ААНИИ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В АРКТИКЕ

И.А. Бычкова, ААНИИ

Школа молодых ученых

26 ноября 2020 г. РГГМУ, Санкт-Петербург

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ – это сбор информации об объекте или явлении с помощью регистрирующего прибора, не находящегося в непосредственном контакте с данным объектом или явлением.

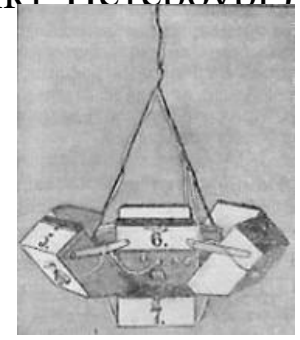
Основные вехи в истории дистанционного зондирования

1839 г. Дагер изобрел способ фотопечати (дагеротип)

1858 г. – первая съемка с воздушного шара (Г. Надар, Париж)

1861 г. – первая цветная фотография (Дж. Максвелл)

1886 г. – первая АФС с воздушного шара в России (А.М. Кованько, Санкт-Петербург)



1898 г. Изобретение Р.Ю.Тиле (Россия) панорамографа.

1910 г. - Первая АФС с самолета в России. (Севастополь)

1913 г. – выпуск российского аэрофотоаппарата Потте

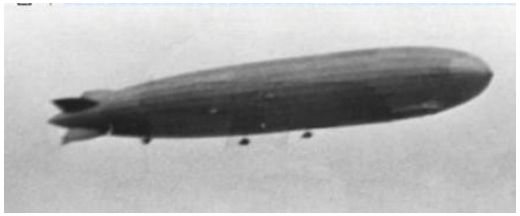
1931 г. - Первая аэрофотосъемка Арктики, выполнена в с дирижабля «Граф Цеппелин»

1950-е - начало перехода от пленок к цифровой технике съемки

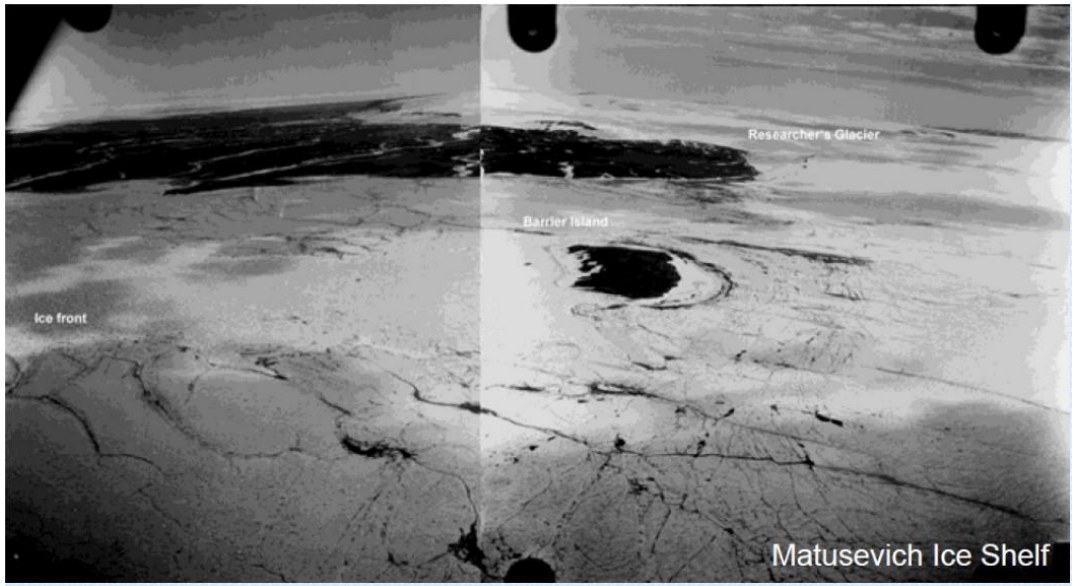
1960-е – первые съемки с авиационных носителей ИК-радиометрами и радиолокаторами

1960-е – разработка дронов для сбора информации, разведки

1961 г. - Начало спутниковой эры в картировании льдов



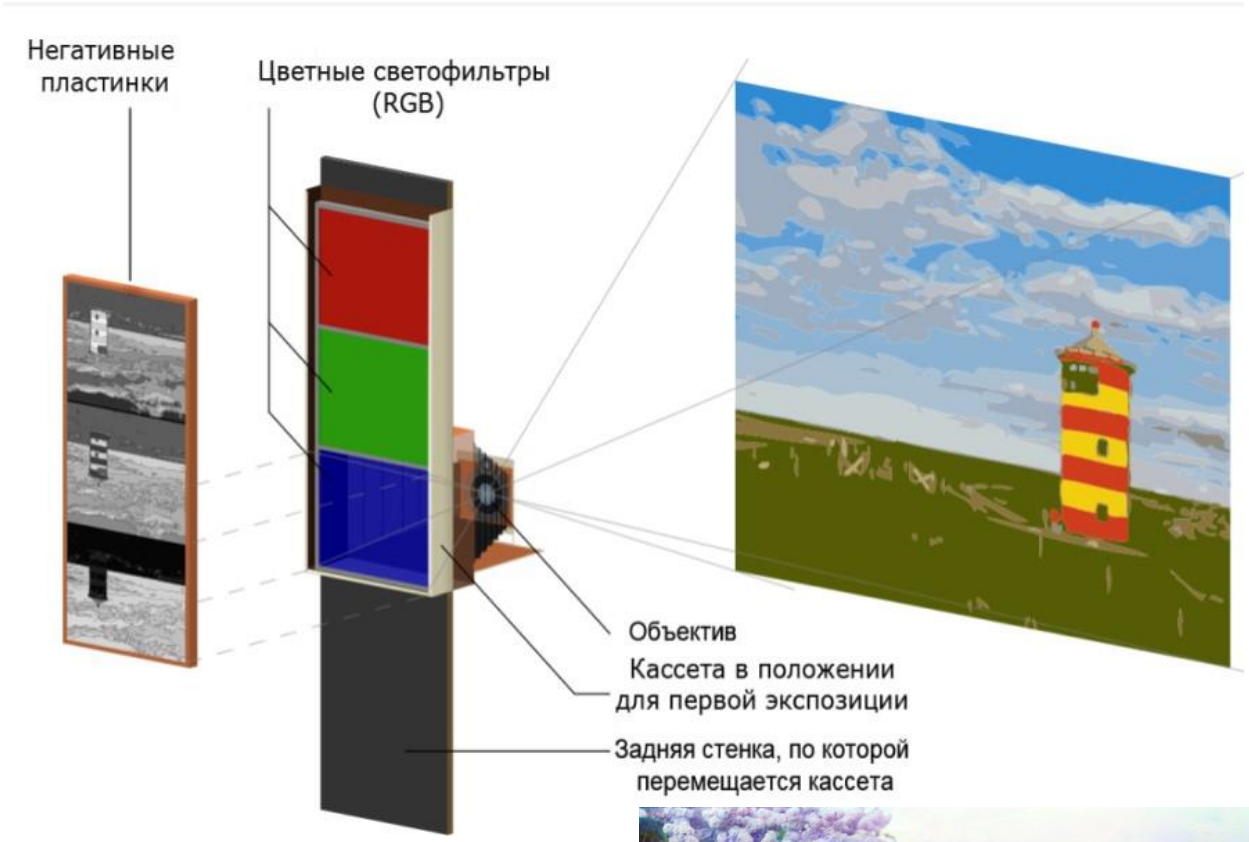
1858 г. Париж

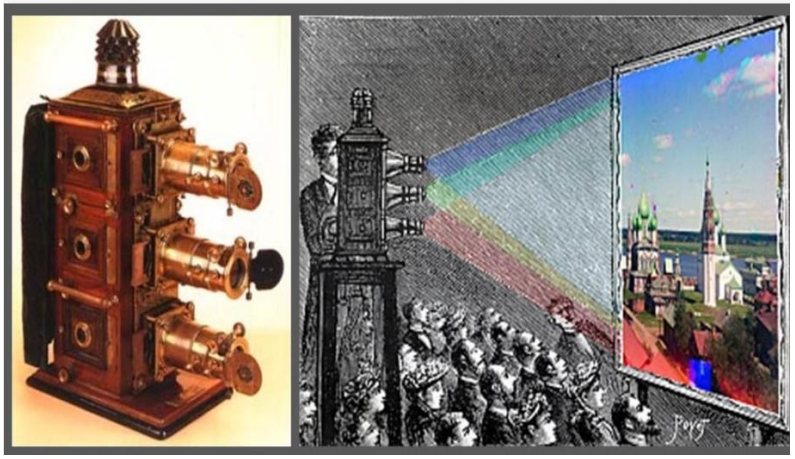


Фотография шельфового ледника фьорда Матусевича, полученная с борта дирижабля “Граф Цеппелин». 1931 г.
***Sharov A., Nikolskiy D., Troshko K., Zaprudova FRINGE2015, ESRIN, Frascati, 24.03.215. N*58.**

1886 г. Санкт-Петербург

Российский изобретатель **С.М. Прокудин-Горский** в 1906 году запатентовал свой сенсибилизатор, который расширил чувствительность бромосеребряной пластины равномерно на весь видимый спектральный диапазон.





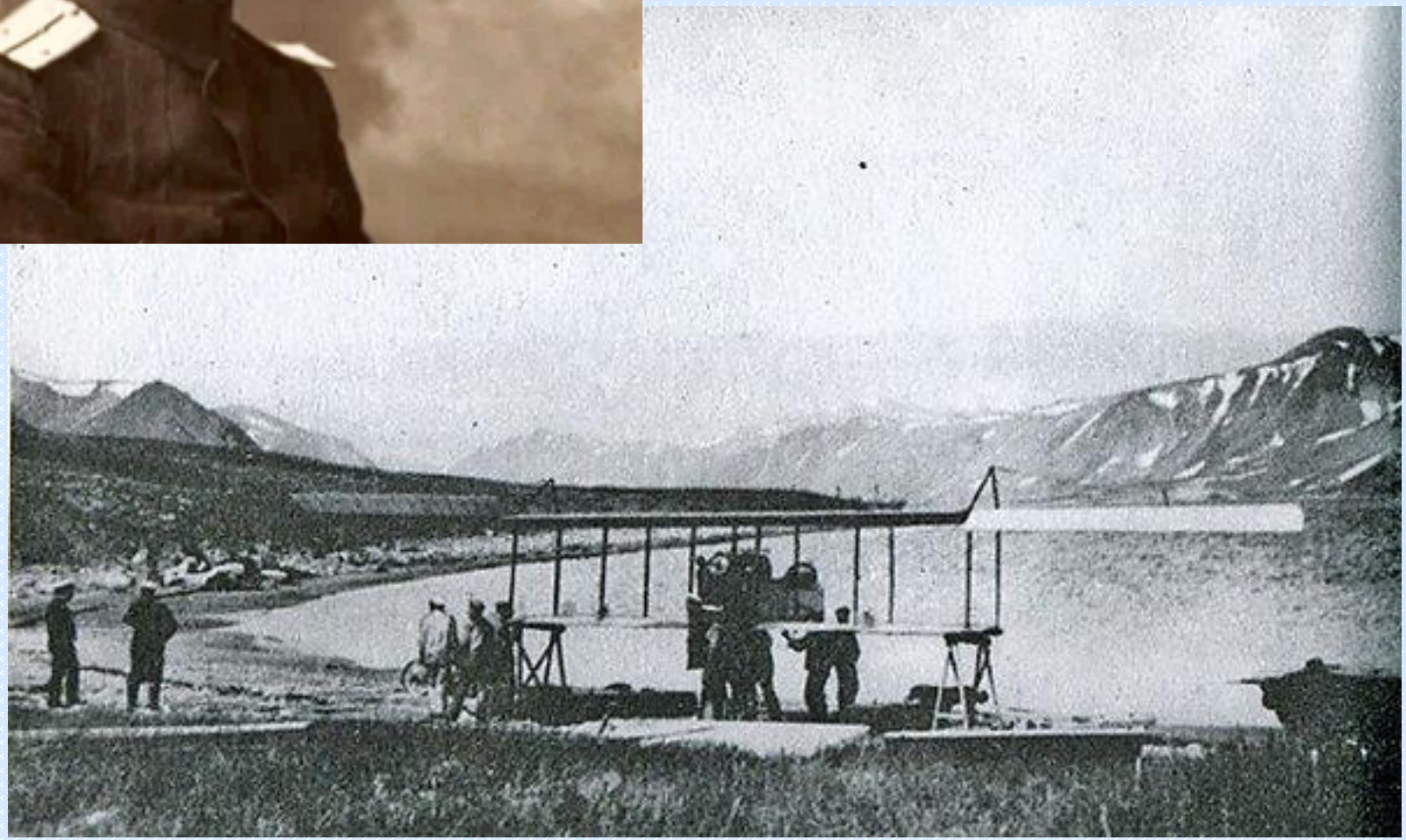
Прокудин-Горский доработал фотокамеру, созданную А.Мите, и стал получать первые цветные фотоснимки

Гатчина. 1908.

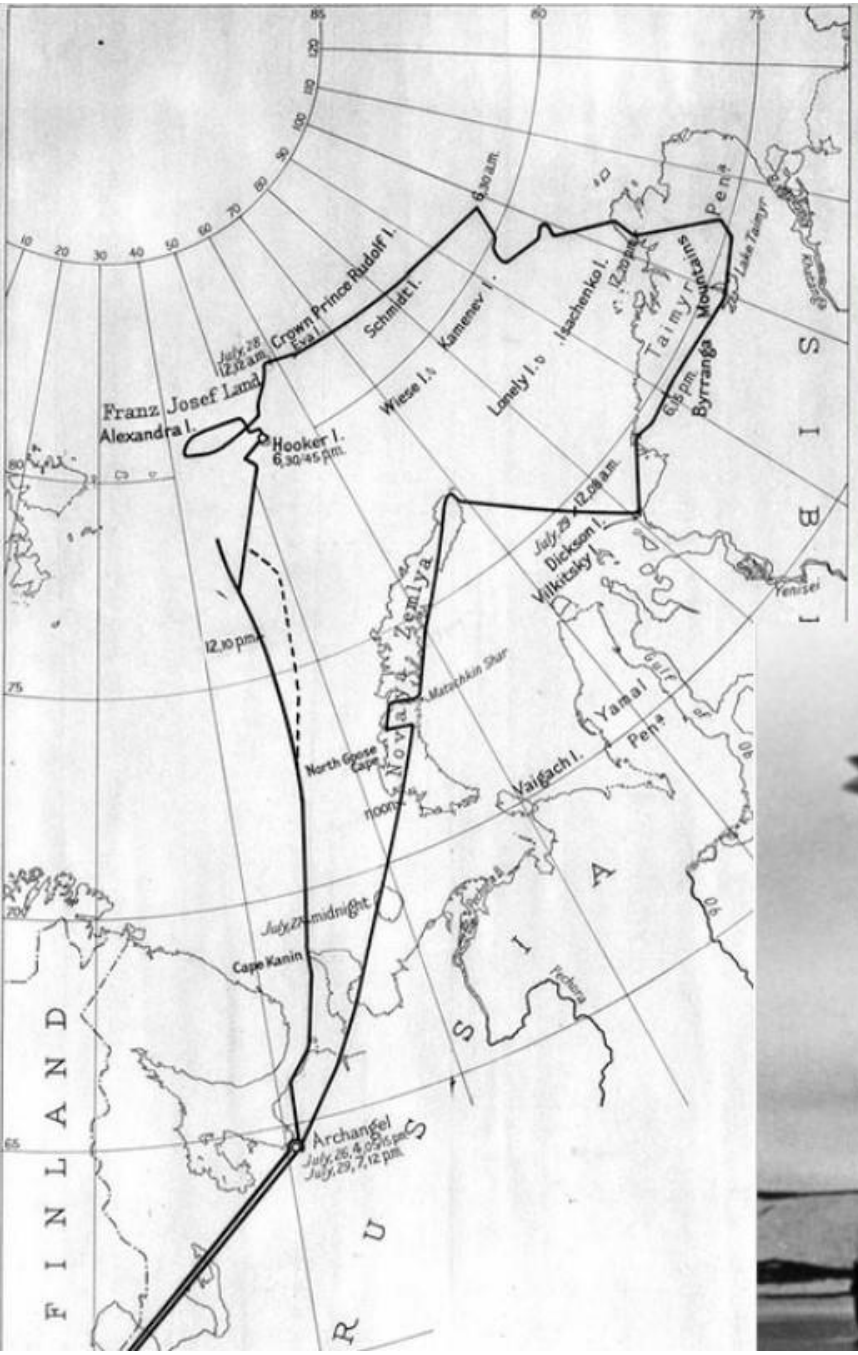
Плотина Св. Ксении. Вытегра. 1910 г. Фото Прокудина-Горского

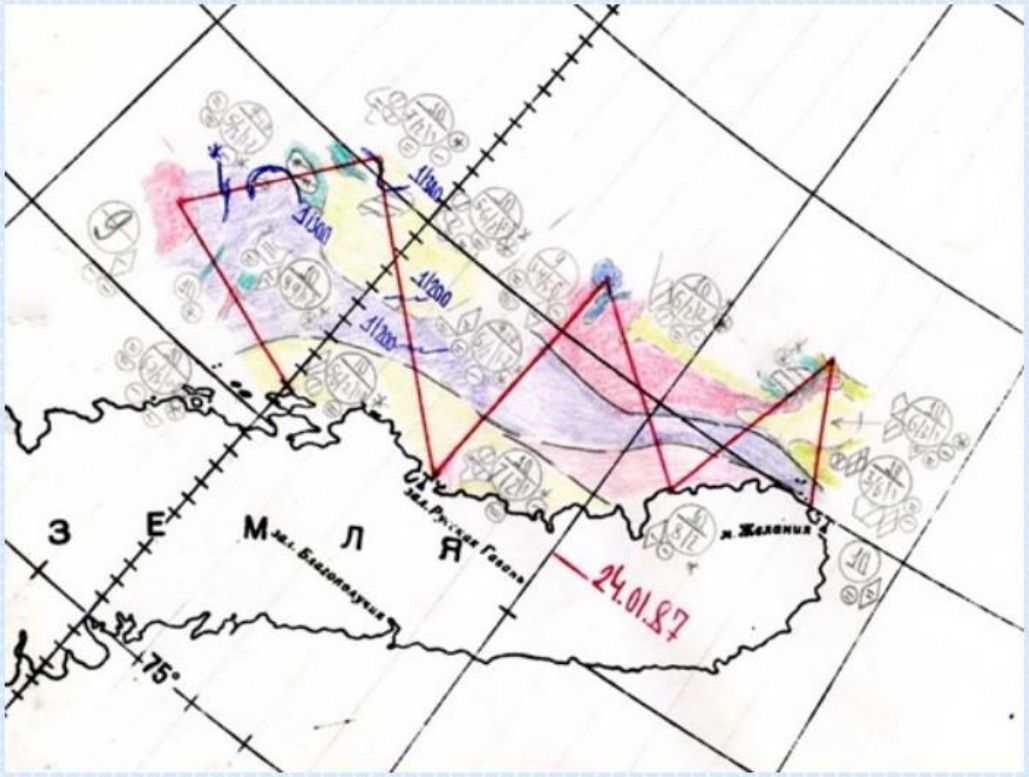
Первый полет в Арктике совершил 21 августа 1914 г. летчик Ян Нагурский

Самолет «Фарман»



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

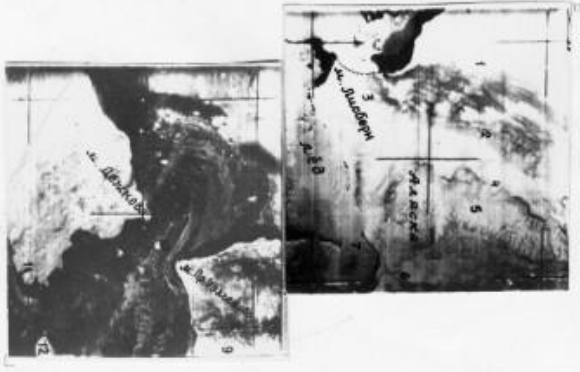




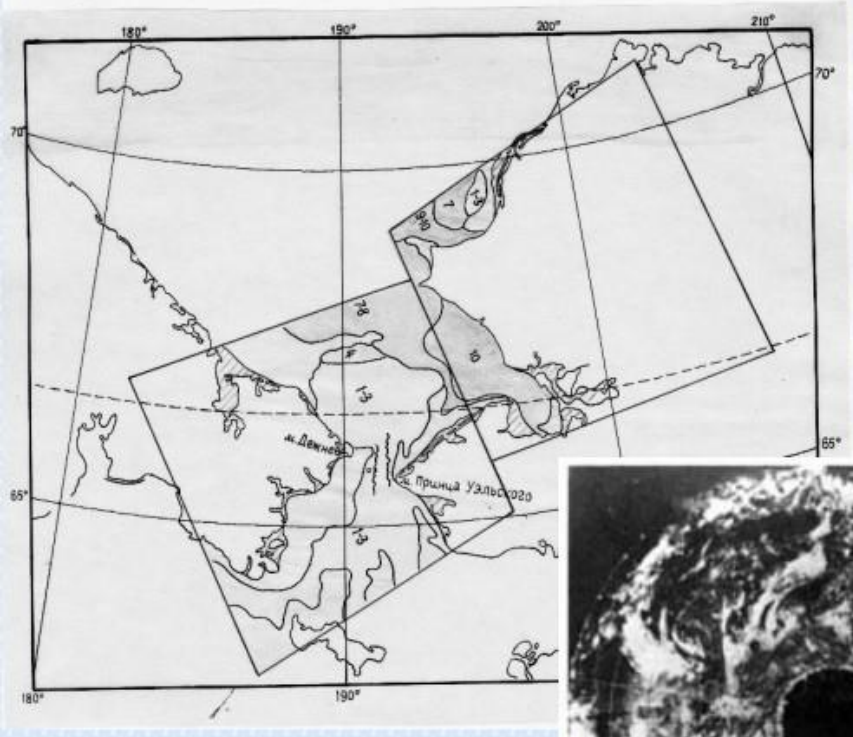
С 1952 г. наряду с визуальной ледовой разведкой в Арктике стали применять инструментальные методы. Испытывались навигационные панорамные РЛС, сканирующие и трассовые ИК радиометры, лазерные аэропрофилографы, СВЧ радиометры. Но в практику ледовой разведки они не были внедрены. В 1965 г. выполнены первые полеты с РЛС БО, а с 1968 г. эксплуатировалась РЛС БО “Торос. С 1973 г. испытывался радиолокационный видеоимпульсный измеритель толщины морского льда, ставший в 1982 г. серийным “Аквамарином”. В 1991 г. самолетная ледовая разведка в Арктике прекратилась.

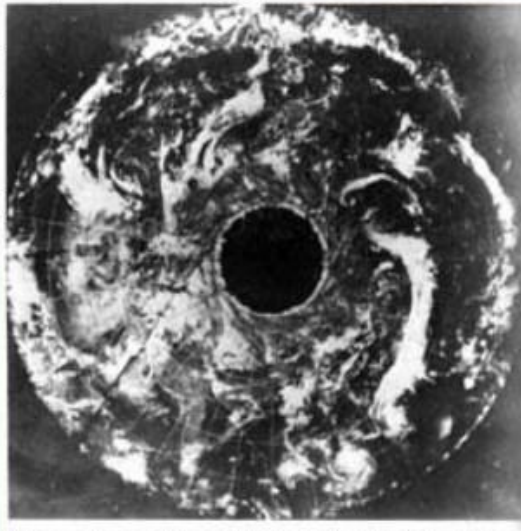
В 1960 г. в США был запущен спутник «Тайрос - 1 » с ТВ камерами на борту. В 1961 г. появились публикации о возможности использования спутниковых снимков для наблюдения за морскими льдами. В 1966 г. в США был запущен спутник ESSA - 2 , его сканирующий радиометр при ширине полосы около 1000 км имел разрешение 2,5 км в надире и около 8 км на краю снимка. В том же году был запущен отечественный спутник «Космос -122», осуществлявший покадровую съемку двумя камерами с отклоненными от вертикали оптическим осями. Ширина полосы захвата с высот 600 -700 км: около 1000 км, а разрешающая способность – 1,5 – 2 км.

ААНИИ впервые получил от ГМЦ СССР телевизионные снимки ESSA и «Космос - 122 » летом 1966 г. Снимки пересылались по почте или передавались с проводниками вагонов. В результате было, был получен первый опыт дешифрирования морских льдов по спутниковым снимкам, составлено около 20 карт.



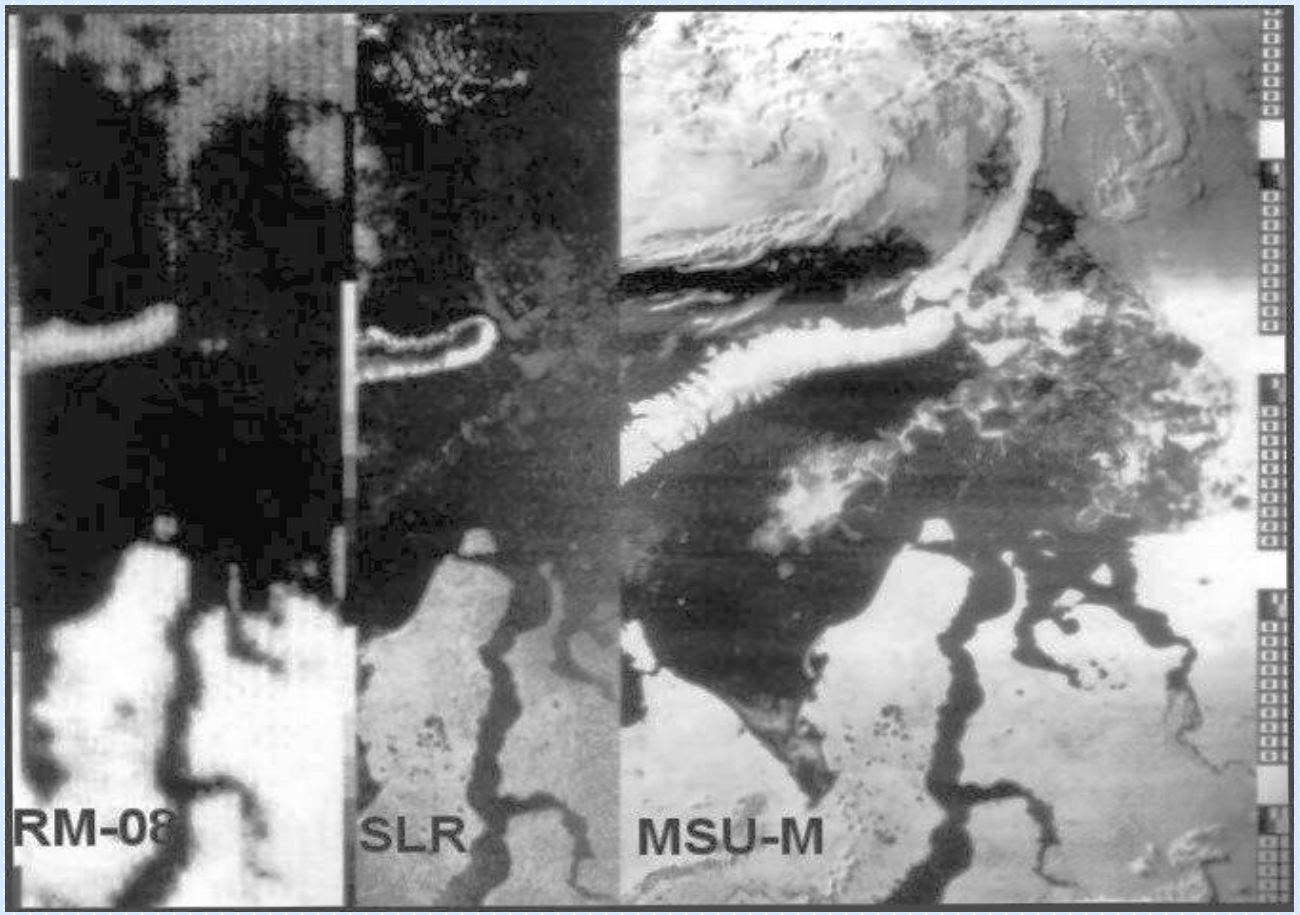
Снимки ИСЗ «Космос-144» и составленная по ним в ААНИИ ледовая карта.



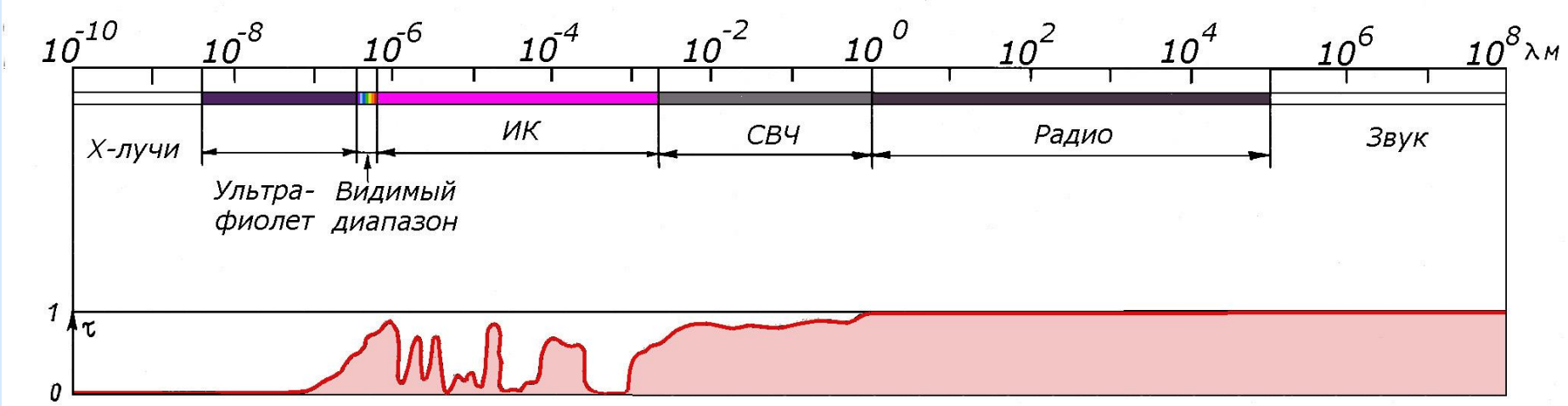


The remarkable photograph taken by the ESSA-7 satellite o
23 November 1968. There is almost no cloud cover; the ic
fields on the surface can be observed, and the hole at the Nort

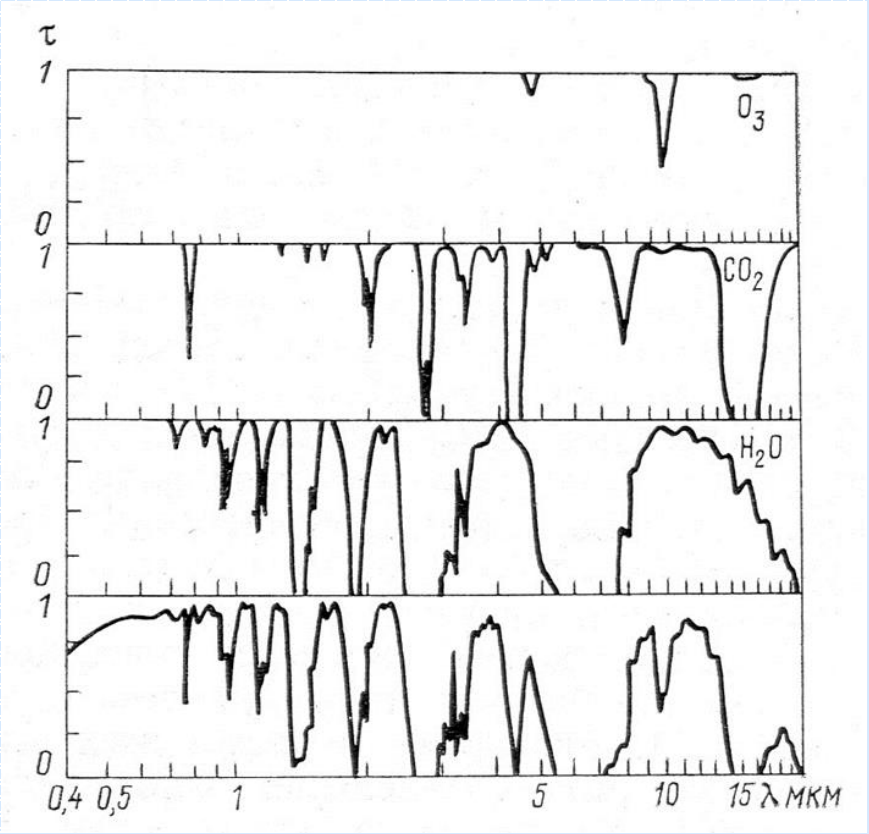
1983 г. – запуск ИСЗ «Океан». Основное назначение спутника – наблюдение за ледовой обстановкой на морях.



Пример регистрации совмещенных изображений (РМ-08 + РБО-(SLR) +МСУ-М) спутника «Океан» на наземной станции приема
МСУ-М: разрешение 2 км, полоса обзора 1900 км. Каналы 0,5-0,6; 0,6-0,7; 0,7-0,8; 0,8-1,1 мкм



Спектр электромагнитного излучения поверхности Земли



Оптический диапазон с длиной волны от 0,01 до 1000 мкм. три поддиапазона: *ультрафиолетовое* излучение - λ=0,01-0,4 мкм, *видимое* излучение - λ=0,4-0,75 мкм и *инфракрасное* – λ=0,75-1000 мкм.

Спектр пропускания стандартной атмосферы при зондировании морской поверхности с ИСЗ

Характеристики излучения нагретых тел Законы излучения

Спектральная плотность излучения поверхности *(энергетическая светимость)* $\mathbf{m_{\lambda T}}$ Вт/(м².мкм)

Интегральная плотность $\mathbf{M_T}$ Вт/м^2

Спектральная яркость $\boldsymbol{l_{\lambda T}}$ Вт/(м²·ср·мкм)

Интегральная яркость $\mathbf{L_T}$ Вт/(м^2·ср)

Реальные излучатели: Излучательная способность $\boldsymbol{\varepsilon = L_T/L_{T0}}$

Формула Планка

$$\mathbf{m_{\lambda T} = 2\pi c_0^{\ 2} h\lambda^{-5}\{exp[hc_0/\lambda KT)]-1]-1\}^{-1}},$$

K- постоянная Больцмана, h – постоянная Планка, C_0 – скорость света

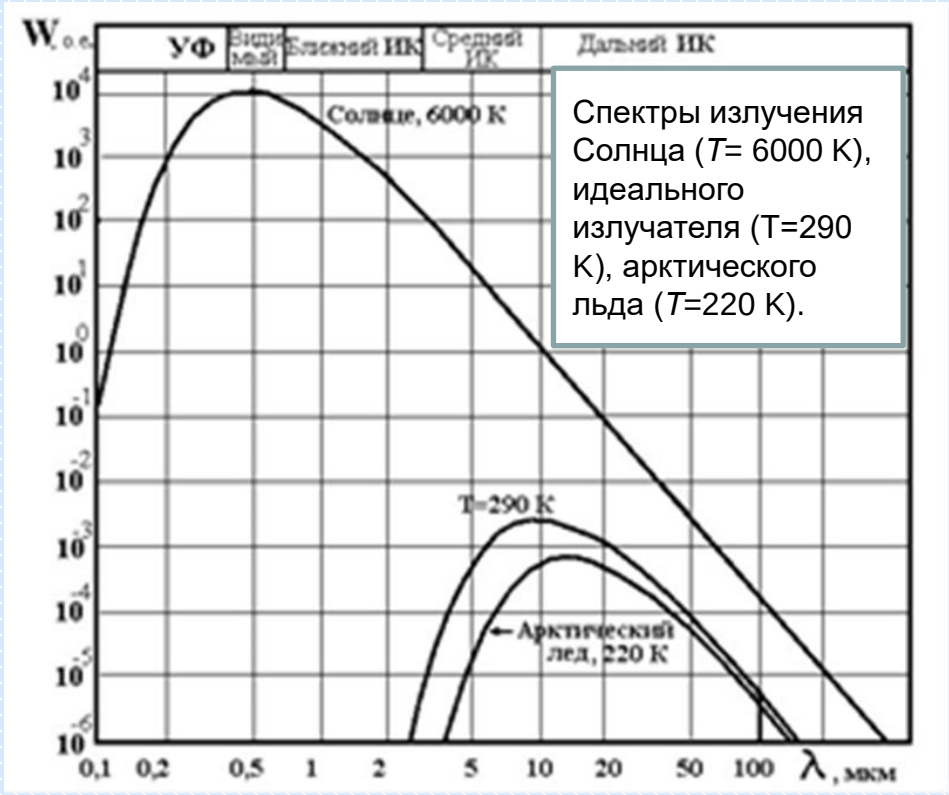
$$\mathbf{m\lambda T = \varepsilon\, c_1\, \lambda^{-5}(exp(c_2/\lambda T)-1]^{-1}}$$

Закон Стефана-Больцмана

$$\mathbf{M=\sigma T^4} \qquad \mathbf{M=\varepsilon\,\sigma T^4}$$

Закон Голицына-Вина

$$\boldsymbol{\lambda_{макс} = 2898/T}$$



Спектры излучения Солнца (*T*= 6000 K), идеального излучателя (T=290 K), арктического льда (*T*=220 K).

АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ по данным ИК-диапазона

ИК- излучение земной поверхности, воспринимаемое на орбите Земли дистанционным носителем ($L\lambda$), (в предположении нерассеивающей атмосферы):

$$L_\lambda = L_{\lambda S}\, t_\lambda (0, P_0) - \int_0^{P0} B_\lambda [T(P)] dt_\lambda (0, P), \quad (1)$$

где $L_{\lambda S}$ – энергетическая светимость земной поверхности приземного атмосферного давления P_0; 0, $t_\lambda(0, P_x)$– коэффициент пропускания атмосферы на уровне давления P_x, $B_\lambda(T)$ – функция Планка.

неучтенный эффект в суммарном излучении, связанный с атмосферой (ΔL_λ,)

$$\Delta L_\lambda = B_\lambda(T_0) - L_\lambda = \int_{P_o} [B_\lambda(T_0) - B_\lambda(T(_P)] dt_\lambda(0,P) \quad (2)$$

Аналогично для температурной поправки:

$\Delta T_\lambda = T_0 - T_\lambda$ (3)

Линейный алгоритм многоканальной коррекции (MCSST) для определения ТПМ–
(для расщепленного окна и для двойного окна в диапазоне 10-12 мкм)

основан на выражении:

$$Ts = \alpha + \beta T_i + \gamma(T_i - T_j)$$

где T_i – радиационная температура, измеряемая в различных спектральных зонах,
α, **β**, **γ** - параметрические коэффициенты, которые могут быть определены на практике при сопоставлении спутниковых наблюдений ТПМ и данных подспутниковых измерений.
Алгоритм **MCSST** сводится к общему параметрическому уравнению, полагая $a_o = a$, $a_1 = b + \gamma$, $a_2 = -\gamma$

Нелинейный алгоритм оценки ТПМ (NLSST, non-linear SST),
В общем случае, для двухволновых систем при оценке ТПМ используют выражение

$$T_s = a_0 + a_1 T_1 + a_2 T_2 + a_3 f(\theta),$$

где **f(θ)** - функция угла сканирования или зенитного угла. Это выражение для ТПМ позволяет уменьшить ошибки, связанные с большими углами сканирования. Дальнейшим развитием этого приближения стал алгоритм NLSST [Walton, 1990]. Алгоритм развит на базе оперативной информации о ТПМ, получаемой с AVHRR. ТПМ определяется по нелинейному алгоритму:

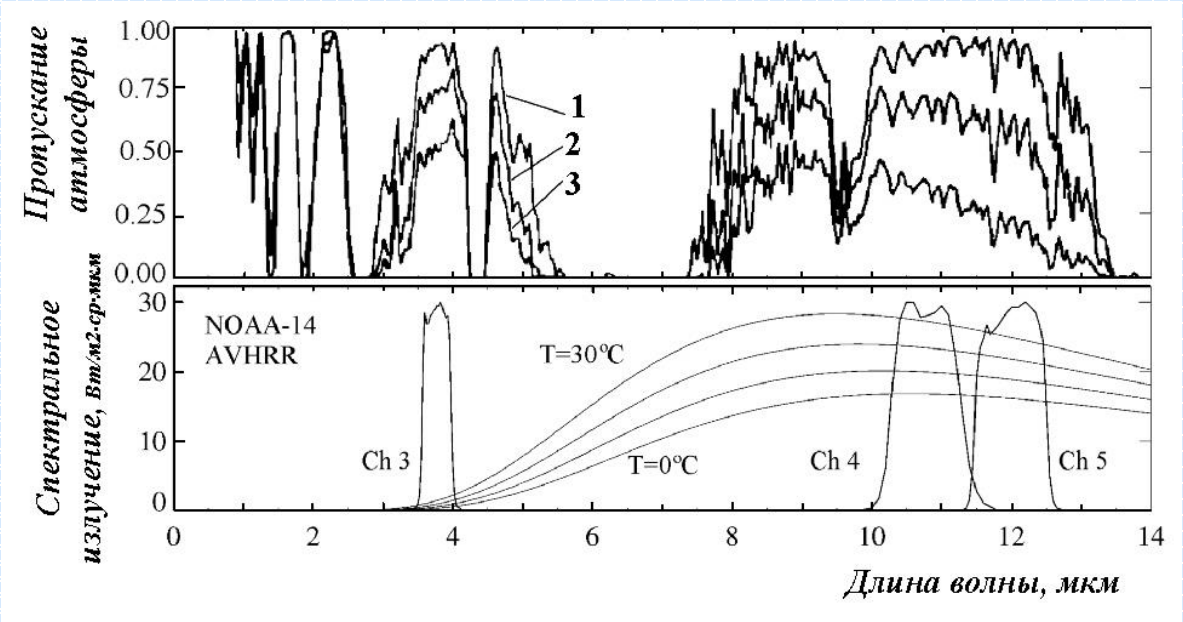
$$Ts = a_0' + a_1' T_1 + a_2' (T_1 - T_2) \cdot T_b + a_3' (\sec\theta - 1),$$

Где Tb - значение температуры окружающей среды, включаемое для уменьшения ошибок алгоритма в случае высоких значений температуры.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТПМ С ИСЗ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Необходимость разработки специализированных алгоритмов определения ТПМ для высоких широт, вблизи границы льдов, обусловлена тремя главными факторами:

- наличием здесь сухой атмосферы,
- большой разностью температур воздух-вода
- зависимостью температуры от излучательной способности в ИК-диапазоне



Сравнение характеристик атмосферы для разных широт [Minnett P, 2007]

1 – полярные районы, 2- среднеширотная атмосфера, 3 – тропики

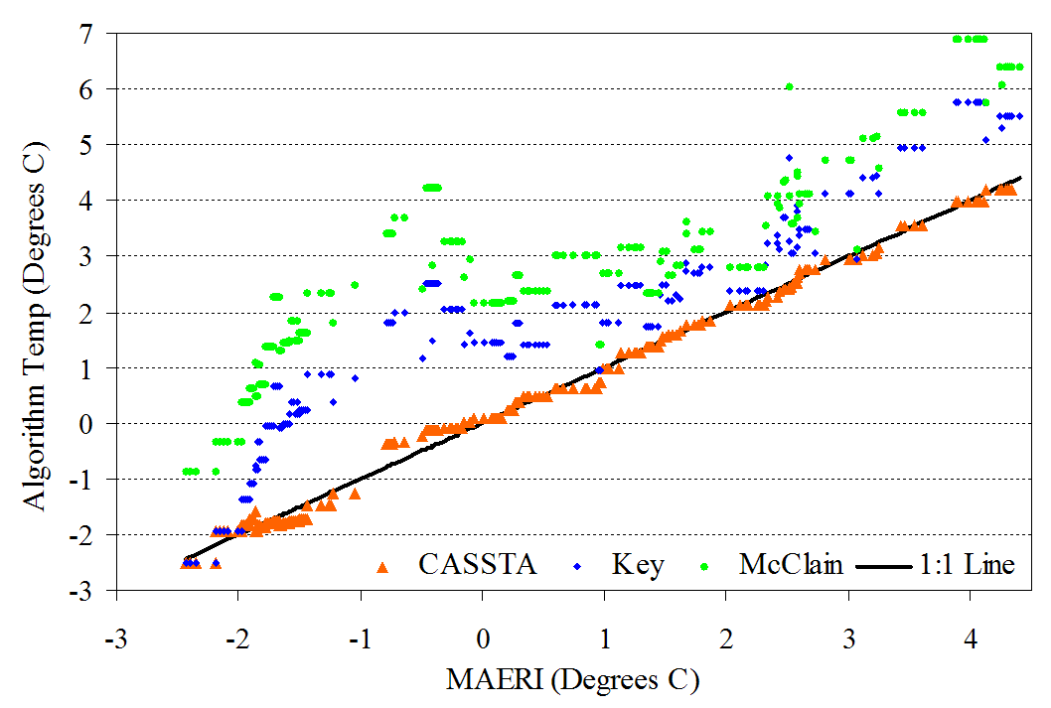
Международная научная группа по разработке методов улучшения точности определения ТПМ по данным спутниковых ИК- и СВЧ-радиометров в высоких широтах (GHRSST) пришла к выводу, что лучше всего в этих широтах использовать нелинейный алгоритм AVHRR NLSST:

$$\mathbf{NLSST} = a + b\mathbf{T4} + c(\mathbf{T4} - \mathbf{T5}) + d[(\mathbf{T4} - \mathbf{T5}) * (\sec\theta - 1)]$$

и алгоритм CASSTA (Composite Arctic Sea Surface Temperature Algorithm) [Vincent et al, 2007]**:**

$$\mathbf{Arctic\ SST} = a + b\mathbf{T4},$$

Где **a** и ***b*** определяются по данным AVHRR и судовым измерениям ТПМ.



Сравнение различных алгоритмов определения ТПМ по AVHRR для условий Канадской Арктики [Minnett P, 2007]

Определение температуры снежно-ледяного покрова в Арктике и Антарктике по данным радиометра VIIRS спутника Suomi-NPP

Полоса 3000 км, 22 спектральных канала в области 0,4-11,8 мкм, разрешение 375 (I)-750 (M-канал) м

$$T_s = a + bT_{11} + cT_{12} + d\,[(T_{11} - T_{12})(\sec\theta - 1)]$$

$$\theta = \arcsin[\sin\lambda \times R_e/(R_e + A_{sat})]$$

Где **λ** – зенитный угол датчика, **Re** - экваториальный радиус Земли, **A**sat – номинальная высота спутника.

Коэффициенты a,b,c,d определены для условий Арктики и Антарктики (атмосферные модели, профили температуры, влажности, модель излучательной способности снега с учетом угловой зависимости излучения) применительно к радиометру VIIRS

Temperature Range		*a*	*b*	*c*	*d*
Arctic	<240 K	7.560993	1.031344	1.248151	0.406514
	240–260 K	8.918637	1.036658	0.514256	2.111948
	>260 K	6.872886	1.028288	1.019783	2.340682
Antarctic	<240 K	2.398863	1.010777	0.225380	0.457090
	240–260 K	9.688947	1.040270	0.463295	2.862228
	>260 K	9.016985	1.036905	0.330130	2.595204

Liu Y., Key J., Mahoney R. 2016

Поверхность	**Альбедо**
Почва •Темная и сырая •Светлая и сухая **Песок**	 0,05 0,40 0,15-0,45
Трава •Длинная •короткая	 0,16 0,26
Сельхозкультуры	0,18-0,25
Лес •Лиственный •хвойный	 0,15-0,20 0,05-0,15
Вода •Малые зенитные углы •Большие зенитные углы	 **0,03-0,10** **0,10-1,0**
Снег •Старый •свежий	 **0,40** **0,95**
Лед •Морской •ледники	 **0,30-0,45** **0,20-0,40**
Облака •мощные •тонкие	 0,60-0,90 0,30-0,50

Альбедо (от лат. *Albus – белый)*. Количественно характеризует часть (процент) солнечного излучения, отраженного телом или поверхностью. Для идеально белого тела альбедо равно 100%, для идеально черного 0%, для реальных поверхностей диапазон изменения: **3** % (**вода** при малых зенитных углах) **95**% (свежий снег).

Изменения альбедо для поверхности, покрытой снегом

В присутствии снежного покрова значения альбедо для всех типов поверхностей изменяется.

Спектральные альбедо в канале 0,47 мкм для заснеженных поверхностей

- вечнозеленые хвойные леса: **0,36** (0,03 -без снега)
- сельхозполя: до **0,76** (0,04 -без снега)
- покрытые снегом смешанные леса: **0,39**,
- покрытые снегом пустоши: **0,87**
- территории постоянно покрытые снегом: **0,95**.

Ресурсный спутник (среднее разрешение)

Характеристики	Landsat-7	Landsat-8
Спектральный диапазон, мкм	синий: 0,45-0,52 зеленый: 0,53-0,61 красный: 0,63-0,69 ближний ИК: 0,78-0,90 Коротковолновый ИК: 1,55-1,75 Тепловой ИК: 10,40-12,50 Коротковолновый ИК: 2,09-2,35 Панхром: 0,45-0,90	1) 0,433—0,453 темно-синий 2) 0,450—0,515 3) 0,525—0,600 4) 0,630—0,680 5) 0,845—0,885 6) 1,560—1,660 7) 2,100—2,300 8) 0,500—0,680 9) 1,360—1,390 ближний ИК (для перистых облаков) 10) 10,3-11,3 Тепловой ИК 11) 11,50 — 12,50
Орбита	Солнечно-синхронная, высота 705 км	
Полоса съемки , км	185	
Периодичность съемки	1-6 сут.	
Пространственное разрешение (в надире)	**15** м B&W (панхром)	
	30 м MS (мультиспектр) 60/100 м (ИК)	

Недостатки: - Landsat-7 возможен эффект насыщения 8-битного сигнала ИСЗ Landsat над снежно-ледяной поверхностью;

- сцены привязаны к береговой зоне; для открытого моря в свободном доступе, как правило, кадров нет

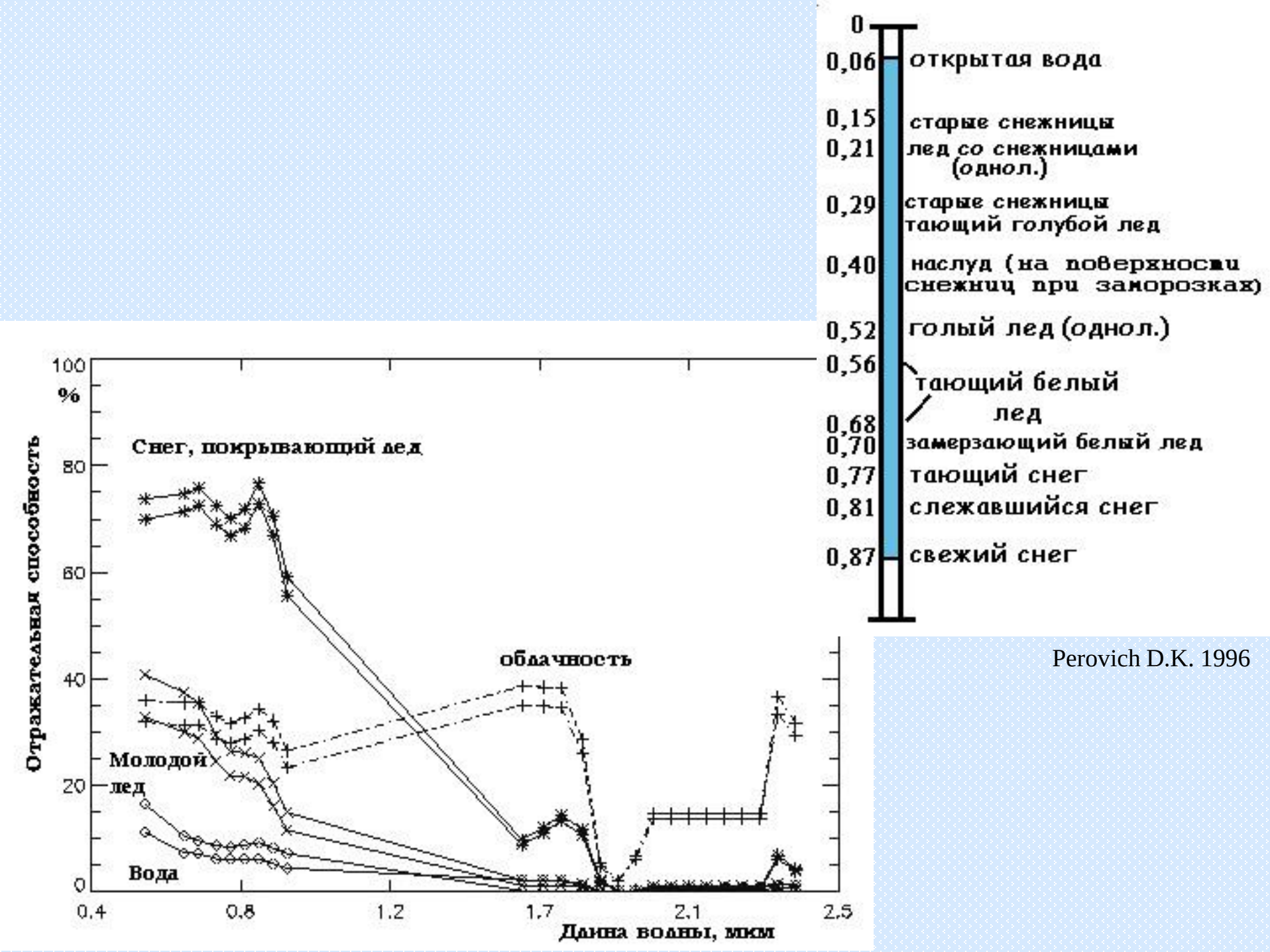
Каналы	Длина волны, мкм (Landsat 7)	Особенности спектрального диапазона. Сфера применения
Синий	0,45-0,52 Band 1	**Используется в океанографии – для целей батиметрирования, мониторинга динамических явлений (вихри, фронты…). Имеет наибольший коэффициент поглощения в атмосфере. Применяется для проведения атмосферной коррекции.**
Зеленый	0,52-0,60 Band 2	**На этот канал приходится максимальный коэффициент отражения зеленой (здоровой) растительности. Используется для лесной таксации, картирования зон взвешенных осадков в водоемах. Подходит для выявления горных пород богатых 2-х валентным) железом**
Красный	0,63-0,69 Band 3	**содержит полосу поглощения хлорофилла. Используется для определения видового состава, выявления стресса растений, картирования границ почв и геологического оконтуривания (залежей, рудного тела, нефтяных полей)**
Ближний ИК (Near Infrared)	0,76-0,90 Band 4	**особенно чувствителен к количеству вегетационной биомассы, к содержанию воды в тающих льдах. Полезен для идентификации сельскохозкультур, прогнозирования урожайности, для картирования береговой линии водных объектов, выявления зон разрушения льда в период таяния. Максимум интенсивности излучения хлорофилла от здоровой растительности получается в характеристике «красной границы» по разнице между сигналами в 3 и 4 зонах спектра.**
Коротковолновый ИК (Short Wave Infrared;)	1,55-1,75 Band 5	**Реагирует на содержание воды в растительности и почвах. От увлажненной поверхности сигнал ниже, чем от сухой. Позволяет разделять облака от снега и льда (низкий сигнал – от снега, интенсивный – от облаков).**
Тепловой инфракрасный	10,4-12,5 Band 6	**Используется для определения температуры подстилающей поверхности (открытой воды, снежно-ледяного покрова и др.) и для определения расчетным путем толщины льда**
Коротковолновый ИК (Middle InfraRed)	2,08-2,35 Band 7	**Позволяет различать горные породы, измененные гидротермальные зоны. В этом каналебогатые кремнием материалы, пыль в приземном воздухе и оголенные почвы часто дают относительно высокий сигнал. Используют для выделения границ почв, определения степени увлажненности почв и растительности.**

КОМБИНАЦИЯ КАНАЛОВ (в нумерации для Landsat 7 ETM)/ Landsat 8	**ОСОБЕННОСТИ. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ**
3-2-1/4-3-2 (красный/зеленый/синий)	Композиция в естественных цветах. Применяется для первичного просмотра материалов съемки. Облачность и снег – белые и практически не дифференцируются. Можно анализировать процессы в водных объектах , оценивать глубины в мелководной зоне. Также применима для изучения антропогенных объектов.
4-3-2 /5-4-3 (ближний ИК /красный/зеленый)	композиция в ложных цветах (false color). Растительность отображается в оттенках красного цвета, городские районы – в сине-голубых, а почвы (грунты) – в оттенках коричневого цвета. Лед, снег и облака белые или светло_голубого цвета (лед и облака по краям). Используется для изучения растительности на разных стадиях созревания урожая с/х культур, увлажненности почвогрунгрунтов, изучения состояния древостоя. визуализируются сине-голубыми оттенками. При этой комбинации спектральных каналов отображение местности аналогично традиционной инфракрасной аэросъемке.

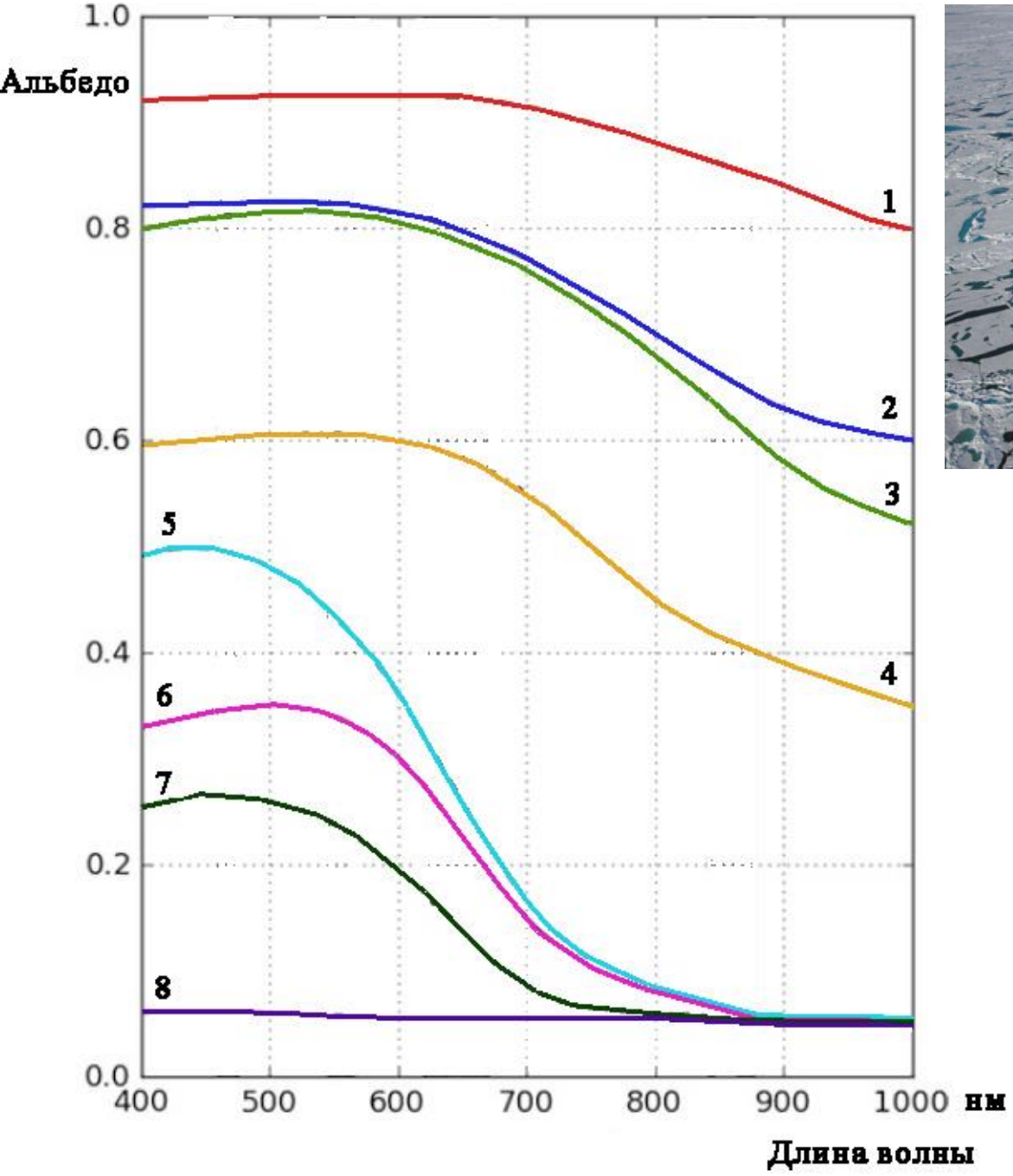
Спектрорадиометр MODIS

(ежедневная съемка , ширина полосы обзора, 2 330 км)

Спектральные каналы	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м	Снежница r_i	Снег/лед r_i	Открытая вода, r_i
1	0,62-0,67	250	0,16	0,95	0,08
2	0,841- 0,876	250	0,07	0,87	0,08
3	0,459-0,479	500	0,22	0,95	0,08
4	0,545-0,565	500			
5	1,230-1,250	500			
6	1,628-1,652	500			
7	2,105-2,155	500			
8	0,402-0,412	1000			
….					
20-25	3.66-4.55	1 000			
26	1.36-1.39	1 000			
27-36	6.54-14.39	1 000			



Perovich D.K. 1996



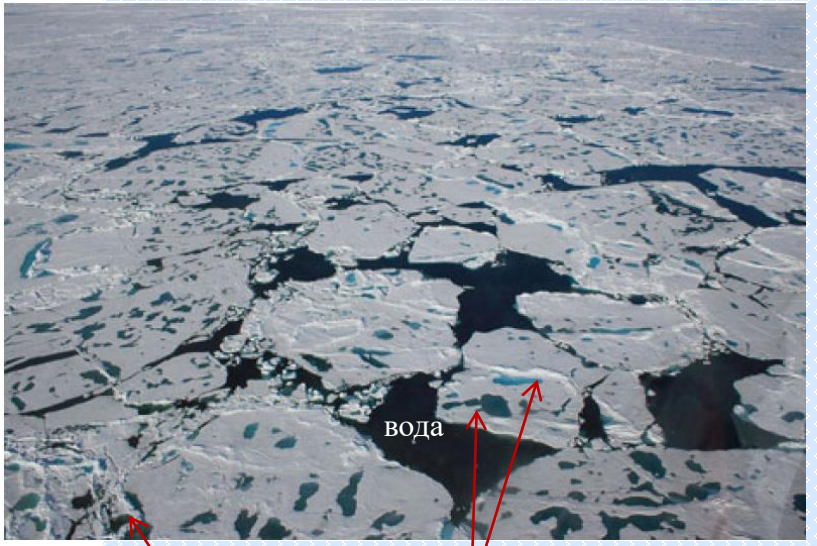


Фото: Стефан Керн

1 – лед, покрытый снегом (сухой снег);

2 – лед без снега;

3 – сырой снег;

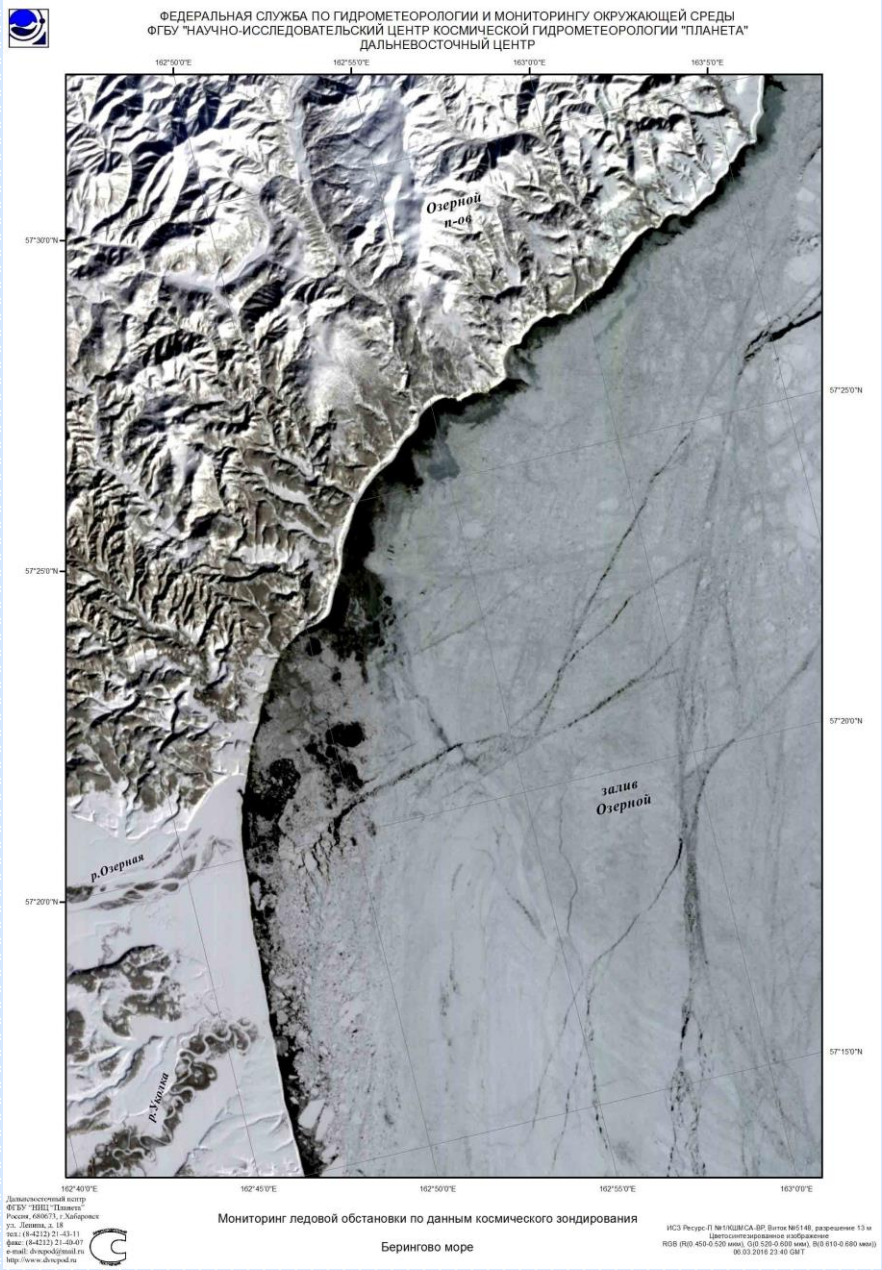
4 – тающий однолетний лед;

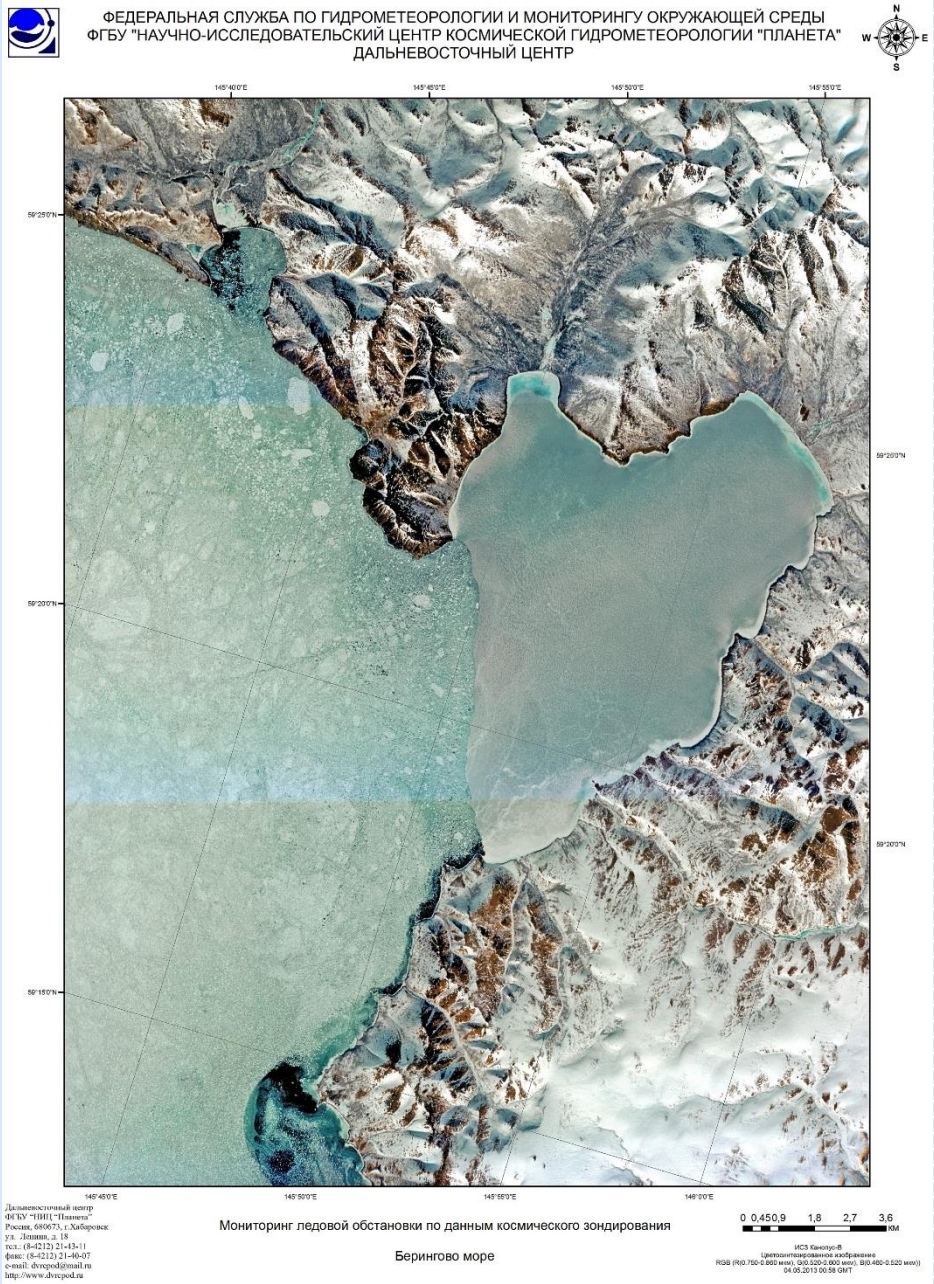
5 – молодая снежница;

6,7 – два типа зрелых снежниц;

8 – открытая вода

Anja Rosel. Hamburg Studies of Maritime Affaires. vol.25. 2013.

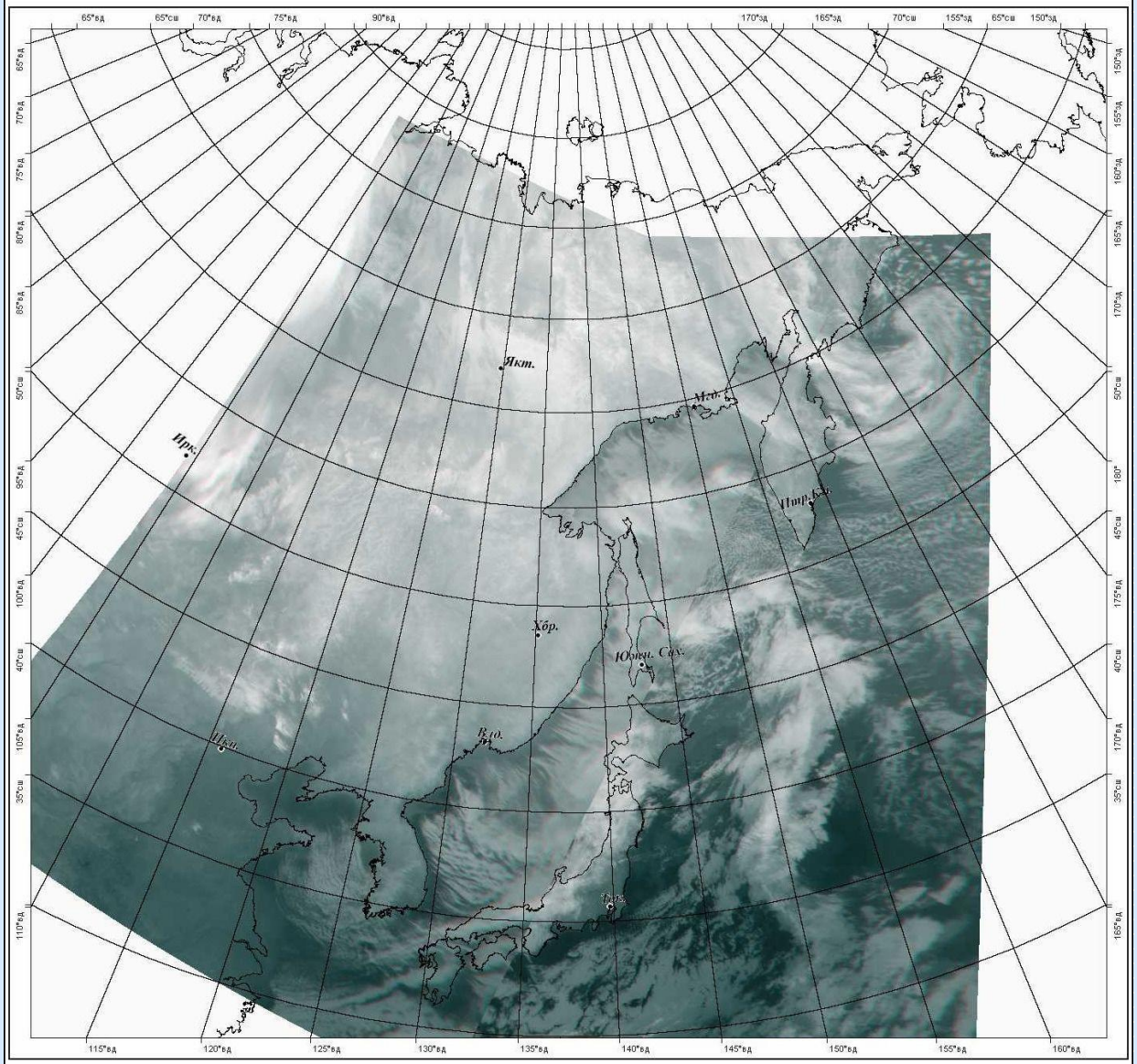




Снимок ИСЗ «Ресурс-П»

Снимок ИСЗ «Канопус»

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ФГБУ "НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КОСМИЧЕСКОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ "ПЛАНЕТА"
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ЦЕНТР



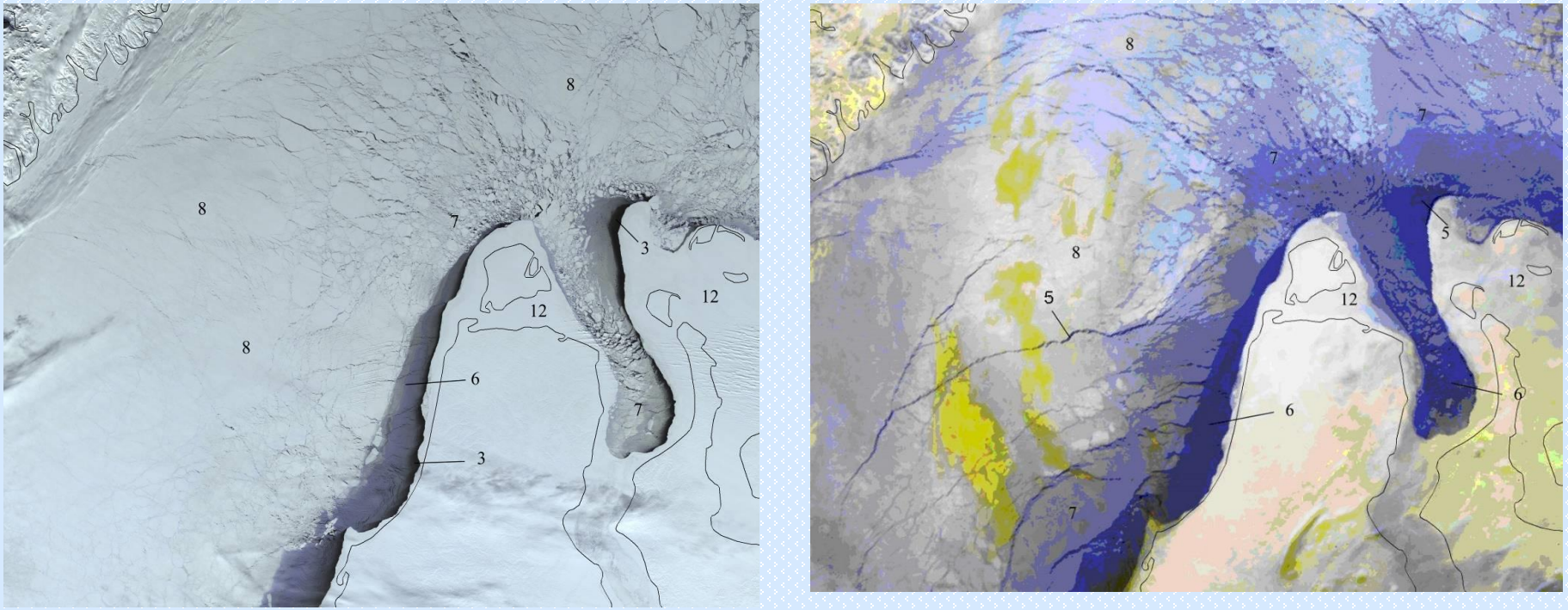
Дальневосточный центр
ФГБУ "НИЦ ПЛАНЕТА
Россия, 680013, г.Хабаровск
ул.Ленина, д.18
тел.:(8-4212)21-43-11
факс:(8-4212)21-40-07
e-mail: ovp@dvrcpod.ru
http://www.dvrcpod.ru

Синтезированный монтаж космических изображений КА Метеор-М №2
(МСУ-МР, р/л 1.7 ГГЦ, R(11,5-12,5 мкм), G(10,5-11,5 мкм), B(10,5-11,5 мкм))

18.12.2017 23:50 GMT
19.12.2017 01:30 GMT

Снимок ИСЗ «Метеор-М»
(тепловые Ик-каналы)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПОВ ЛЬДА ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА



4 апреля 2009 г. Карское море.

а) Видимый диапазон. Синтезированный снимок с ИСЗ Terra/MODIS, б) ИК-снимок с ИСЗ NOAA (5-4-3 каналы)

3– темный и светлый нилас, *5* – серый лед, *6* – серо-белый лед, *7* – однолетний тонкий лед; *8* – однолетний средний лед, *12* – припай.

Для определения возраста ледяных полей используют прямые и косвенные признаки дешифрирования: яркость, форму, размеры и др. Серо-белые и однолетние тонкие льды имеют вытянутую угловатую форму, их различают по тону на оптических изображениях – серо-белому и белому соответственно. Для однолетнего среднего льда характерны поля с размерами 2–10 км, но вытянутой или округлой формы. Более округлая форма характерна для полей однолетнего толстого льда.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПОВ ЛЬДА ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ ИК ДИАПАЗОНА

ИК- изображение с ИСЗ NOAA-17.

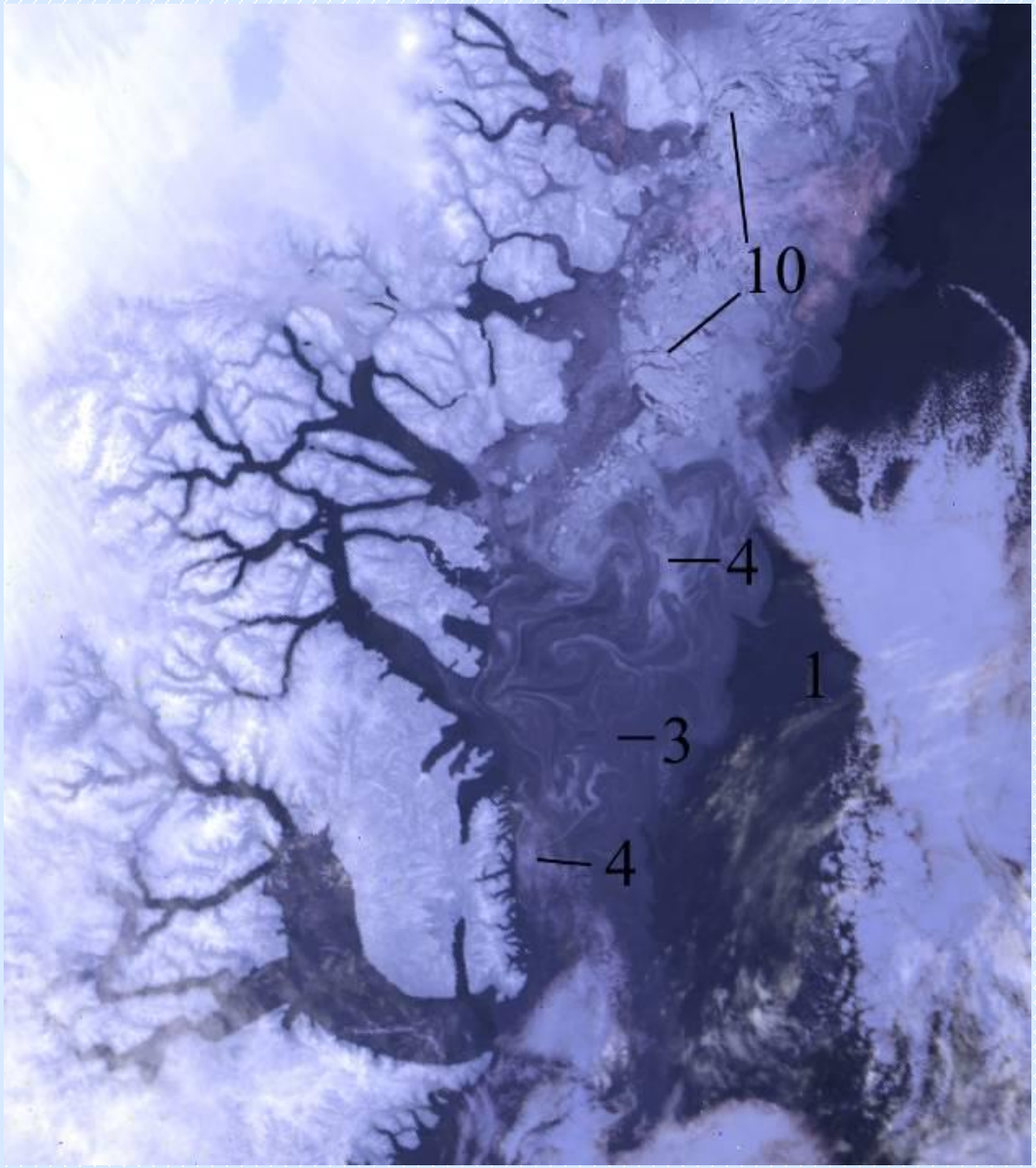
1 – чистая вода,

3 – нилас,

4 – блинчатый лед,

10 – остаточный лед.

По данным А.Д. Масанова.



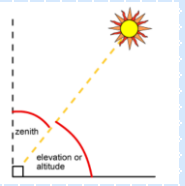
Гренландское море. 5 октября 2009 г.

КАРТИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛЕД - ВОДА ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА

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, для VIIRS канал M7; R_2 – коэффициент отражения в коротковолновом ИК-канале (1,6 или 2,2 мкм), для VIIRS канал M10.

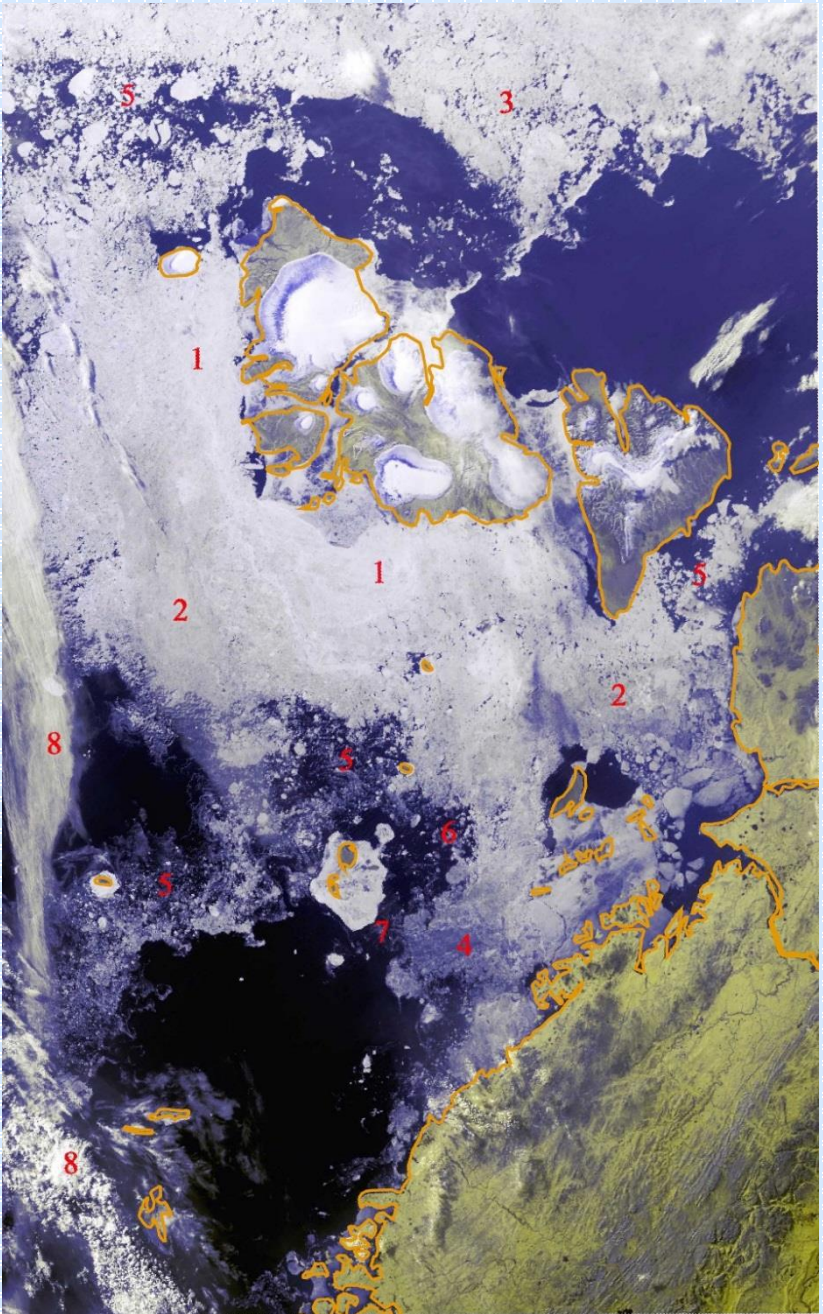


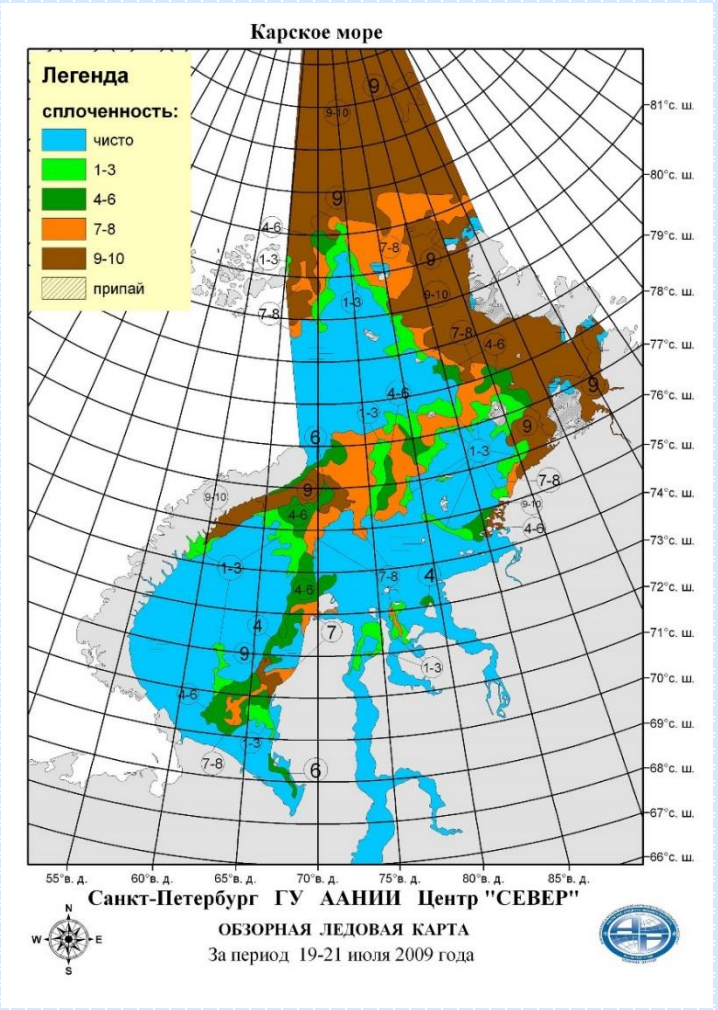
Днем (когда зенитный угол солнца <85^o) пиксель считается занят льдом, если NDSI> 0,45, а R_1 (0,865)>0,08; температура поверхности <275 К (условия не относятся к зонам тающего льда, снежниц и кромки льда).

Ночью (когда зенитный угол солнца >85^o) пиксель считается занят льдом, если температура поверхности <275 К.

Liu Y., Key J., Mahoney R. 2016

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЛОЧЕННОСТИ ЛЬДА ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА





Синтезированное изображение с ИСЗ Terra/MODIS (1-й, 2-й каналы). 20 июля 2009 г., моря Карское и Лаптевых.

1 – лед сплоченностью 10 баллов, не загрязненный; *2*– лед сплоченностью 10 баллов, загрязненный; *3* – лед сплоченностью 9– 10 баллов; *4* – лед сплоченностью 9 баллов, разрушенный 3– 4 балла; *5* – лед сплоченностью 7– 8 баллов; *6* – лед сплоченностью 4– 6 баллов; *7* – лед сплоченностью 1– 3 балла; *8* – облачность.

Определение сплоченности ледяного покрова по данным радиометра VIIRS спутника Suomi-NPP в автоматизированном режиме

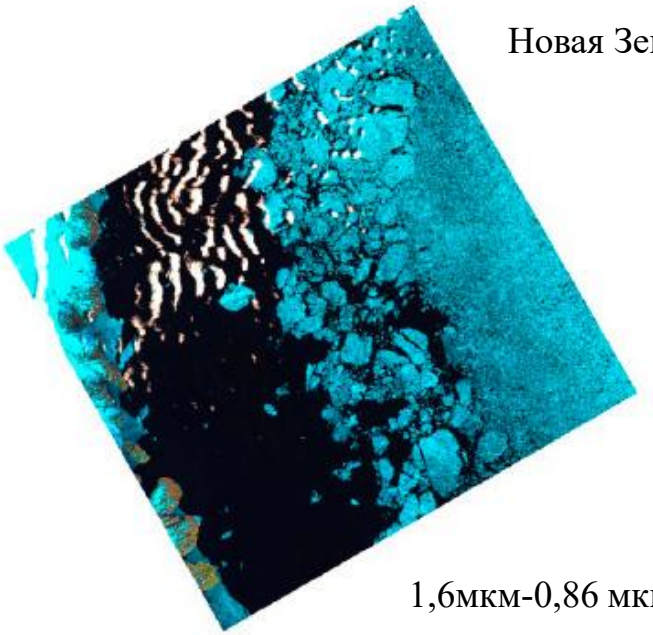
Алгоритм NOAA.

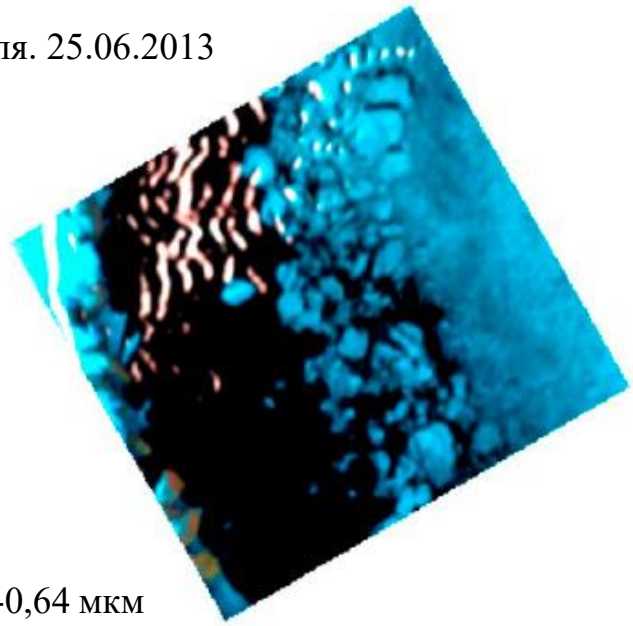
1. Выделение облачности по пороговому методу или по методу Байеса. Создается облачная маска с 4мя классами: «Облака», «вероятно облака», «вероятно ясно», «ясно». Сплоченность рассчитывается только для областей «вероятно ясно», «ясно».
2. Создание маски суши.
3. Расчет температуры поверхности и отражательной способности для каждого пикселя.

Определение сплоченности льда в пикселе (C_p) по связующим точкам чистой воды (B_{water}) и чистого льда (B_{ice}). Днем используется канал 0,67 мкм; ночью – температура.

$$Cp=(B_p-B_{water})/(B_{ice}-B_{water})$$

Новая Земля. 25.06.2013





1,6мкм-0,86 мкм-0,64 мкм

Белый цвет – облака;

Черный – вода;

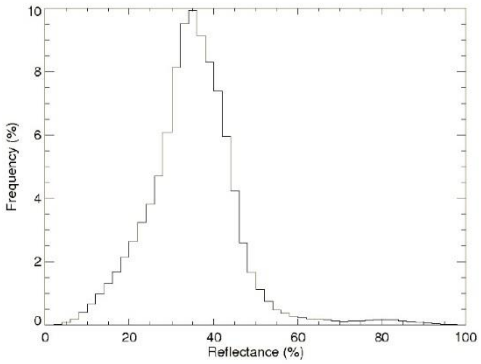
Голубой – лед.

Landsat-8 (5-4-3 каналы). Разрешение приведено к 50 м.

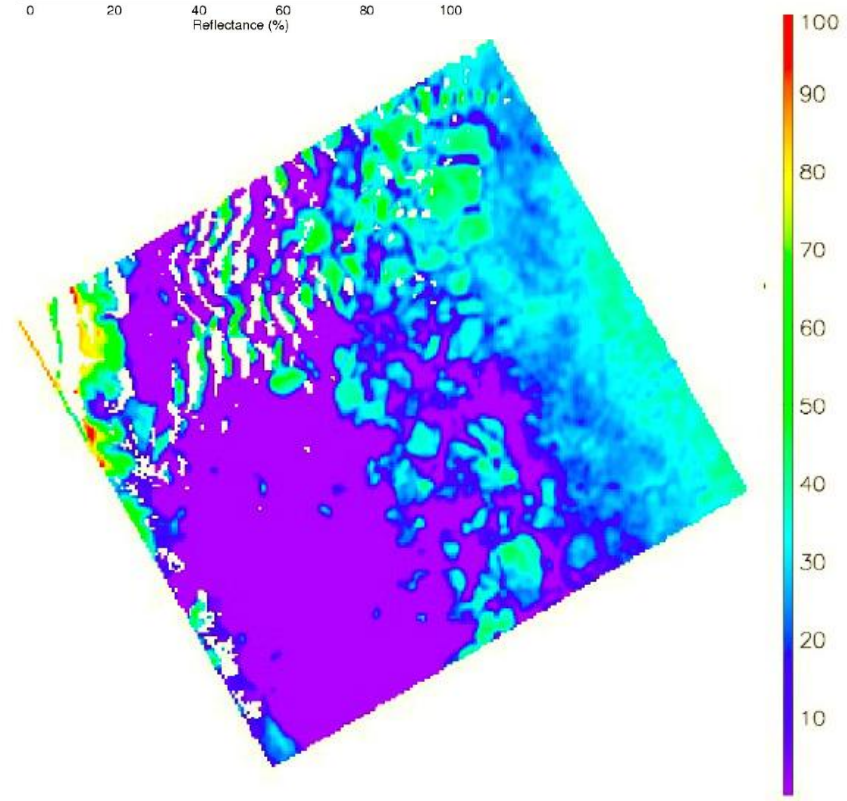
VIIRS (M10-M7-M5)/1000м

Liu Y., Key J., Mahoney R. 2016

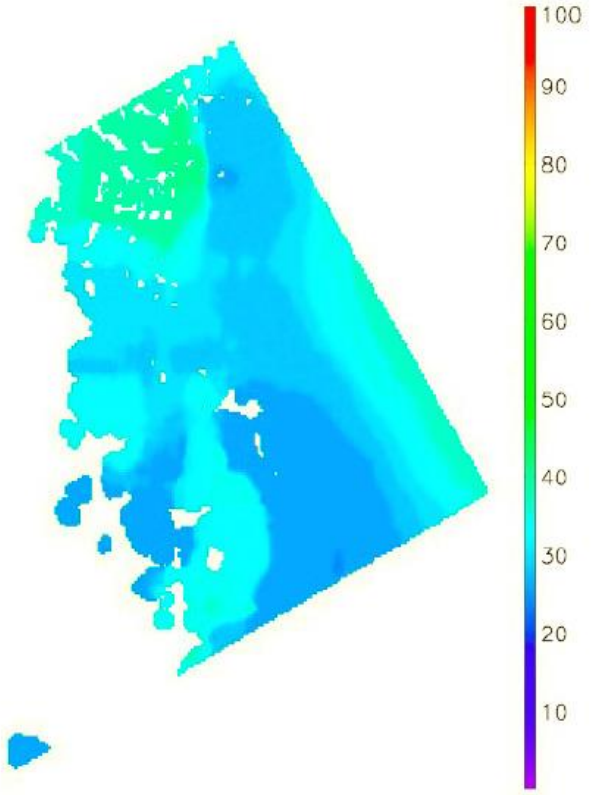
Для нахождения связующих точек используется расчет скользящим окном N x N, где 31<N<51; функции плотности вероятности отражения/температуры, построенная по всем точкам, отнесенным к «занятым льдом»



Suomi-NPP. VIIRS

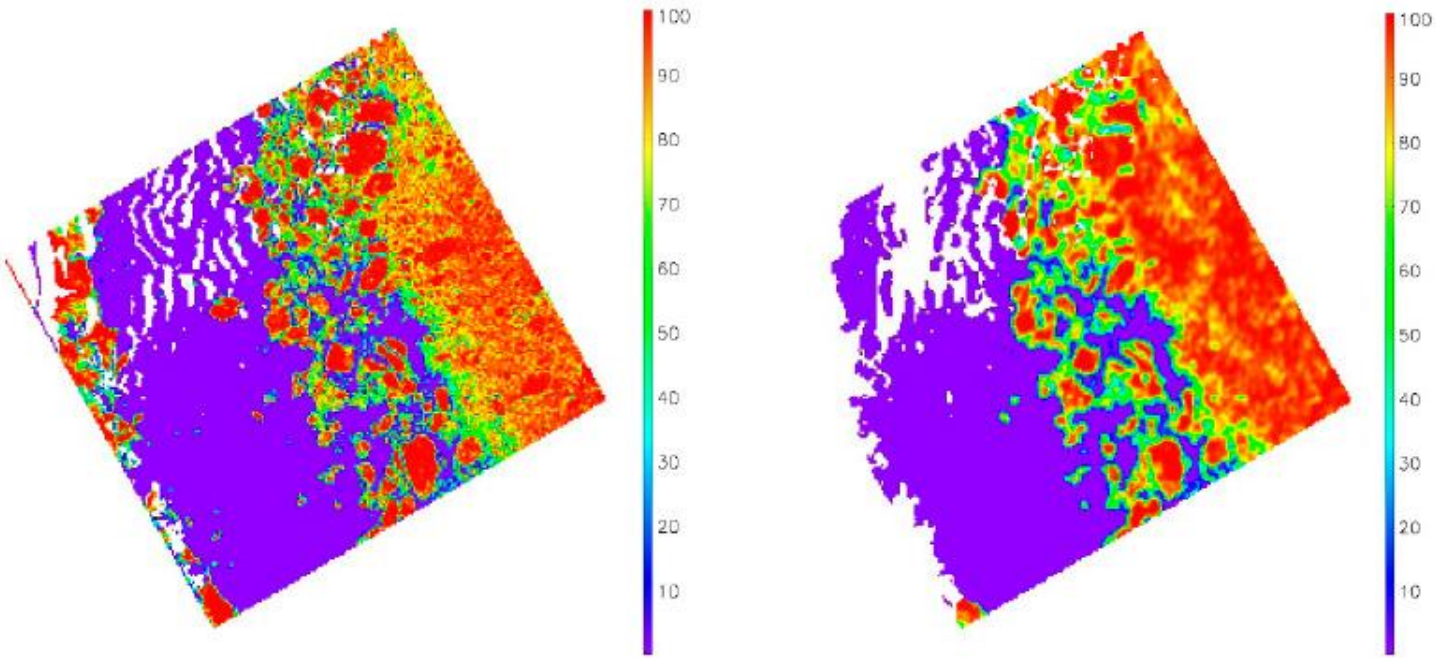


Отражающая способность в канале 0,67 мкм



Связующие точки

Liu Y., Key J., Mahoney R. 2016



Сплоченность ледяного покрова, определенная по данным Landsat-8 и Suomi-NPP/VIIRS.

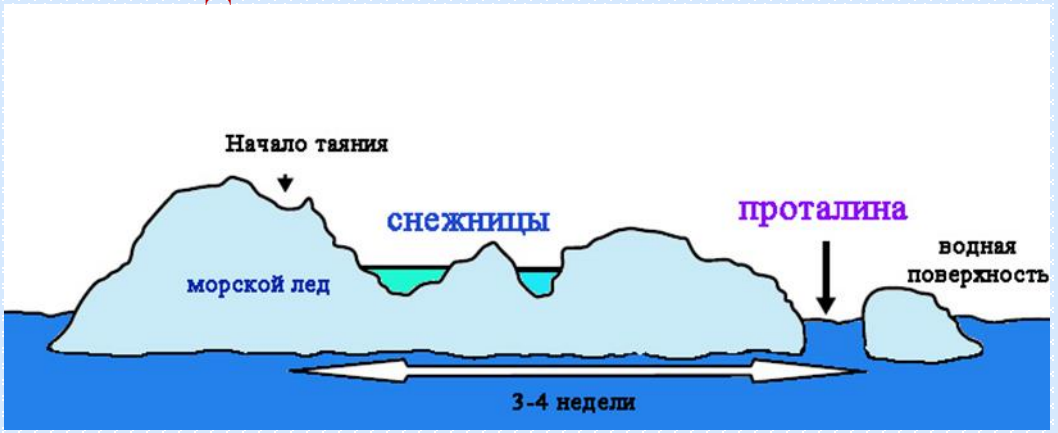
Белым цветом показаны пиксели, отнесенные к облачности или суше

Liu Y., Key J., Mahoney R. 2016

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЛОЧЕННОСТИ ЛЬДА ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА В ПЕРИОД ТАЯНИЯ

$$\alpha=\alpha_W A_W+\alpha_M A_M+\alpha_I A_I$$

α – альбедо области, на которой присутствуют 3 типа поверхности (вода, снежницы, лед и снег)
W, M, I – вода, снежницы, лед и снег, соответственно.



1. По данным MODIS

$$A_W r_W(\lambda 1)+A_M r_M(\lambda 1)+A_I r_I(\lambda 1)=R(\lambda 1)$$

$$A_W r_W(\lambda 3)+A_M r_M(\lambda 3)+A_I r_I(\lambda 3)=R(\lambda 3)$$

$$A_W r_W(\lambda 4)+A_M r_M(\lambda 4)+AI r_I(\lambda 4)=R(\lambda 4)$$

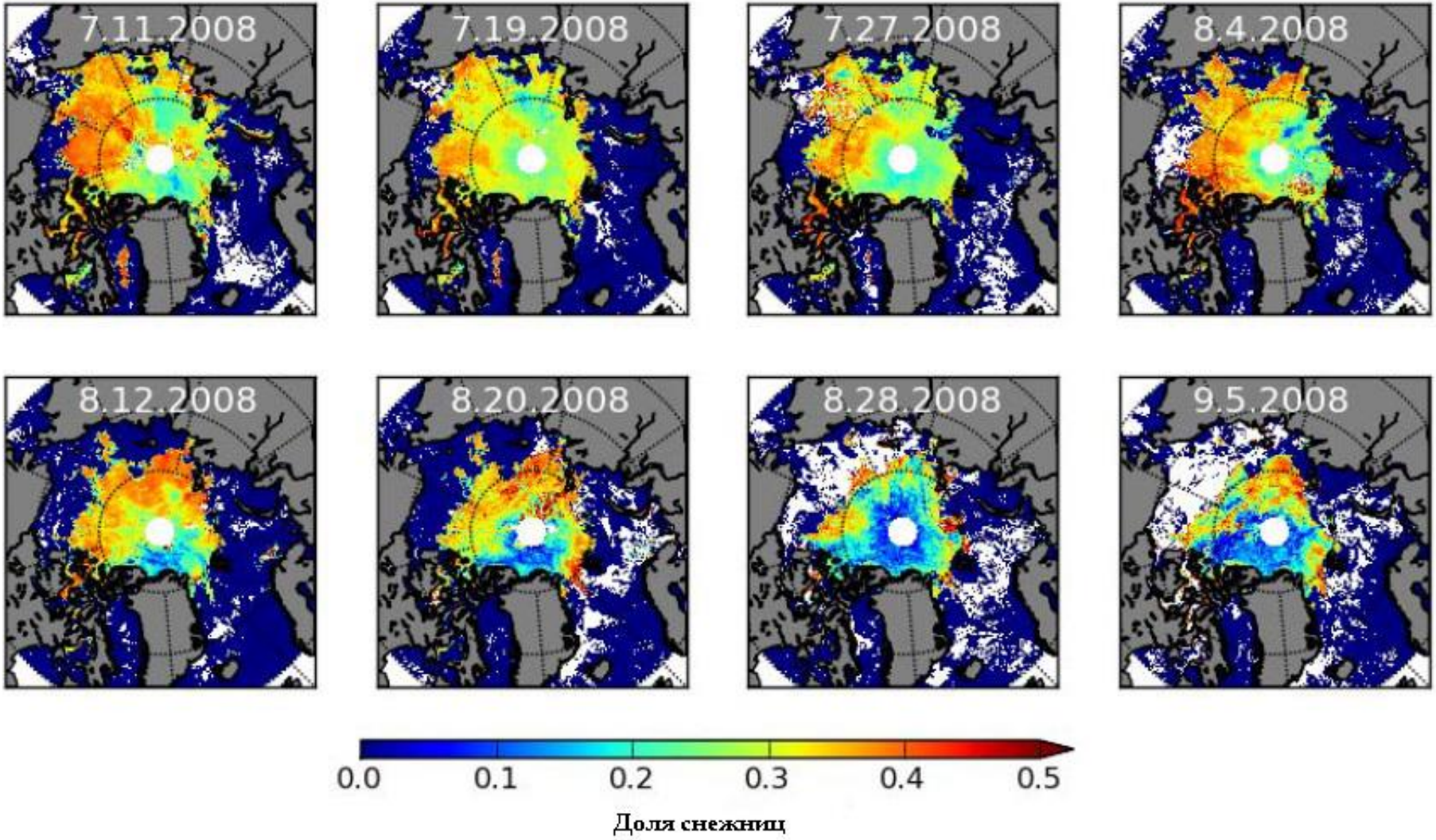
$$A_W+A_M+A_I=1$$

для каждого пикселя MODIS

$r(\lambda_1)$ = r(459–475 nm),

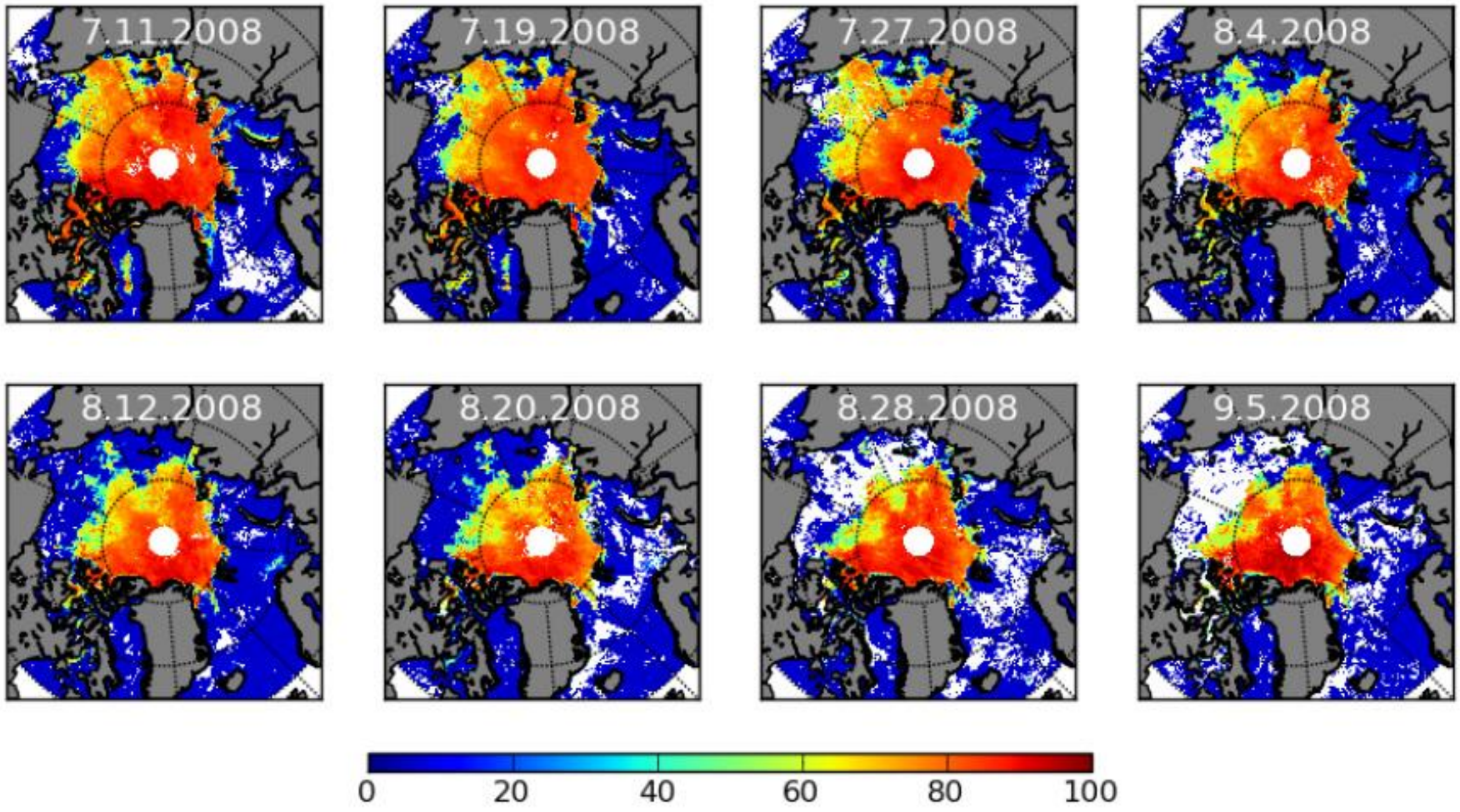
$r(\lambda_3)$ = r(620–670 nm),

$r(\lambda_4)$ = r (841–876 nm).

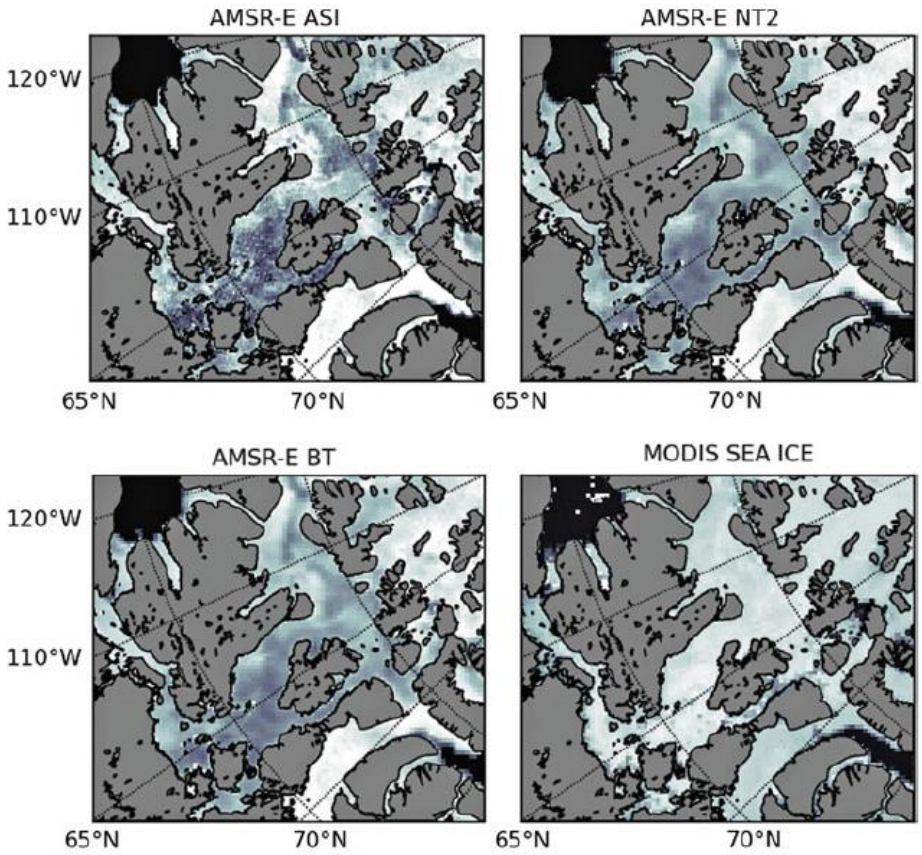


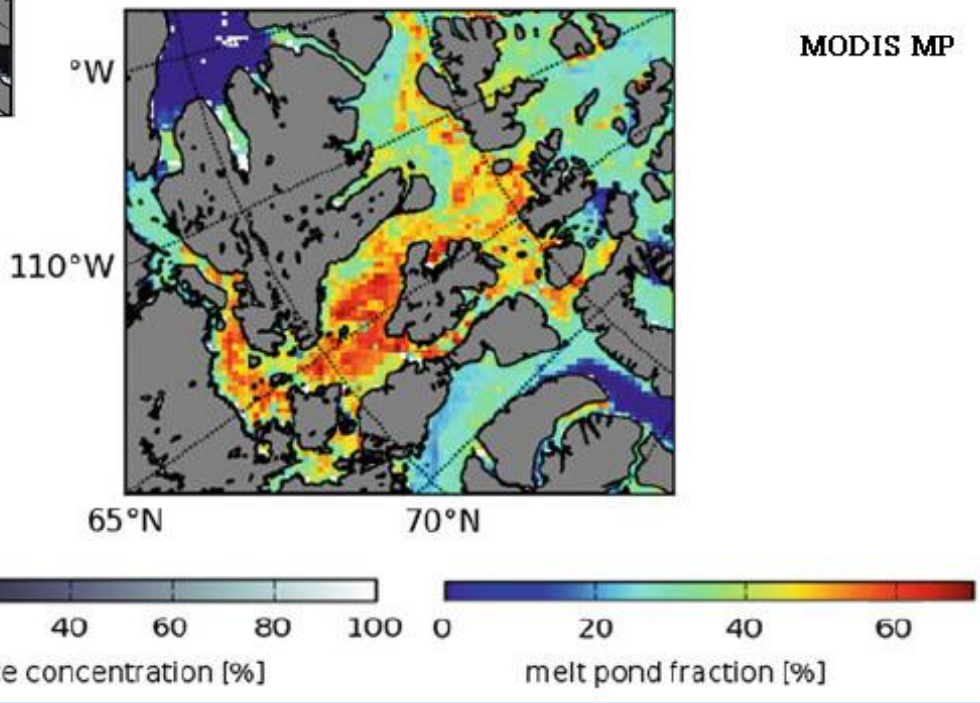
Пример оценки по спутниковым данным MODIS09 A1 (еженедельный продукт с атмосферной коррекцией) с помощью метода нейронных сетей доли снежниц в период таяния в Арктике в 2008 г.
Белым цветом закрашены пиксели, по которым нет данных.

Rösel A., L. Kaleschke, G. Birnbaum. Cryosphere. 2012. N6.



Пример оценки по спутниковым данным MODIS сплоченности льда в период таяния в Арктике в 2008 г. Белым цветом закрашены пиксели, по которым нет данных.

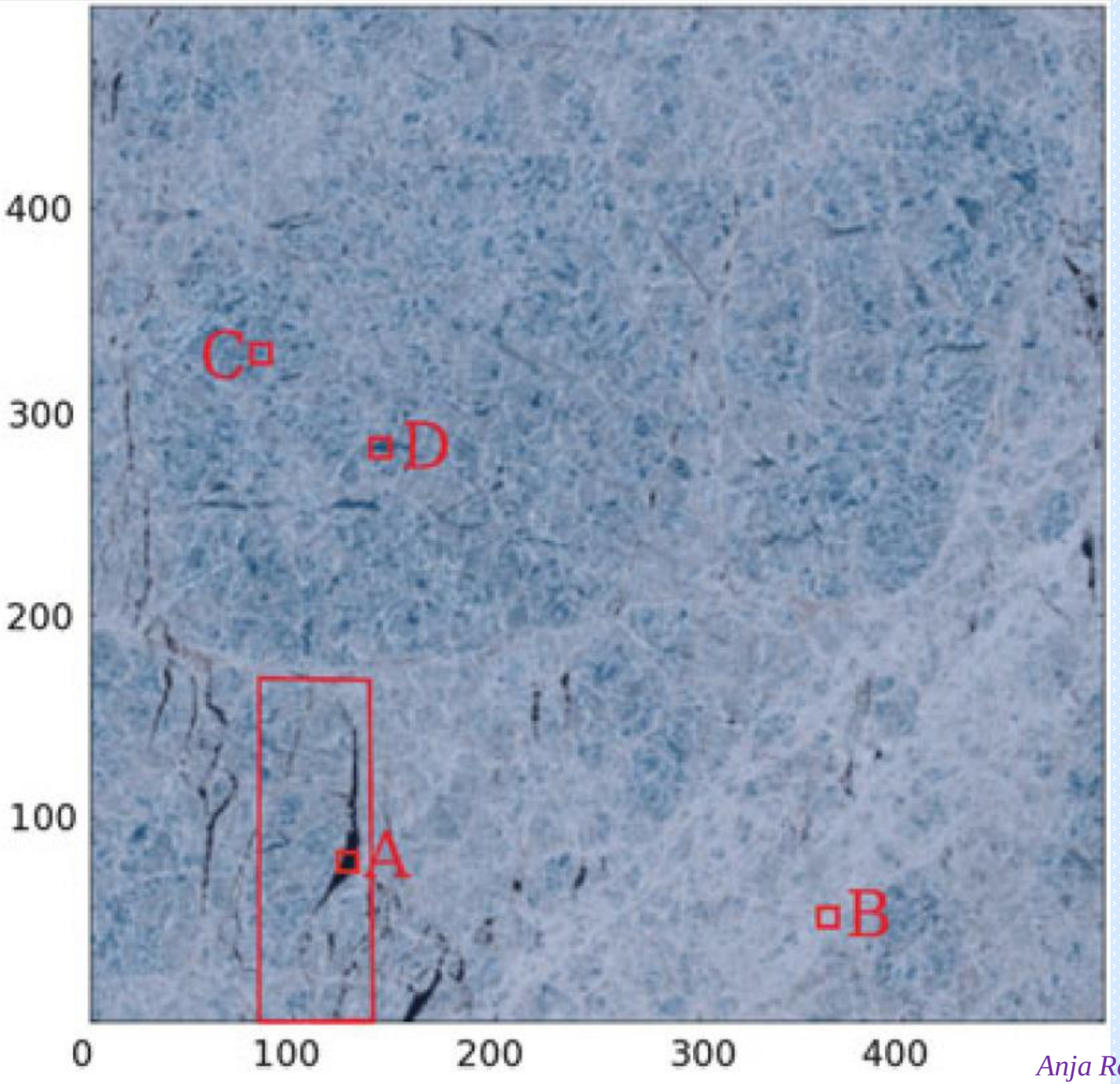




25.06.2008. Канадская Арктика.
Средняя сплоченность льда по алгоритмам ASI:**45**%; NT2: 56%; BT: 55%; MODIS: **93**%.

Anja Rosel. Hamburg Studies of Maritime Affaires. vol.25. 2013.

2.По данным Landsat-7



Фрагмент композитного кадра Landsat-7 (ch3-2-1). 25x25 км.

A-D – тестовые области^

A – открытая вода;

B – заснеженный лед;

C- снежница;

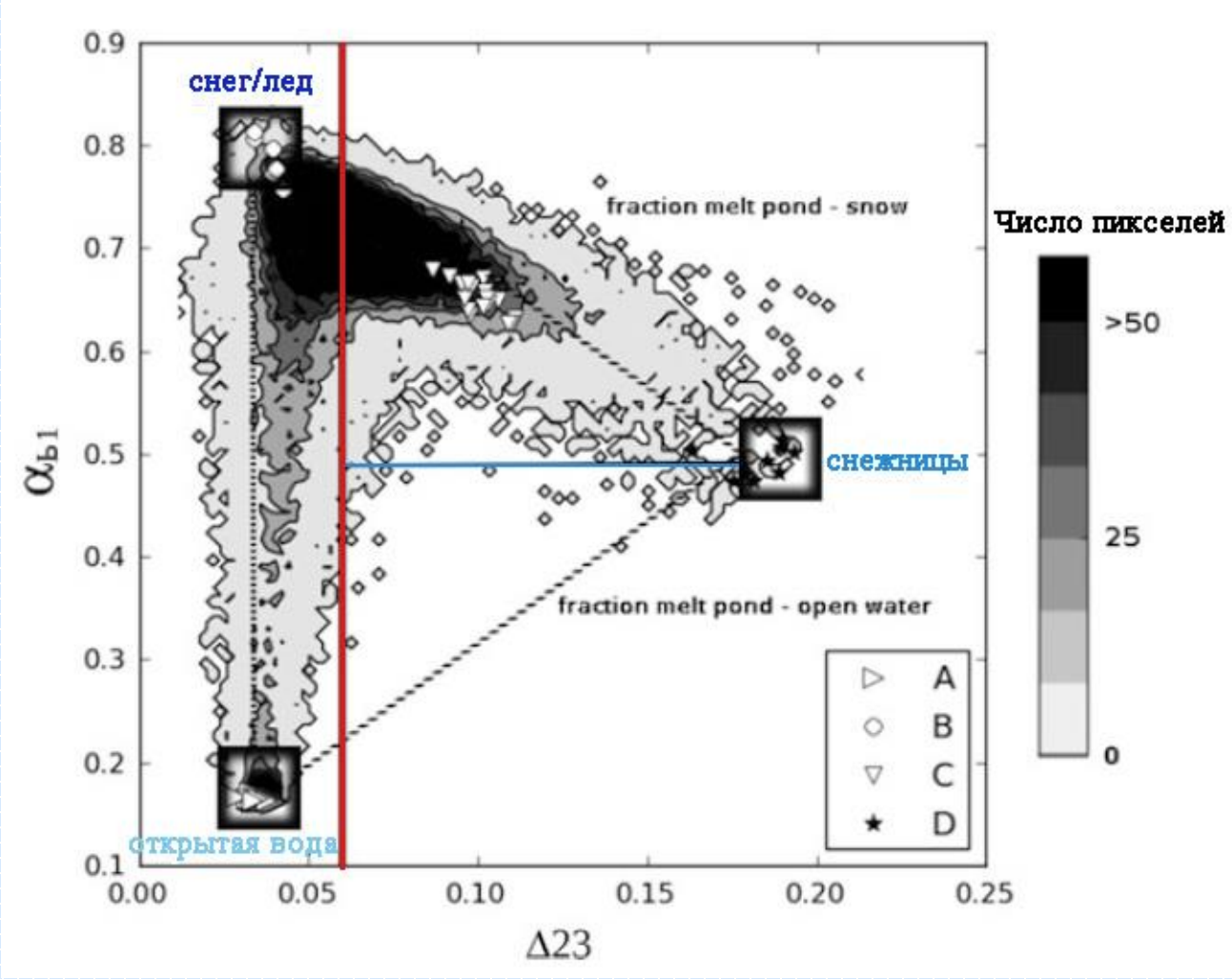
D –снежница.

Anja Rosel. Hamburg Studies of Maritime Affaires.vol.25. 2013.

Использование метода связующей точки, предложенного Маркусом, для классификации изображений льда (со снежницами) по снимкам Landsat-7 ETM+

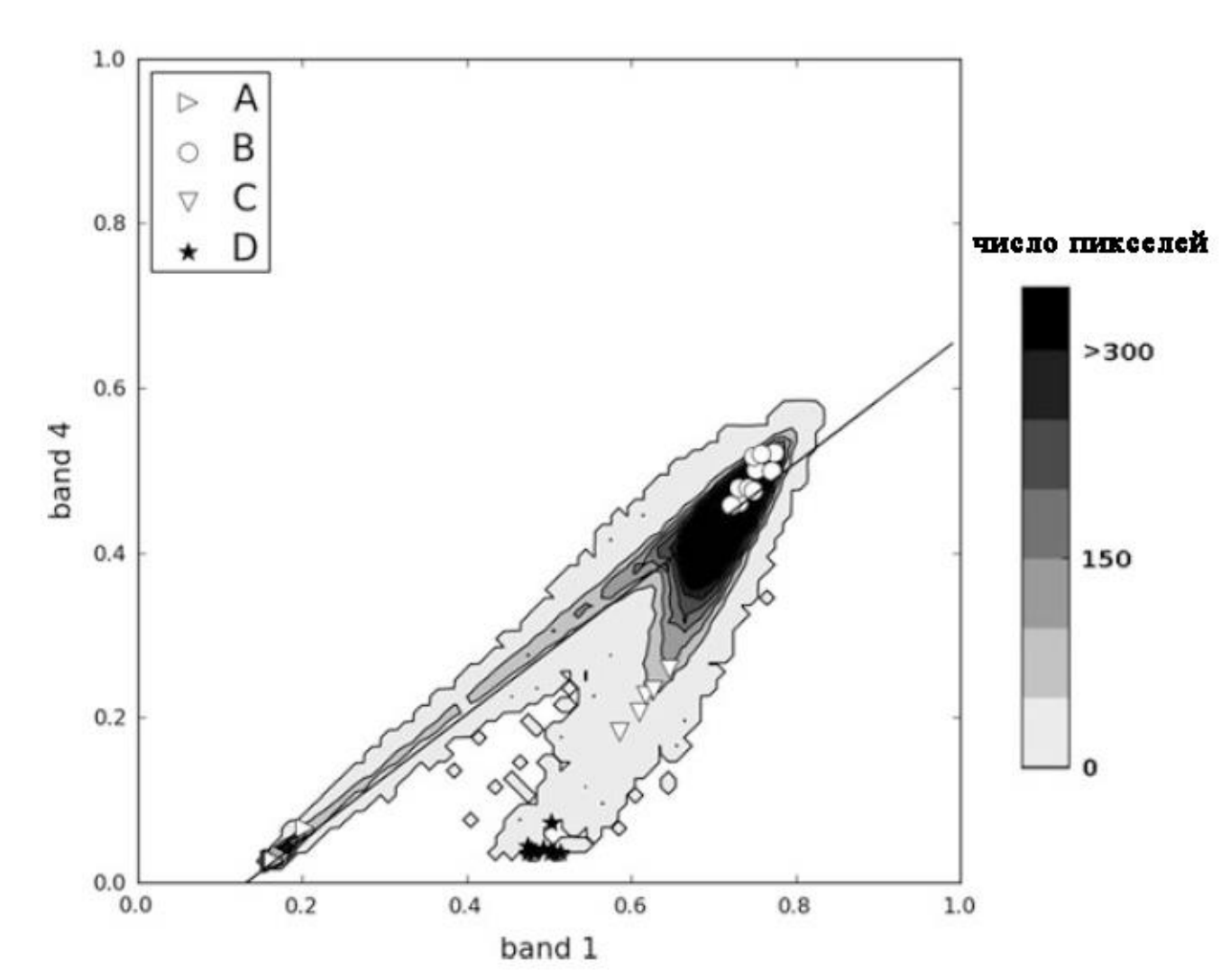
$$\Delta 23 = \alpha_{b2} - \alpha_{b3}$$

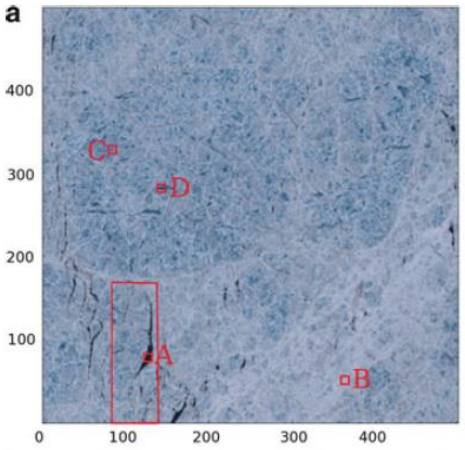
1. Определяется разность сигнала во 2-м и 3-м каналах
2. Если разность выше порога, то это – область льда со снежницами, если ниже – то это области открытой воды и льда без снежниц;
3. Для разграничения открытой воды и льда без снежниц используется значение сигнала в канале1: высокие значения – лед, низкие – вода.

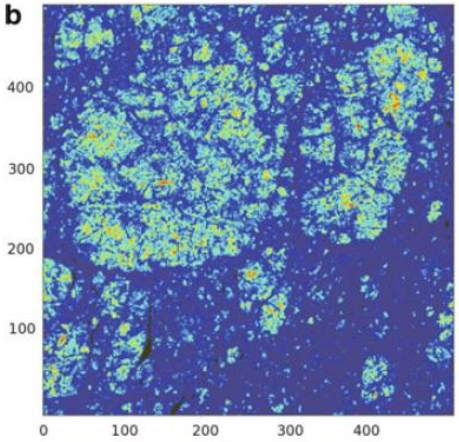


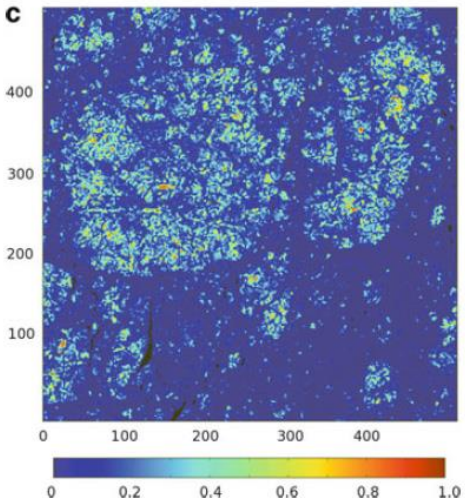
Порог и связующие точки необходимо определять для каждой спутниковой сцены. Для автоматизации процессов классификации метод не используется.

Использование метода главных компонент для классификации изображений льда (со снежницами) по снимкам Landsat-7 ETM+

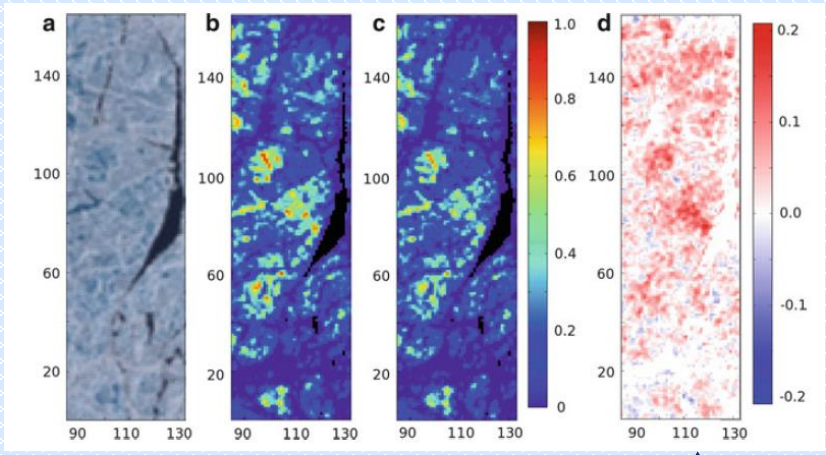








Тренировочные области:
A – открытая вода; B – заснеженный лед;
C, D – снежницы.



Разность между методом PCA и методом Маркуса

	PCA	Markus
Снежницы, км.кв	106.3 ± 23.9	88.8 ± 10.6
%	17.1 ± 3.8	14.3 ± 3.3

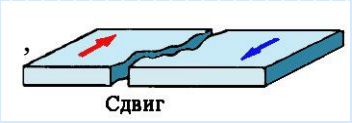
Определение доли льда со снежницами по методу главных компонент

Определение доли льда со снежницами по методу Маркуса

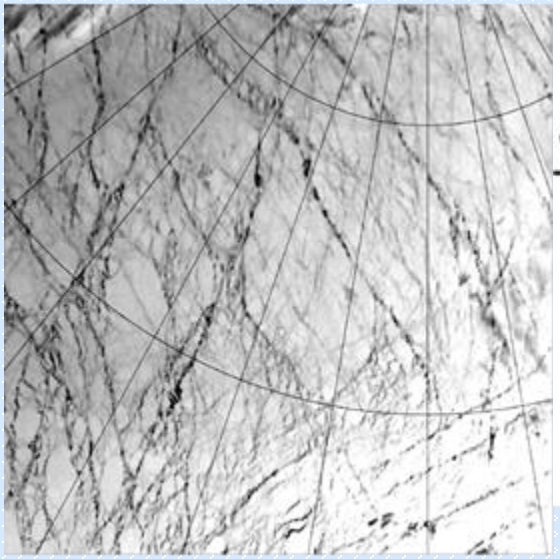
В районах с высокой долей снежниц (>20%) оценка по методу главных компонент на 20% выше, чем по Маркусу. Напротив, при доле снежниц <20%, расчет по Маркусу дает оценки на 10% выше, чем метод главных компонент.

Anja Rosel. Hamburg Studies of Maritime Affaires.vol.25. 2013.

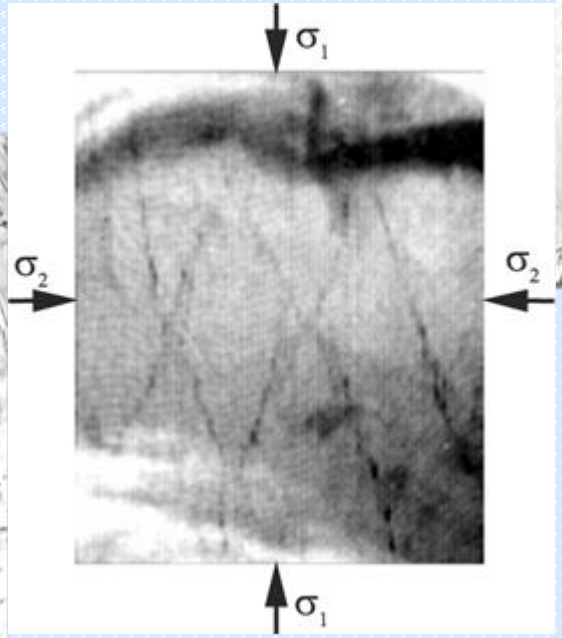
ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИКИ ЛЬДА ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ



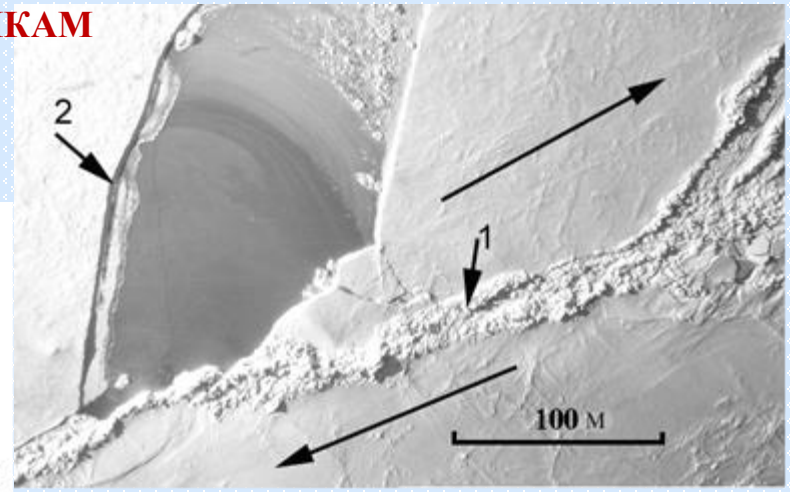
сдвиговое разрушение льда



ИСЗ NOAA
полигональная структура льда



главные напряжения σ_1 и σ_2 при двумерном сжатии льдов. Размер одной стороны ромба около 150 км; углы разлома 30°



Аэрофотоснимок ледяного покрова с различными формами разрушения льда при начале сдвигового торошения и образования разводья.
1 – сдвиг/срез, сжатие/дробление, *2* – растяжение/разрыв при образовании разводья.

$$\tau = c + \sigma_n tg\phi$$

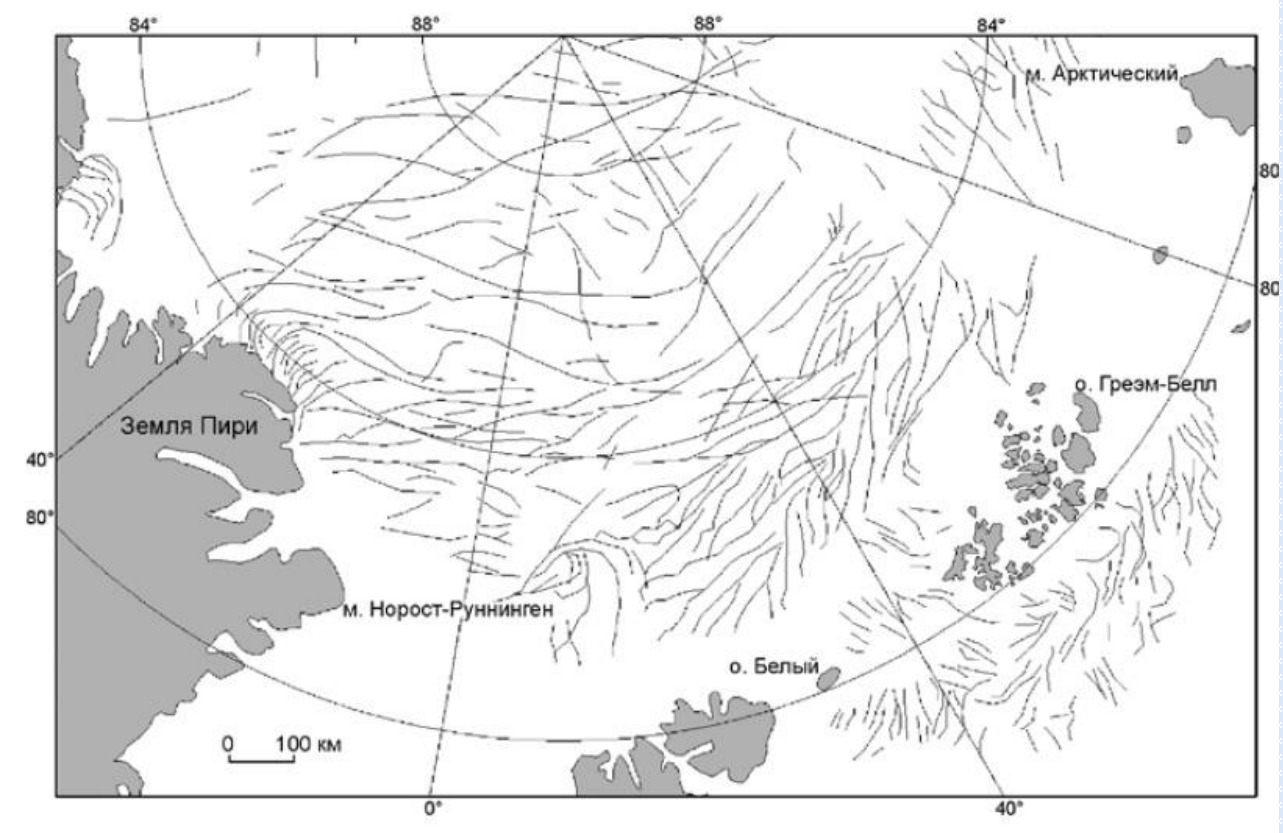
По спутниковым снимкам с ИСЗ NOAA за разные годы предельное напряжение сдвига при измеренных углах разлома достигало 40 кПа.

τ - предельное сопротивление сдвигу, σ_n - нормальное давление (сила сжатия льдов), C – сцепление, ϕ - угол внутреннего трения ледяного покрова как дискретной среды.

В.Н. Смирнов. 2011

Нарушения сплошности ледяного покрова, определяемые по спутниковым данным

Нарушения сплошности ледяного покрова – это пространства чистой воды среди льда: **разводья (разрывы), полыньи, каналы, трещины, промоины.**

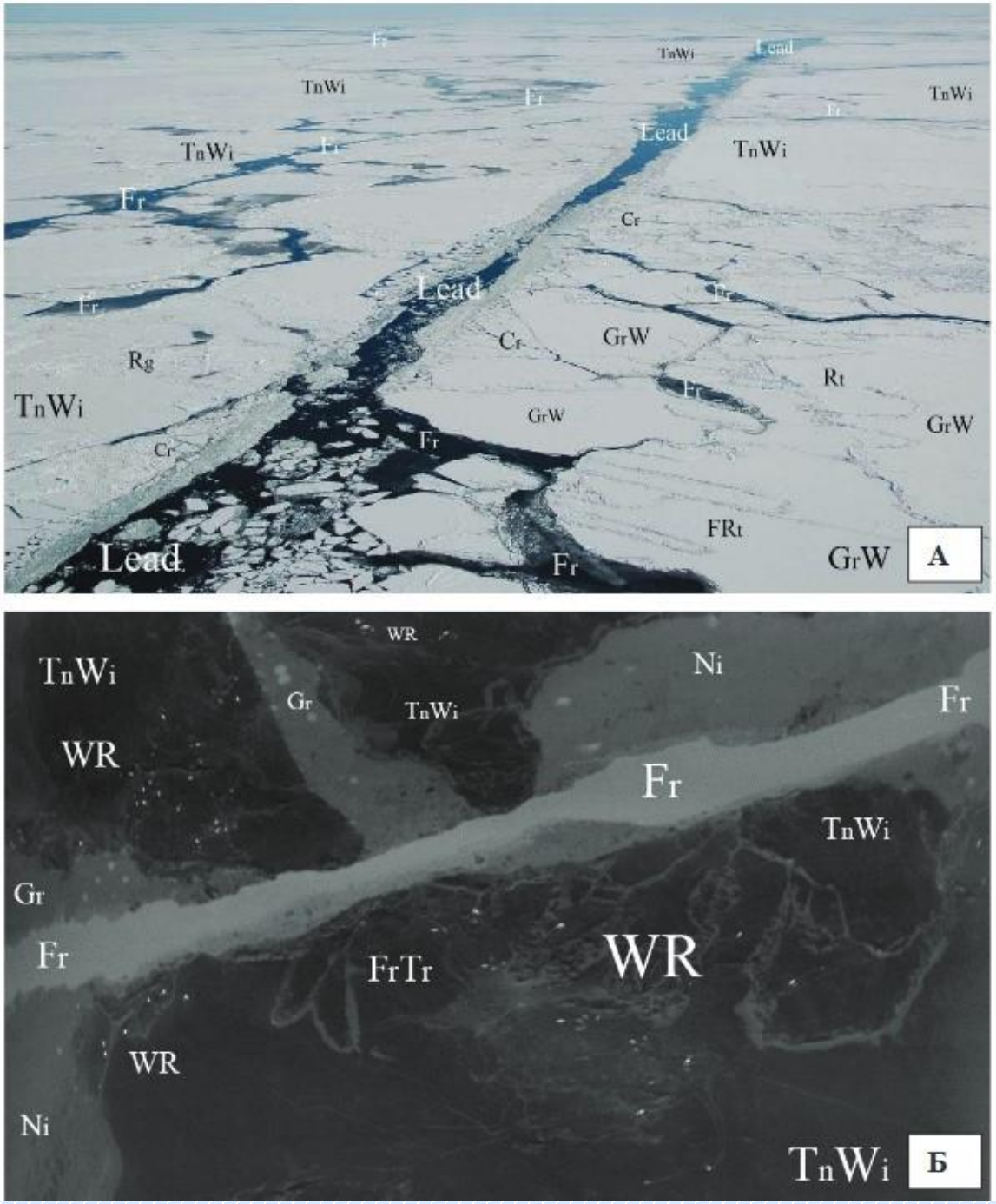


Нарушения сплошности льда по результатам оцифровки снимков ИСЗ NOAA за 23.01.2008.

1. Зимой через разрывы (3% площади ледяного покрова) поступает столько же тепла, сколько через весь многолетний лед.
2. Каналы и разводья поддерживают жизнь морских млекопитающих.
3. Упорядоченные системы нарушений сплошности формируют блоковое макростроение ледяного покрова.
4. Климатические данные о нарушениях сплошности льда учитываются при планировании морских операций; оперативная информация о разрывах используется при прокладке маршрутов плавания судов.

Октябрь-февраль: протяженность разрывов **10-800** км; март-апрель – до **1000-1200** км; Май-июнь – до **570** км.

Лосев С.М. и др., 2017



Панорамное фото (А) и ИК-снимок (Б) судового канала. Бассейн Белого моря, самолет Л-410 «Норд», 15 марта 2007 г.

Gr — серый лед;

GrW — серо-белый лед;

TnWi — тонкий однолетний лед;

Ni — нилас;

Fr — разводье;

FRt — наслоенный лед;

Rg — зона торошения;

WR — области концентрации щенных животных;

Мелентьев В.В., Черноок В.И. и др.// Известия ТИНРО. 2014. Том 179.

Результаты дешифрирования РСА-изображения Envisat района Кандалакшского залива, 6 марта 2009 г.

P1–P3 – полыньи и разводья, образовавшиеся при взломе припая в результате судоходства

Мелентьев В.В., Черноок В.И. и др.// Известия ТИНРО. 2014. Том 179.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ НАРУШЕНИЙ СПЛОШНОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА СНИМКАХ С ДИСТАНЦИОННЫХ НОСИТЕЛЕЙ

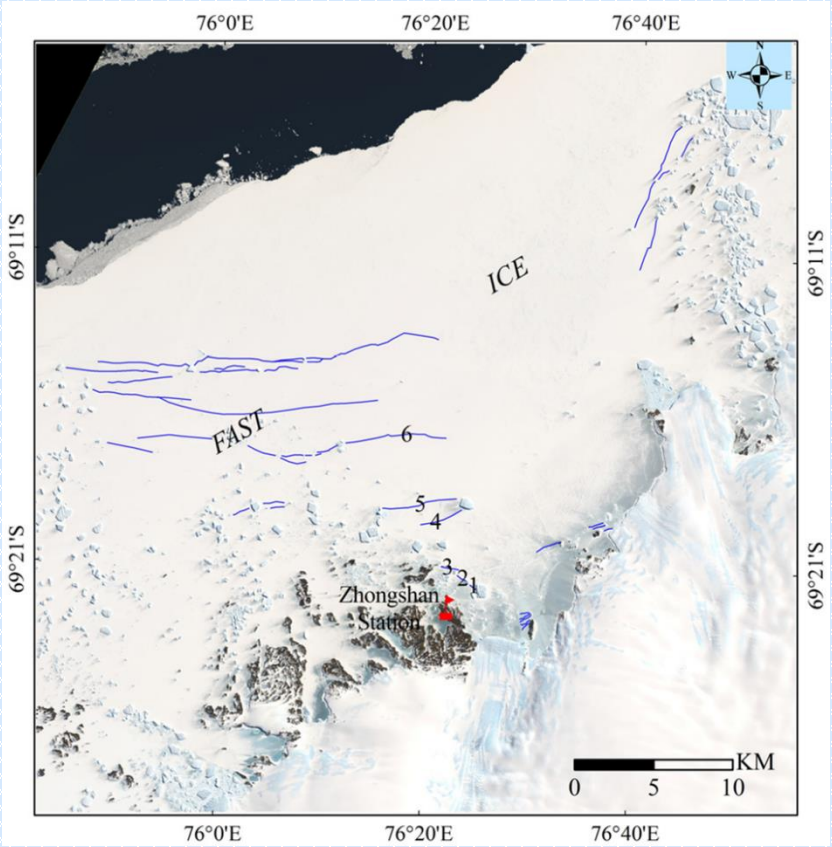
1. МЕТОД ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА

Полуавтоматический метод выделения по спутниковым снимкам приливных трещин в Антарктиде.

Трещины вблизи китайской станции Чжуншань обнаруживаются с помощью алгоритма автоматического извлечения линеаментов, включенного в модуль LINE программного обеспечения *Geomatica 2015*. В модуле LINE предусмотрено три этапа обработки: обнаружение границ, определение порогового значения и извлечение кривой.

1. -получение изображения интенсивности границ с помощью детектора границ Canny
- сглаживание с помощью гауссовского фильтра 3×3,
- обработка изображения градиентным фильтром 3×3 и подавление пикселей, градиенты в которых не являются локальным максимумом (установка «0» интенсивности границ).

2. получение бинарного изображения с использованием порогового значения интенсивности границ.



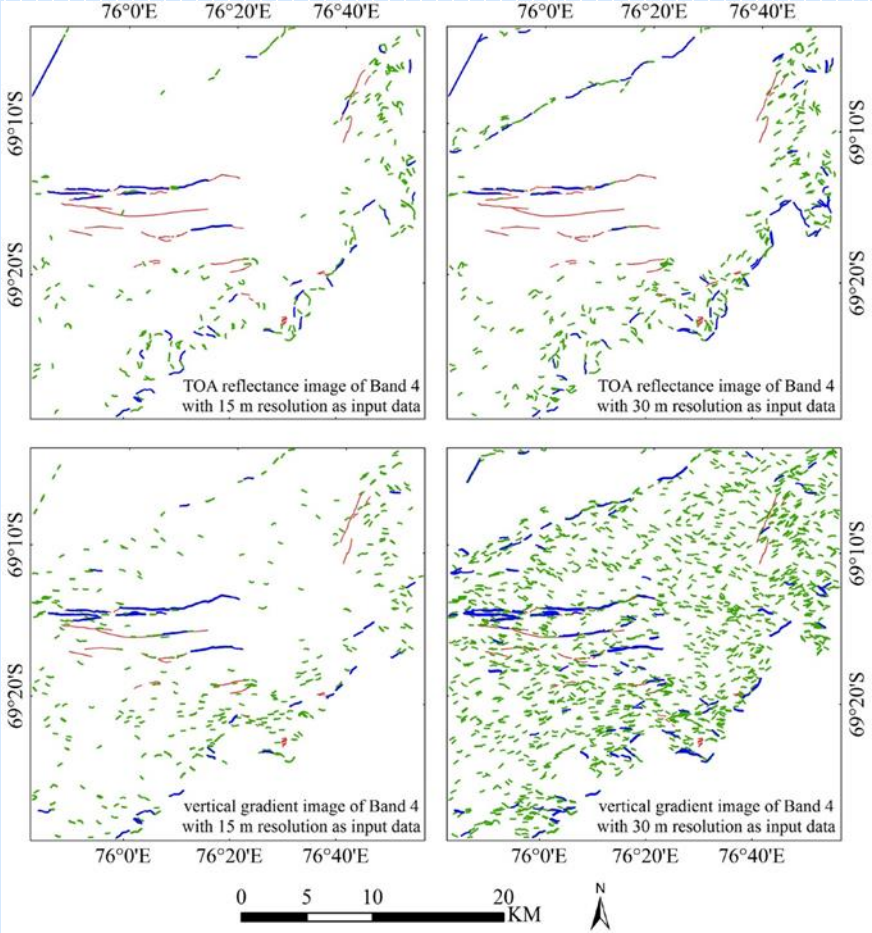
Снимок района станции Чжуншань (Антарктида), RGB: 4,3,2 каналы) Landsat-8 с разрешением 15 м, 30 ноября 2014 г.

Синие линии –приливные трещины, выявленные визуально на изображении; 1-6 – трещины, подтвержденные полевыми наблюдениями 30 и 31 октября 2014 г.

3. – применение алгоритма утончения линий к бинарному изображению границ. Получают скелетные кривые шириной в пиксель.

- извлечение последовательности пикселов для каждой кривой. Кривые, состоящие из пикселей, число которых меньше заданного порогового значения длины (3 пикселя), исключаются из дальнейшей обработки. Извлеченная кривая преобразуется в векторную форму путем подгонки к ней кусочно-линейных сегментов.

В завершение обработки алгоритм связывает пары полилиний, удовлетворяющих следующим критериям: (1) конечные сегменты двух полилиний обращены друг к другу и имеют одинаковую ориентацию (угол между двумя сегментами меньше порога угловой разности (для получения более длинных линий принят 75º-й порог); и (2) конечные сегменты близки друг к другу (расстояние между конечными точками векторов меньше порога расстояния связывания, равного 3 пикселям).

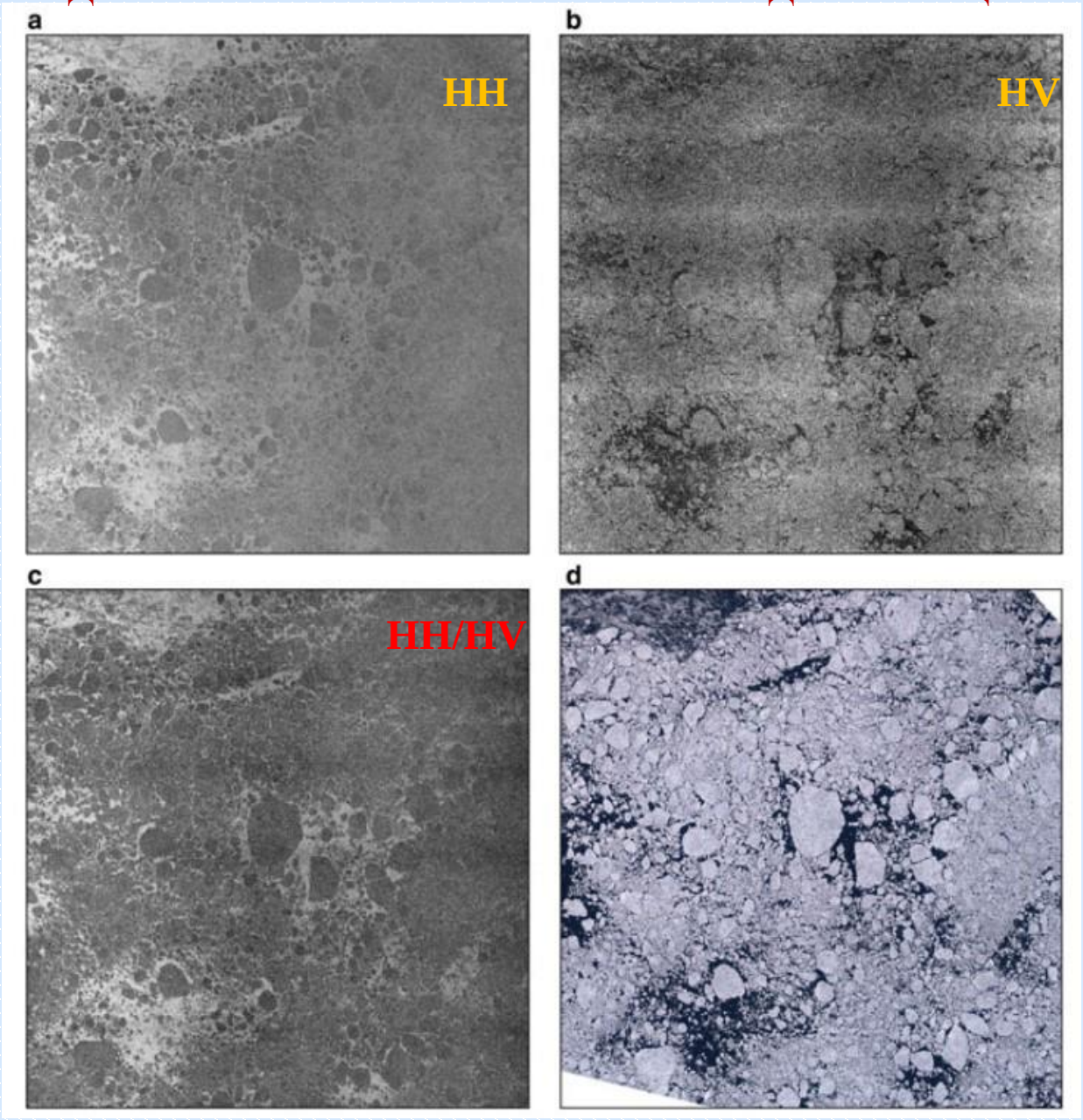


Линии, обнаруженные модулем LINE на спутниковом изображении района станции Чжуншань 30.11.2014 г. для двух типов входных данных и разрешение 15 и 30 м

Голубые линии – линии длиной свыше **1000 м**, **зеленые** линии – линии длиной от **500** до **1000 м**, красные линии – приливные трещины, интерпретированные вручную

Hui F., Li X. et al., // Remote Sens. 2016, 8(3), 242

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕКСТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РАЗРЫВОВ ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ДАННЫМ



a)-c) Sentinel-1.
d) -) Sentinel-2

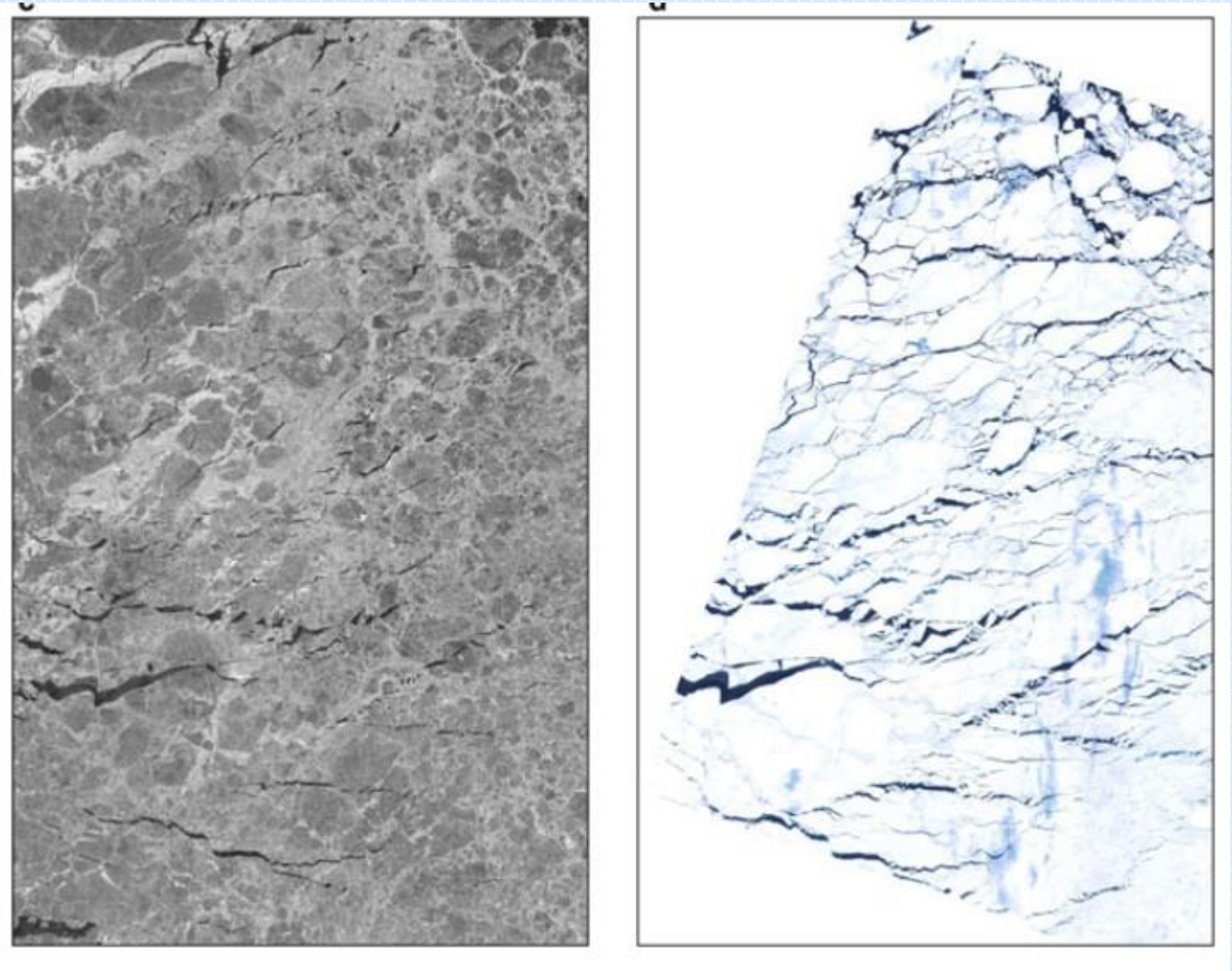
2 августа 2016. Район между Шпицбергеном и ЗФИ

Murashkin D., Spreen G., Huntemann M., Dierking, W. Annals of Glaciology, 2018. 59

Ограничение количества рассчитываемых текстурных харвктеристик при использовании трех классификаторов разрывов на РЛ-снимках Sentinel-1

N	HH	Band product HH·HV	Band ratio HH/HV
1	Entropy$_o$	Inverse difference moment$_o$	Entropy$_{ssv}$
2	ASM$_o$	Correlation$_{ssv}$	Inverse difference moment$_{ssv}$
3	Sum entropy$_{ssv}$	Sum entropy$_o$	ASM$_{ssv}$
4	Sum entropy$_o$	Sum entropy$_{ssv}$	Inverse difference moment$_o$
5	Inverse difference moment$_o$	Entropy$_o$	Information measure of correlation$_{ssv}$
6	Entropy$_{ssv}$	Entropy$_{ssv}$	Sum entropy$_{ssv}$
7	Sum of squares: variance$_{ssv}$	Difference entropy$_{ssv}$	ASM$_o$
8	ASM$_{ssv}$	ASM$_o$	Difference entropy$_{ssv}$
9	Difference entropy$_o$	Inverse difference moment$_{ssv}$	Entropy$_o$
10	Difference entropy$_{ssv}$	Sum of squares: variance$_{ssv}$	Difference entropy$_o$
11	Correlation$_{ssv}$	Difference entropy$_o$	Information measure of correlation$_o$
12	Information measure of correlation$_o$	Information measure of correlation$_o$	Correlation$_{ssv}$
13	Information measure of correlation$_{ssv}$	Contrast$_o$	Correlation$_o$
14	Contrast$_{ssv}$	Correlation$_o$	Sum variance$_{ssv}$
15	Contrast$_o$	Difference variance$_{ssv}$	Sum average / cluster tendency$_{ssv}$
16	Difference variance$_{ssv}$	Information measure of correlation$_{ssv}$	Sum of squares: variance$_o$
17	Sum average / cluster tendency$_{ssv}$	ASM$_{ssv}$	Sum of squares: variance$_{ssv}$
18	Correlation$_o$	Sum variance$_{ssv}$	Difference variance$_{ssv}$
19	Inverse difference moment$_{ssv}$	Contrast$_{ssv}$	Sum entropy$_o$
20	Sum variance$_{ssv}$	Sum average / cluster tendency$_{ssv}$	Contrast$_o$
21	Sum of squares: variance$_o$	Sum of squares: variance$_o$	Difference variance$_o$
22	Difference variance$_o$	Difference variance$_o$	Contrast$_{ssv}$
23	Sum average / cluster tendency$_o$	Sum average / cluster tendency$_o$	Original band
24	Sum variance$_o$	Sum variance$_o$	Sum average / cluster tendency$_o$
25	Original band	Original band	Sum variance$_o$

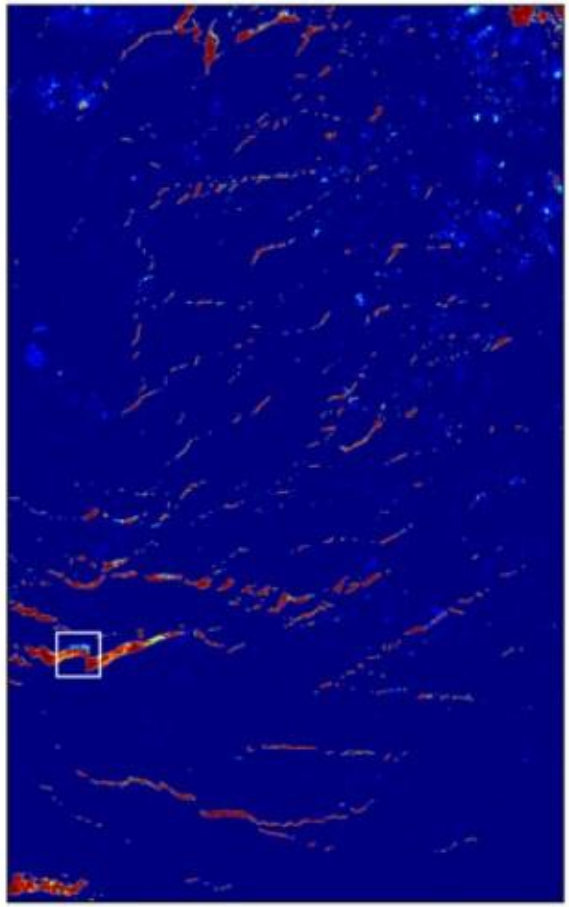
Murashkin D., Spreen G., Huntemann M., Dierking, W.
Annals of Glaciology, 2018. 59



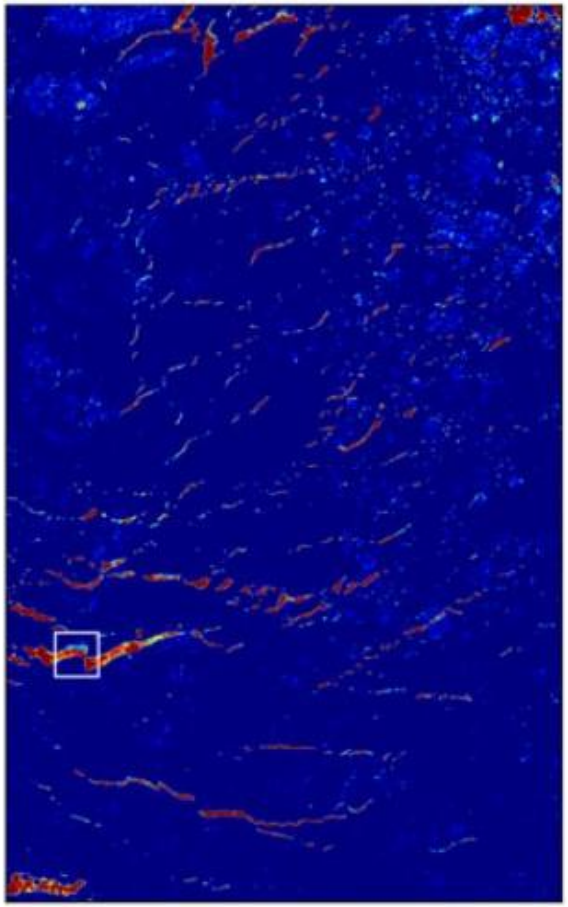
(HH·HV) SAR Sentinel-1, 10 апреля 2017, район ЗФИ

Sentinel-2, 10 апреля 2017, район ЗФИ

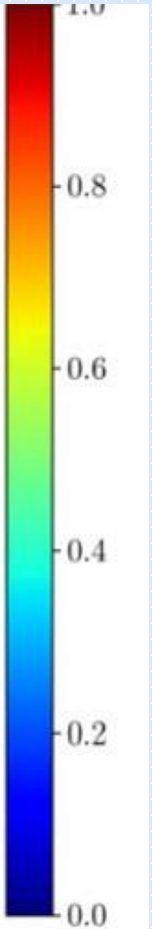
Murashkin D., Spreen G., Huntemann M., Dierking, W. Annals of Glaciology, 2018. 59



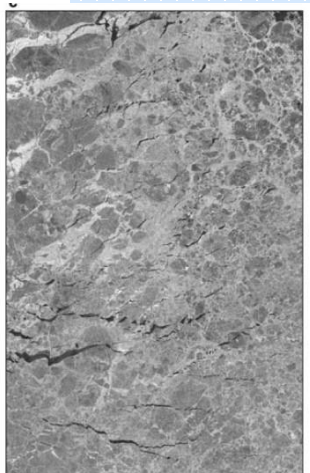
Классификатор HH

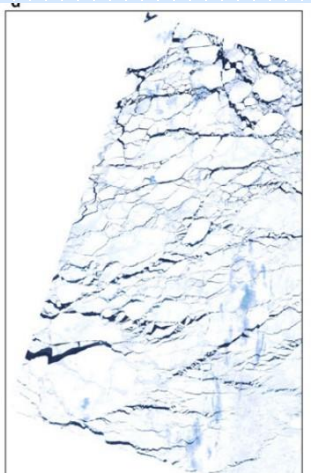


Классификатор HH x HV

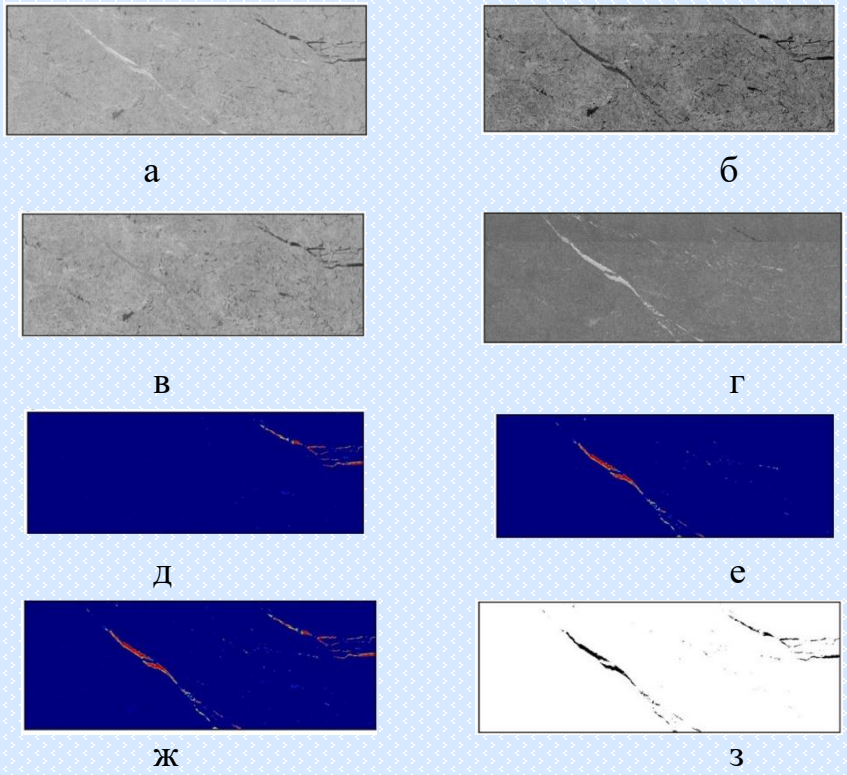


Вероятностная классификация разводий на снимке Sentinel-1 за 10.04.17,использующая метод рандомизированного леса.

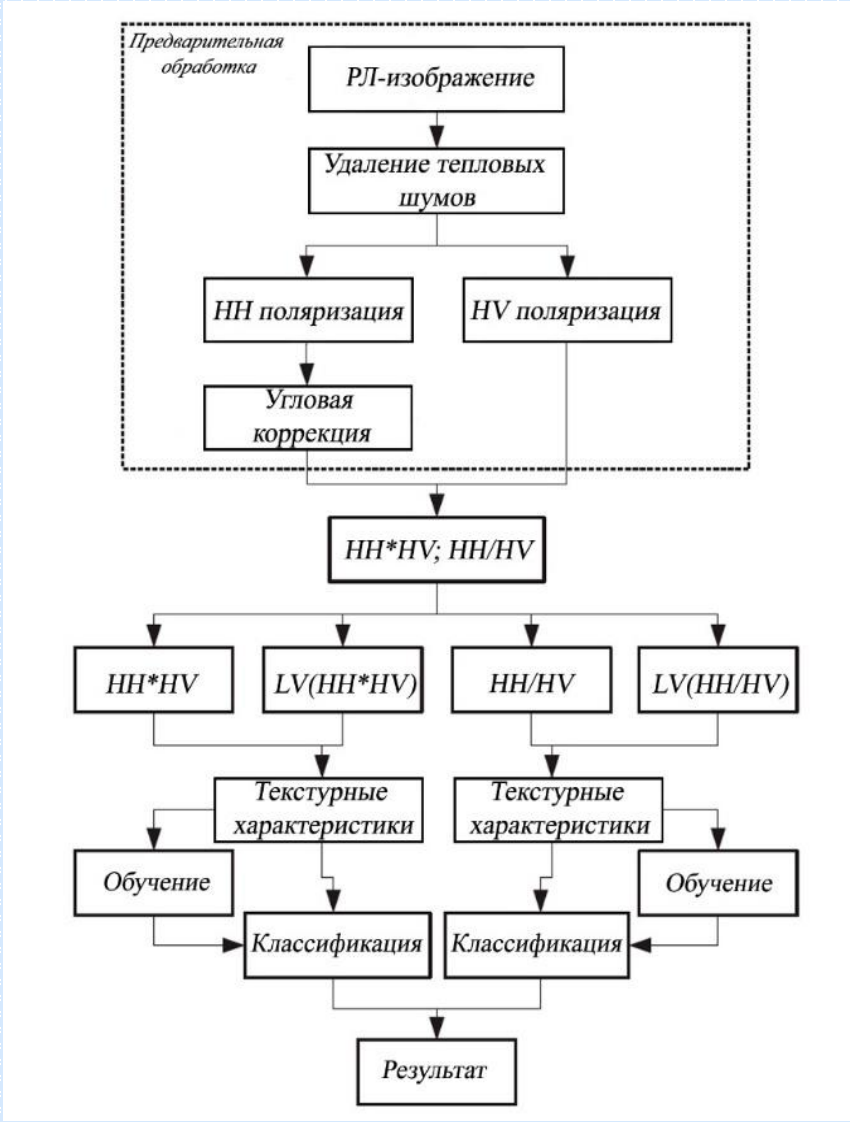




Murashkin D., Spreen G., Huntemann M., Dierking, W.
Annals of Glaciology, 2018. 59



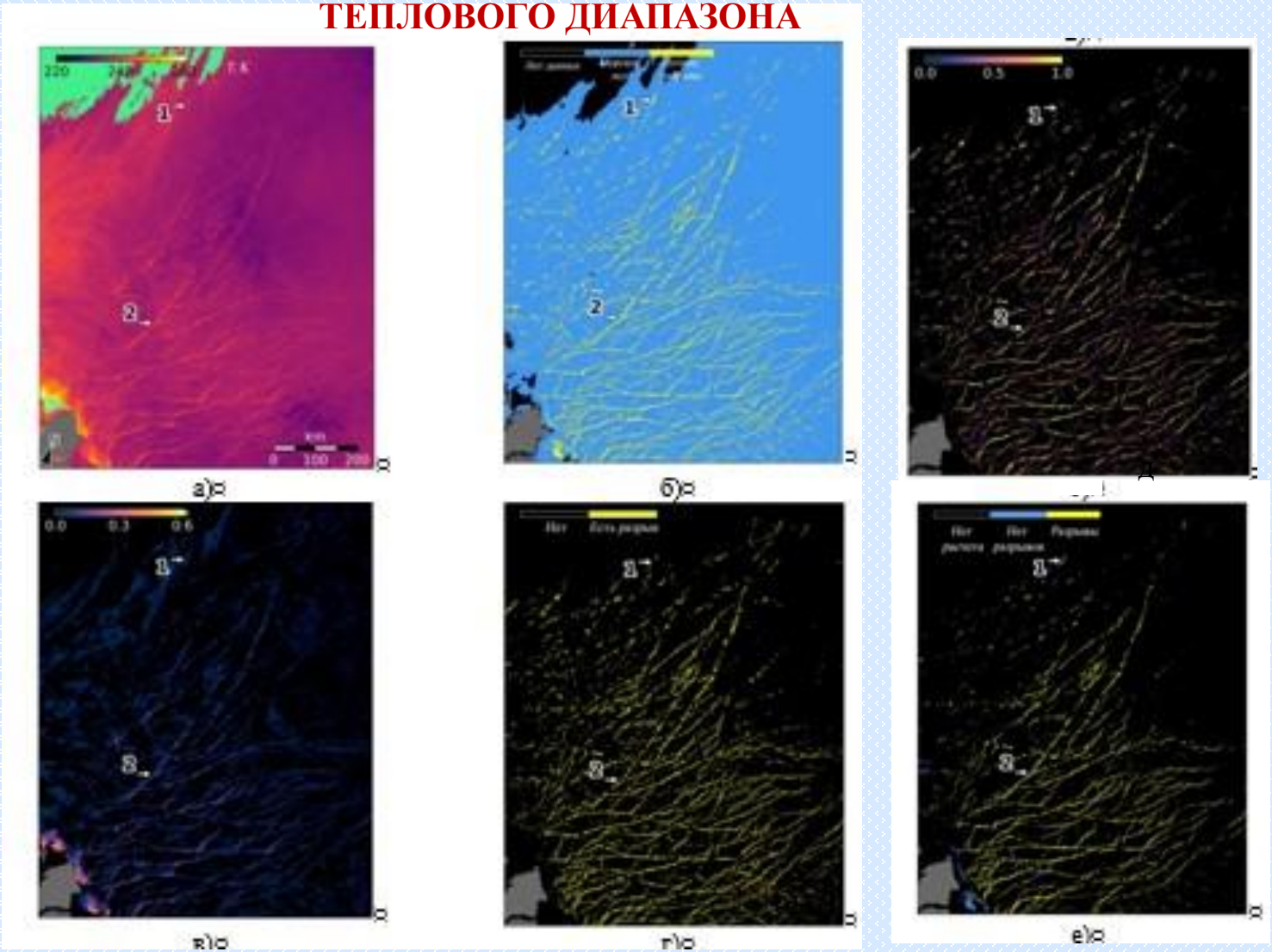
Обнаружение разводий на снимках Sentinel-1.
10 апреля 2010 г., район Земли Франца-Иосифа
а) поляризация HH; б) поляризация HV; в) HH×HV; г) HH/HV; д), е) вероятностная классификация изображения на основе отношения каналов с использованием классификатора рандомизированного леса: выделение темных разрывов (д) и светлых разрывов (е); ж) объединение данных д и е; з) конечный результат классификации – бинарная классификация по рис. (ж) с применением порога вероятности 50%.



Алгоритм метода детектирования разводий по радиолокационным изображениям Sentinel-1
LV обозначает локальную изменчивость (изображение за вычетом фона

Murashkin D., Spreen G., Huntemann M., Dierking, W. Annals of Glaciology, 2018. 59

3. ВЫДЕЛЕНИЕ РАЗРЫВОВ ВО ЛЬДУ ПО ИК-ИЗОБРАЖЕНИЯМ ТЕПЛОВОГО ДИАПАЗОНА

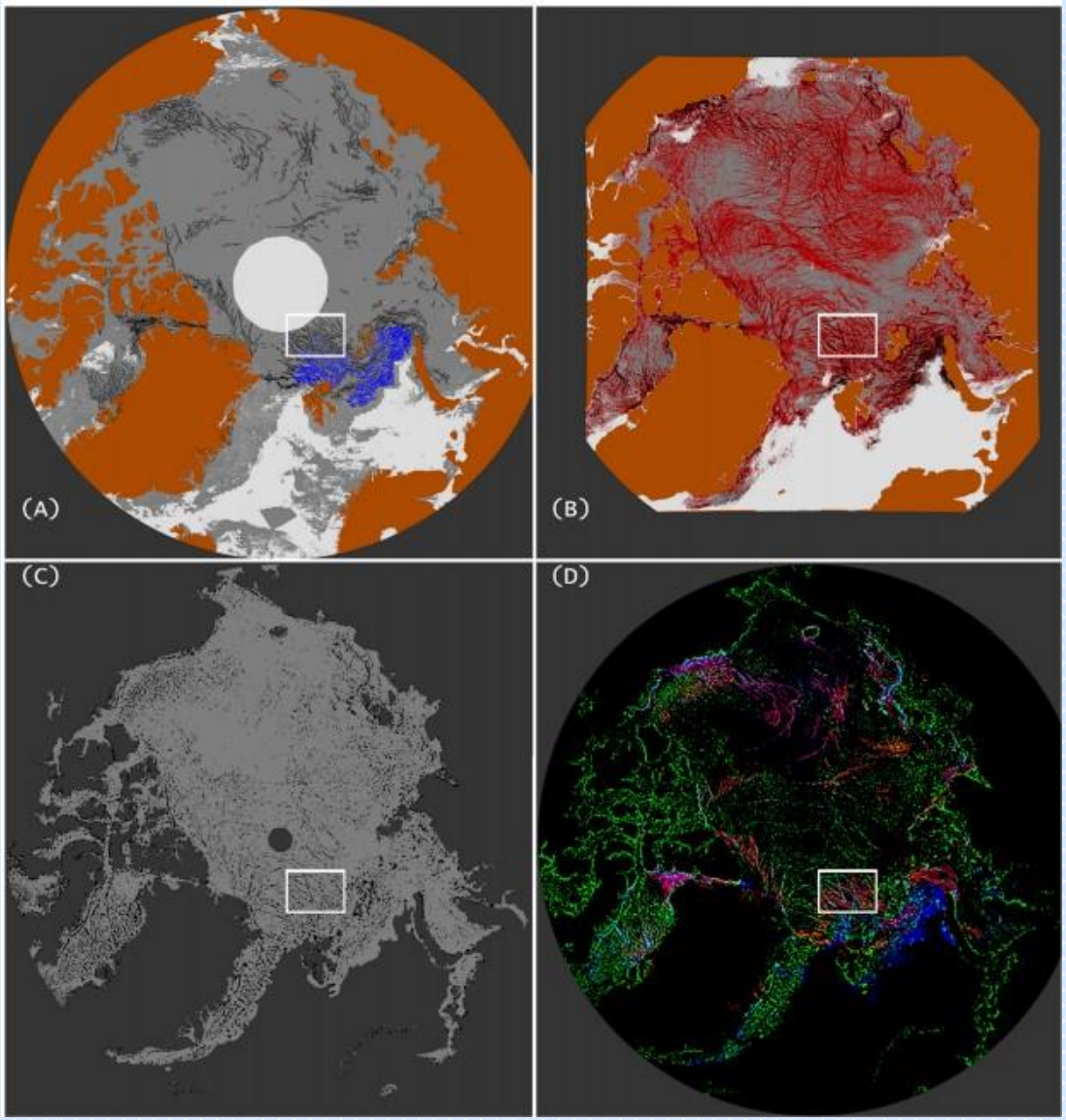


– Набор наиболее важных параметров, полученных при работе алгоритма выделения разводий по ИК-снимкам (1-й уровень алгоритма Рейзера с соавт..

а) фрагмент ИК-изображения MODIS; б) изображение с потенциальными разводьями; в) потенциальная открытая вода; г) границы, полученные с помощью детектора границ Канни; д) линейность; е) разрывы.

1- артефакты «теплых» облаков; 2 – разводья в ледяном покрове

Reiser F., Willmes S., Heinemann G. A / Remote Sensing. 2020, 12(12). 1957



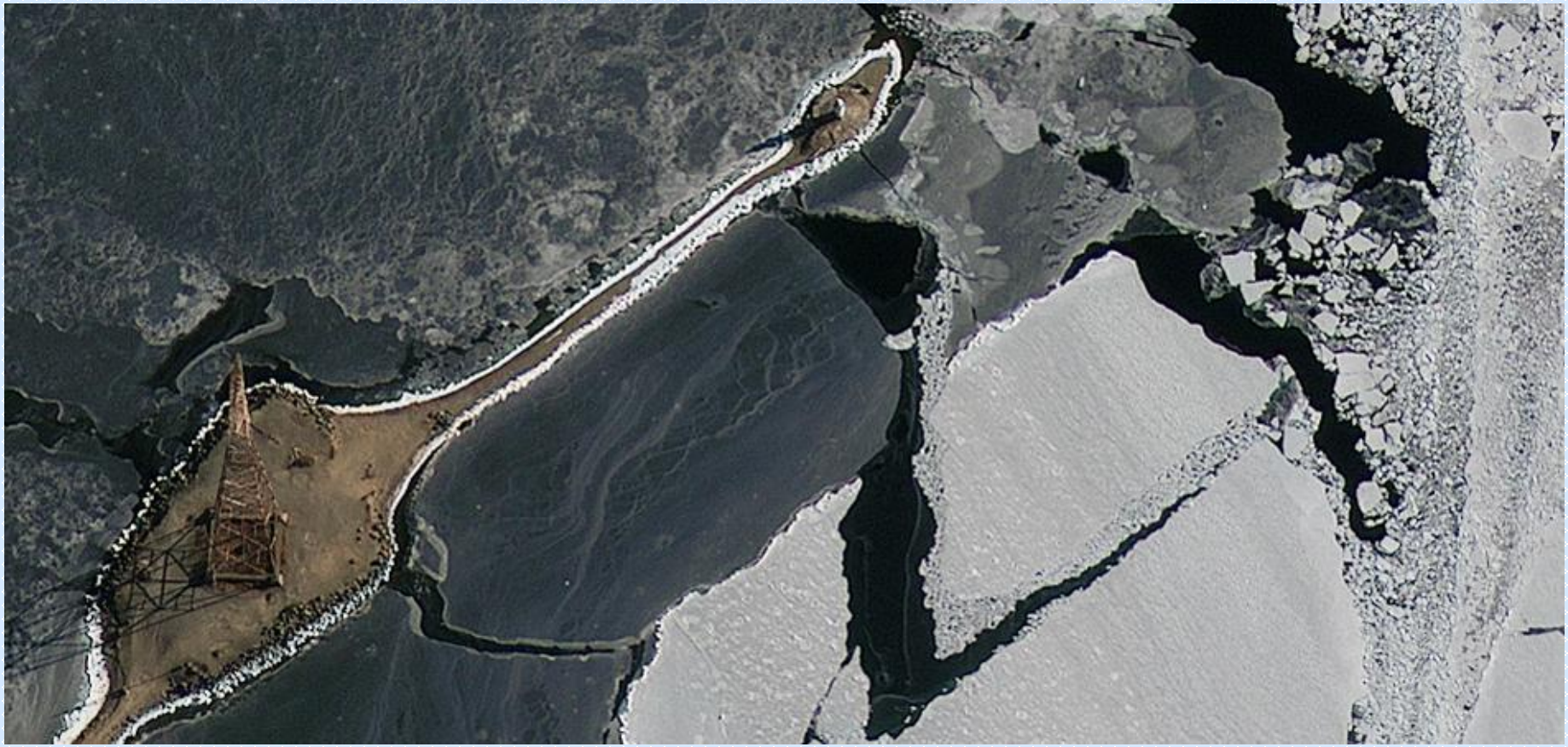
3 марта 2009 г.

Пример картирования разводий по спутниковым данным с использованием различных алгоритмов.

а) разводья, идентифицированные по тепловому ИК каналу (по методу Хофмана с соавт.);
б) разводья, обнаруженные по тепловому ИК каналу по методу Willmes и Heinemann;
в) разводья, картированные по данным СВЧ-радиометра AMSR-E ;
г) композитный продукт, на котором красные линии означают разводья, обнаруженные методом Хофмана, синим – разводья по методу Willmes and Heinemann, зеленым – по данным AMSR-E.

Hoffman J.P., Ackerman S.A., Liu Y., Ke J.R. // Remote Sens. 2019, 11, 521

Недостатком методов обнаружения разводий по данным тепловых ИК-каналов является сложность создания точной облачной маски, особенно в ночное время и тот факт, что тепловой контраст и форма краев облаков и теней облаков часто аналогичны контрасту и форме разводий. СВЧ-радиометры не создают проблем с учетом облачности, но обладают существенно более низким пространственным разрешением. Оптимальным решением для задачи картирования разводий могут стать алгоритмы, использующие сочетание данных ИК и СВЧ-радиометров



Спасибо за внимание!