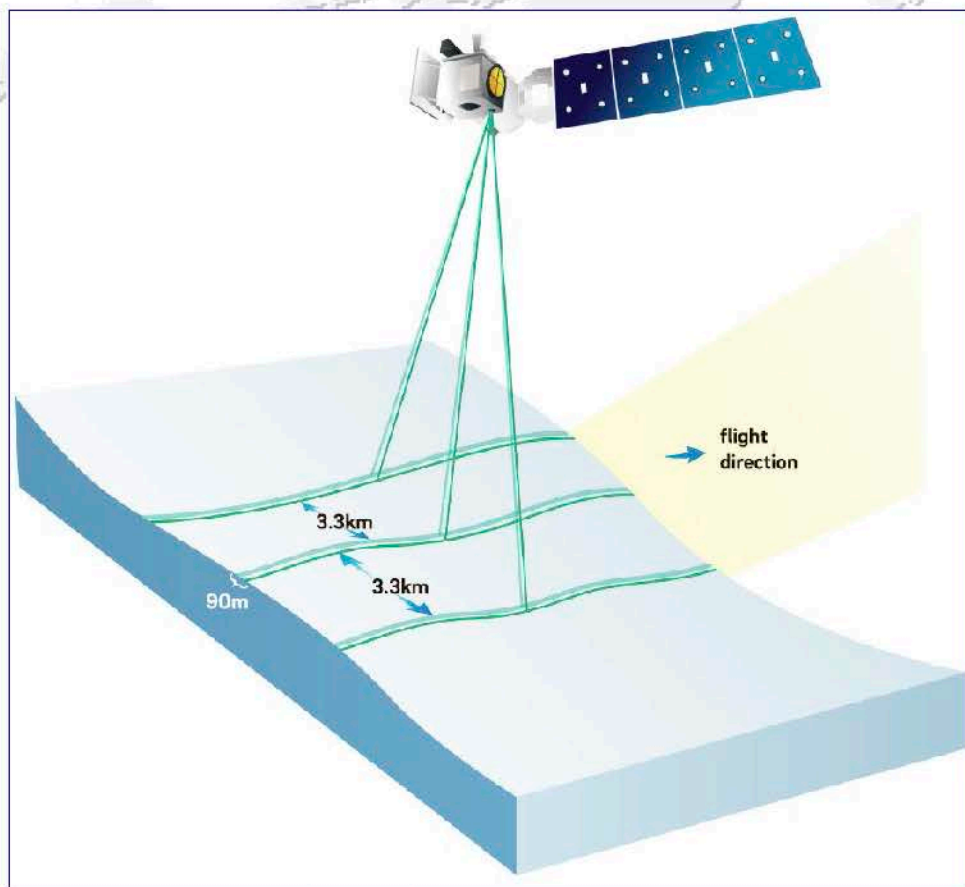


«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Дистанционные измерения морского льда спутниковой альтиметрии



## Радар альтиметр ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) спутника ICESat-2

Рабочая частота, нм	1064
Пространственное разрешение в надире, м	66
Расстояние между единичными измерениями, м	170
Расстояние между полосами измерений, км	3,3
Период повторной съемки	183 суток, в зависимости от широты места съемки

*Принципиальная схема измерений альтиметра с синтезированной апертурой ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) спутника ICESat-2*

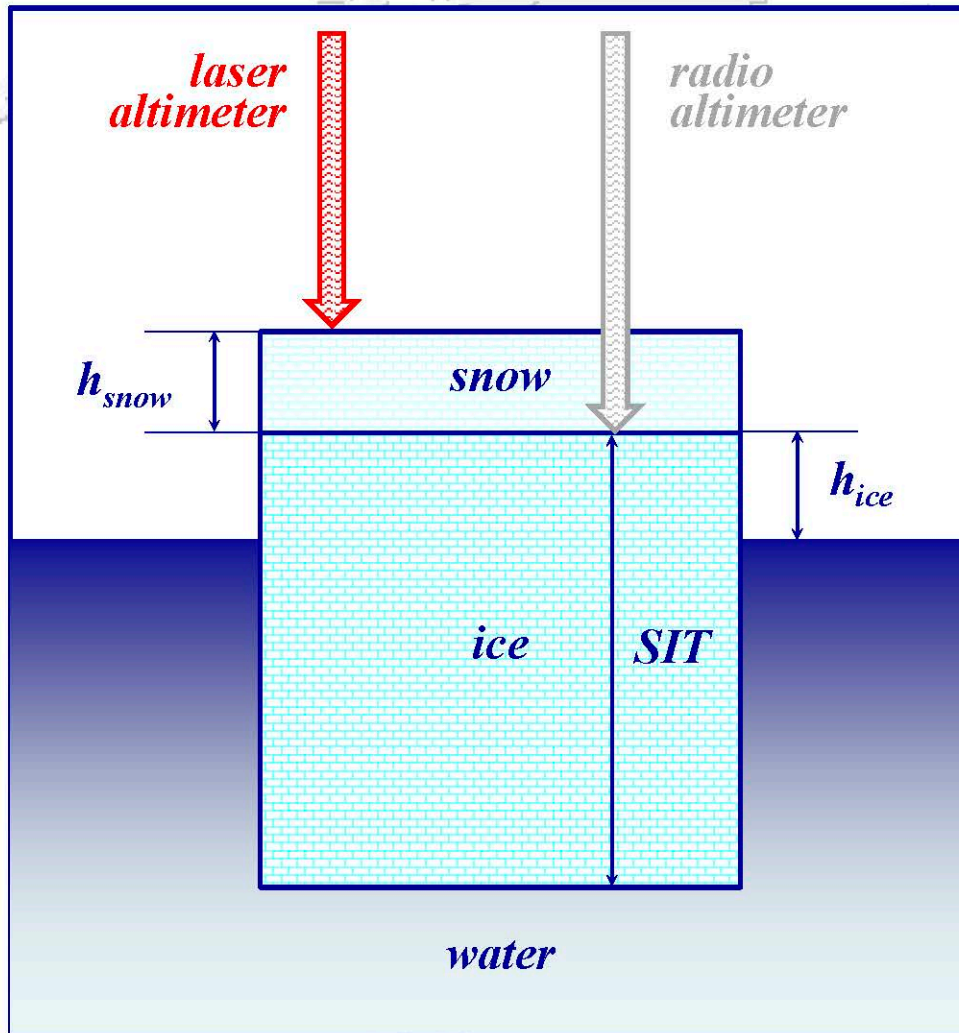


«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Алгоритм расчета толщины льда



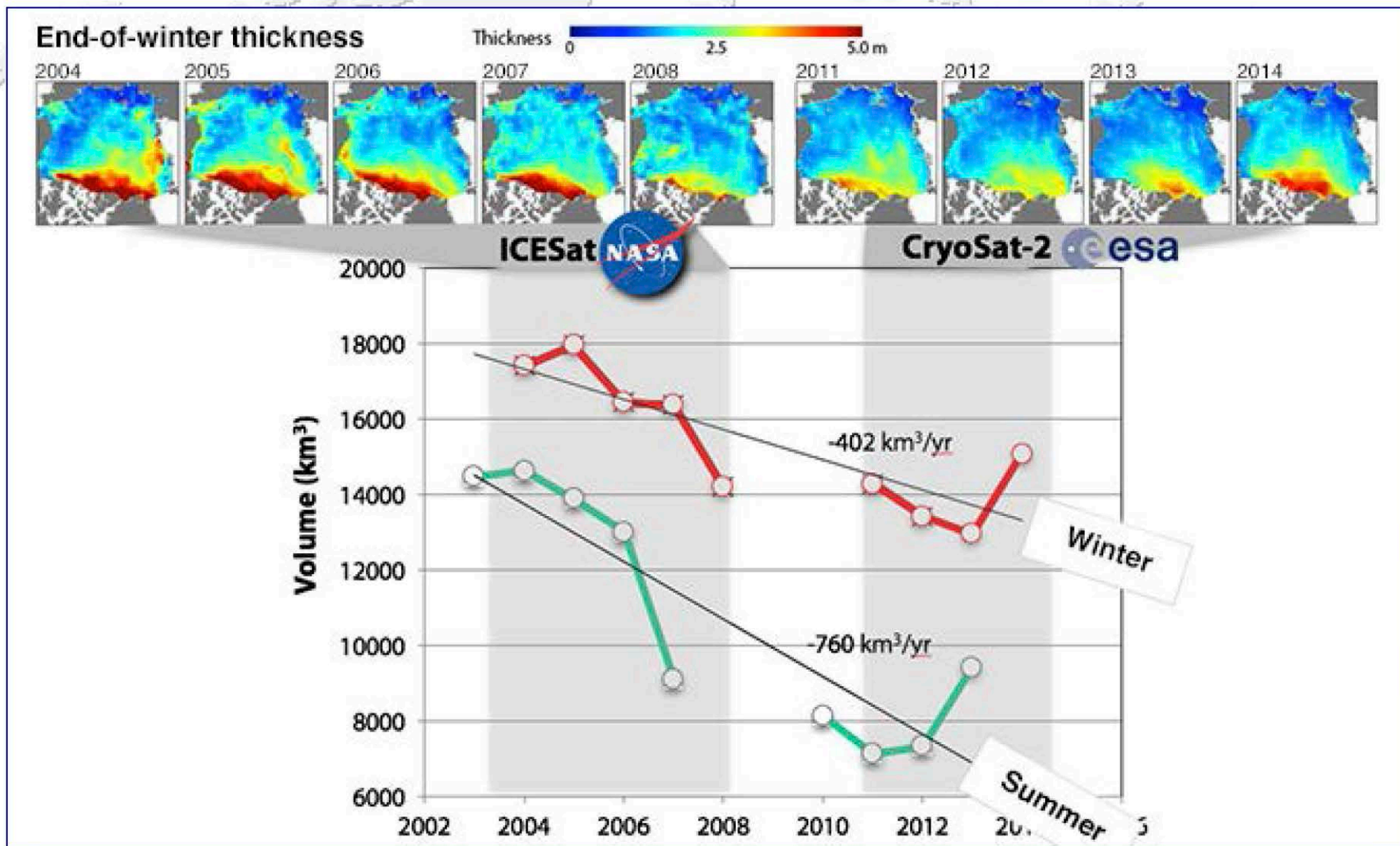
Для расчета толщины морского льда (sea-ice thickness - SIT) используется гидростатическое равновесие между покрытым снегом морским льдом и океаном:

$$SIT = \frac{h_{snow}\rho_{snow} + h_{ice}\rho_{ice}}{\rho_{water} - \rho_{ice}}$$

где  $h_{snow}$  – толщина снежного покрова,  $\rho_{snow}$  – плотность снега,  $h_{ice}$  – толщина льда относительно поверхности моря,  $\rho_{ice}$  – плотность льда,  $\rho_{water}$  – плотность воды.



# Климатическая изменчивость толщины морского льда в Арктике



«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



# Заключение

## Преимущества различных методов дистанционного зондирования морского льда

Методы	Преимущества	Недостатки
<i>Пассивные методы зондирования</i>		
Радиометр видимого диапазона	Высокое пространственное разрешение	Чувствительность к облачному покрову и времени суток. Низкая частота повторного обзора.
Радиометр инфракрасного диапазона	Хорошее пространственное разрешение. Высокая частота повторного обзора.	Чувствительность к облачному покрову
Радиометр микроволнового диапазона	Всепогодность. Высокая частота повторного обзора.	Низкое пространственное разрешение
<i>Активные методы зондирования</i>		
Радар с синтезированной апертурой	Всепогодность. Высокое пространственное разрешение.	Низкая частота повторного обзора.
Скаттерометрия	Всепогодность. Высокая частота повторного обзора.	Низкое пространственное разрешение
Альтиметрия	Всепогодность.	Измерения в надир вдоль треков. Низкая частота повторного обзора.

«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022







**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**



«Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике», Московская область, 6–9 июня 2022

© 2022, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев



## **Лебедев Сергей Анатольевич**

Профессор, Доктор физико-математических наук

Ведущий научный сотрудник лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований Геофизического центра РАН

Ведущий научный сотрудник Майкопского государственного технологического университета

Профессор Московского института электронной техники

Почетный профессор Тверского государственного университета

[info@gcras.ru](mailto:info@gcras.ru)