



ААНИИ

Спутниковый мониторинг опасных ледяных образований

В.Г. Смирнов

Школа молодых ученых, организованная в рамках реализации проекта Российского научного фонда «Система морской лед-океан-атмосфера в Арктике по данным спутниковых наблюдений и моделирования» Президентской программы исследовательских проектов Соглашение №17-77-30019 между РГГМУ и Российским научным фондом

26 ноября 2020 г., Санкт-Петербург

Наиболее часто встречающиеся ледяные образования и их определения в соответствии с международной Номенклатурой ВМО по морскому льду [Бюллетень ВМО, 1970]:

- *Торос (Hummock)* – любое холмообразное нагромождение льда, образовавшееся в результате сжатия. Может быть свежим или сглаженным. Подводная часть тороса называется подторос.
- *Гряда торосов (ridge)* – сравнительно прямолинейное нагромождение битого льда, образовавшееся в результате сжатия. Может быть свежей или сглаженной. Подводная часть гряды называется килем.
- *Барьер торосов* (в номенклатуре ВМО отсутствует) – мощная гряда торосов на припае (обычно из нескольких параллельных гряд на внешней границе припая), местами скрепленная с грунтом.
- *Стамуха (Grounded hummock)* – торосистое сидящее на мели ледяное образование.
- *5) Несяк (Floeberg)* – большой торос или группа сmerzшихся торосов, представляющая собой отдельную льдину, находящуюся на плаву.
- *6) Ледяной холм (бугор)* – монолитное возвышение над поверхностью льда, образовавшееся в результате многолетнего сглаживания и таяния тороса или гряды торосов (в номенклатуре ВМО термин отсутствует).
- *7) Многолетний лед (multi-year ice)* – старый лед толщиной до 3 м и более, переживший таяние по крайней мере в течение двух лет. Торосы еще более сглаженные, чем у двухлетнего льда, и лед почти полностью опреснен.



AARI

Из всего многообразия потенциально опасных ледяных образований, которые необходимо обнаруживать и осуществлять их регулярный мониторинг средствами спутникового дистанционного зондирования, наиболее значимыми для практических приложений можно считать следующие **опасные ледяные образования (ОЛО)**:

- многолетние ледяные поля;
- **айсберги различных размеров;**
- **поля толстого однолетнего льда** с большими (более 3 м высотой) грядками торосов;
- стамухи;
- несяки;
- **всплывшие и подвижные стамухи.**

Дистанционные средства и технологии должны обеспечить обнаружение этих ОЛО, а также контролировать траектории их движения на открытой водной поверхности и в однолетнем льду.

В настоящей лекции рассматриваются только стамухи и айсберги.



Стамухи арктических морей

Стамухи принято различать по времени и месту появления, а также по виду льда, из которого они образуются. Выделяют стамухи осеннего происхождения и зимнего. Осенние стамухи образуются из ниласа и серого льда толщиной 5-15 см, размеры их обычно невелики (менее 100 м). После установления прочного припая в прибрежной зоне стамухи осеннего происхождения прекращают увеличиваться в размере, сохраняясь в неизменном виде до весеннего взлома припая. Стамухи зимнего происхождения по размерам существенно больше осенних, их протяженность может превышать 1 км. Образованы зимние стамухи из более толстого льда, чем осенние, так как ледяной покров ко времени их образования уже достигает стадии серо-белого и тонкого белого льда.

Периоды формирования стамух связаны с продолжительностью естественно-синоптических периодов. Образование стамух происходит достаточно импульсивно, за счет периодических и непериодических динамических процессов. Формирование стамух можно подразделить на несколько фаз:

Первая фаза связана с моментом становления припая на небольших глубинах (менее 3 м). При этом толщина молодого льда составляет около 15 см.

Вторая фаза наступает на глубине моря около 5-6 м и при толщине льда 25-35 см, во время смещения внешней границы припая до 5-6 м изобаты.

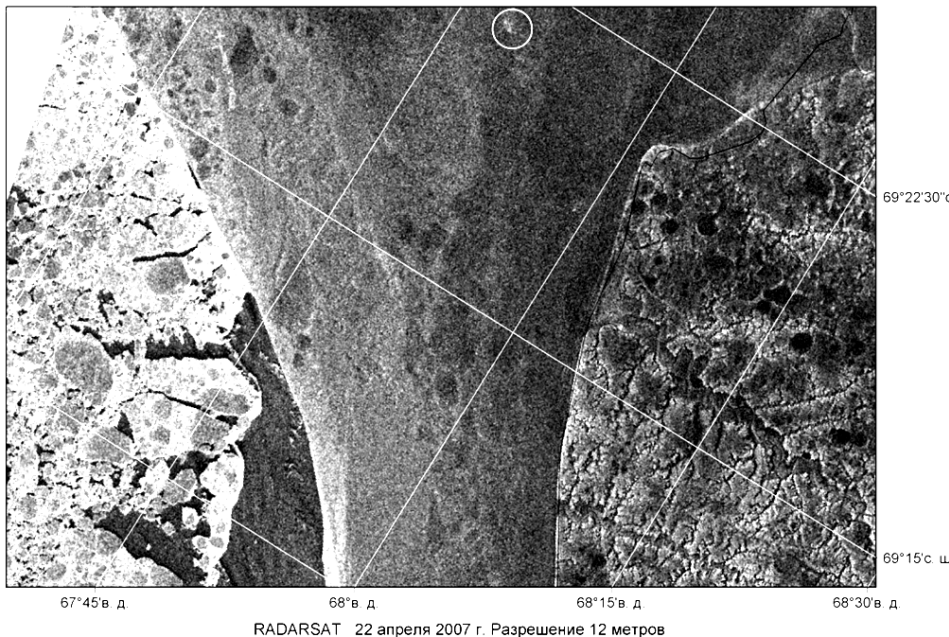
Третья фаза наступает ближе к зиме, когда происходит полное становление припая до 10-15 м изобат. В этот период стамухи образуются на глубине около 12-13 м при толщине льда 30-70 см.

Четвертая фаза становления стамух достигается при увеличении толщины льда до 70-120 см. При этом граница припая распространяется до 20-25 м изобат при средней глубине моря 22,5 м



Стамухи

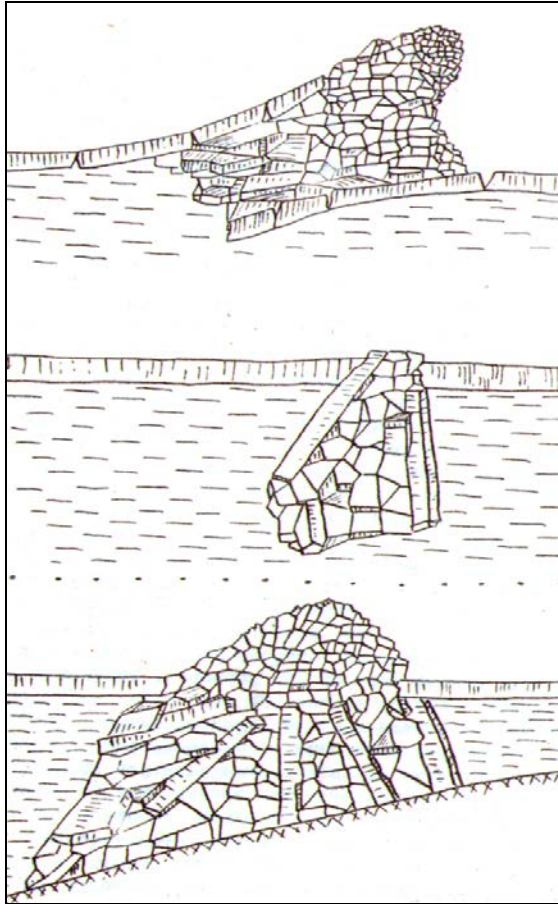
AARI



Фрагмент снимка RADARSAT SAR image, на котором отмечено положение крупной стамухи (белый круг).
Байдарацкая губа, 22 апреля 2007)



Наземная фотография обследованной стамухи (фото А. Тюрякова). По наземному обследованию стамуха имела длину 150 – 180 м, высоту 8 – 9 м над поверхностью льда и ширину 40 м. Глубина моря в месте нахождения стамухи - около 6.5 м.



Схематическое представление механизма формирования стамух или подводных плотин из набивного льда

Места генерации стамух приурочены к относительно малым глубинам (не более 30-50 м). Срок жизни стамух составляет от нескольких месяцев до нескольких лет (многолетние стамухи). Для крупных стамух с размерами около 10 км высота паруса составляет от 20 до 40 м.



Районы формирования стамух в Арктике



Обнаружение стамух

Для обнаружения стамух в арктических морях в период полярного дня используют радиолокационную информацию совместно со снимками оптического диапазона – видимого и инфракрасного. Детальность оптических снимков, их способность выявить текстуру ледяных образований позволяет повысить информативность спутниковой съемки, достоверность обнаружения и идентификации стамух. В морях Российской Арктики такое совместное использование информации можно с успехом применять с марта по октябрь, когда доступно наблюдение полярного региона в видимом диапазоне.

Информативность данных видимого диапазона в значительной степени зависит от облачных условий, поскольку облачность в этом диапазоне экранирует солнечное излучение, отраженное от земной поверхности. Поэтому при мониторинге опасных ледяных образований Арктики ведущая роль отводится данным спутниковых радиолокаторов, обладающих свойством всепогодности и независимости от солнечной инсоляции.

Процедура мониторинга стамух является многоступенчатой с проверкой местоположения объектов на последовательных снимках, анализом косвенных признаков, созданием «паспорта» объекта и его картированием.

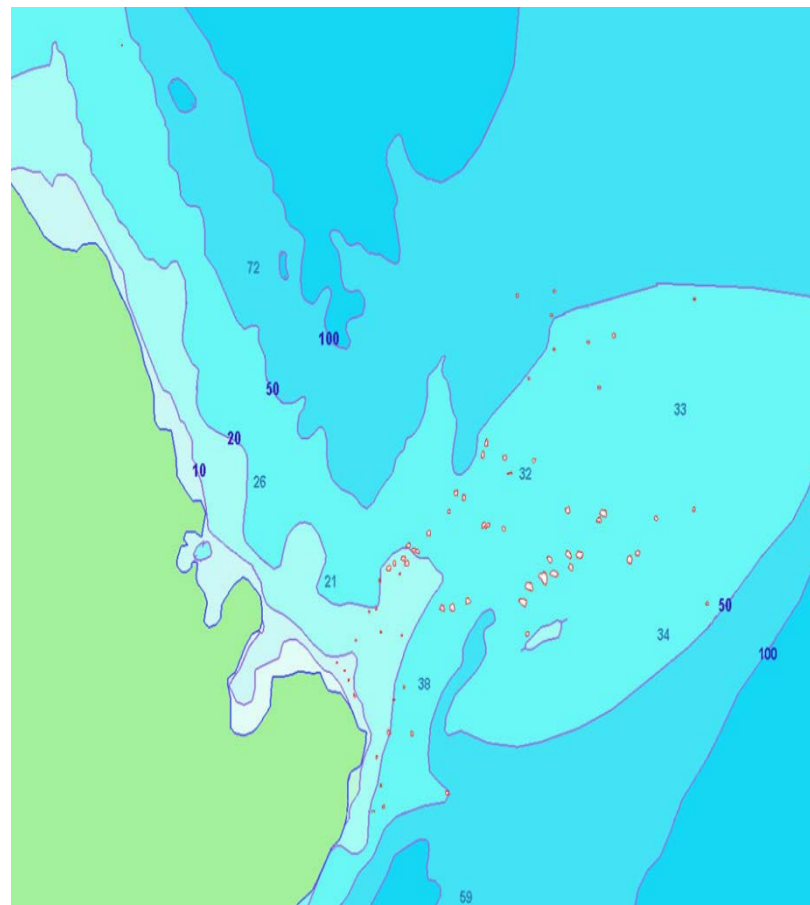
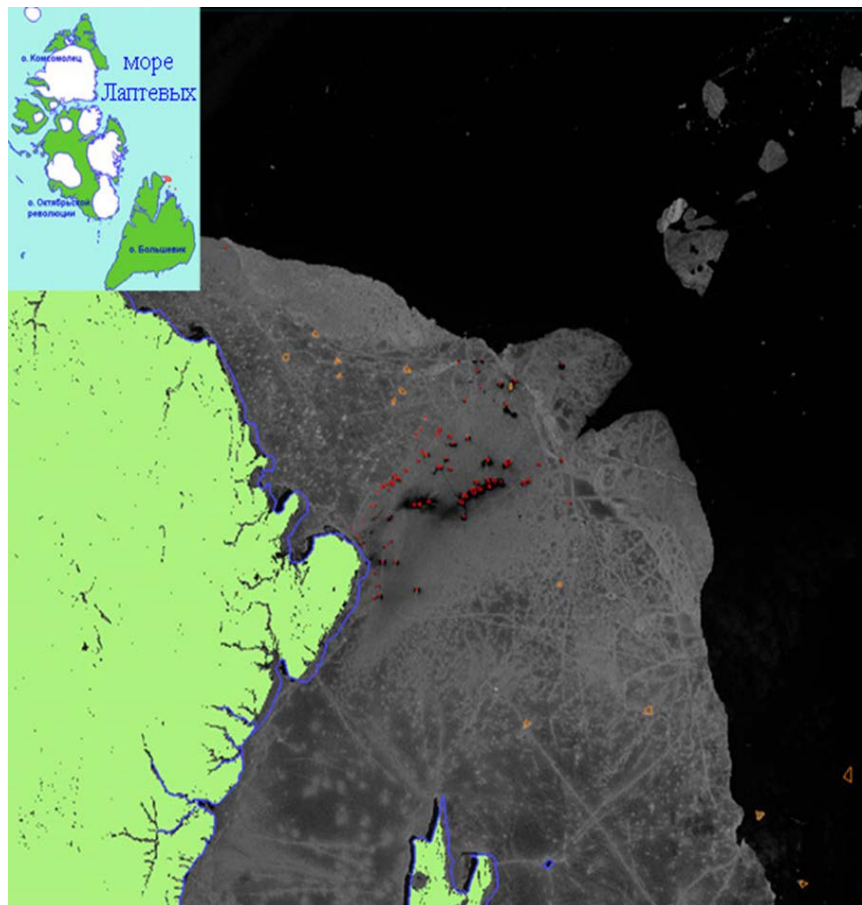


Признаки

Кроме основного признака – неизменности местоположения ледяного объекта на протяжении длительного периода (месяцы, а иногда, и годы) существует несколько дополнительных признаков, по которым можно определить стамуху по спутниковым снимкам:

- на подветренной стороне от припая стамухи образуется полынья. При смене направления ветра полынья меняет свое местоположение;
- стамухи, находящиеся во льдах в летний период, окружены пространством открытой воды;
- наличие шлейфа или канала открытой воды, когда стамуха **находится** в зоне мелкобитых льдов летом, или аналогично зимой, когда стамуха «прорезает»двигающийся массив сплоченных однолетних льдов подобно маленькому острову
- стамухи, как показывают многолетние наблюдения, располагаются в Арктике на глубинах до 50 м.
- стамухи имеют на снимках, в отличие от айсбергов, хаотичную текстуру и неровные внешние границы.
- стамуха с припаем сохраняет свое местоположение, в то время как лед вокруг нее дрейфует в зависимости от направления и скорости ветра;
- лед при обтекании стамух дробится и разламывается, а образующиеся куски льда сминаются за зоной разрежения за стамухой. В итоге в ледяном покрове, состоящем из молодых льдов, остается след;
- вблизи стамух изменяется направление и скорость дрейфа льдов; дрейф льда мимо стамух иллюстрирует влияние приливных течений на направление смещения льда.

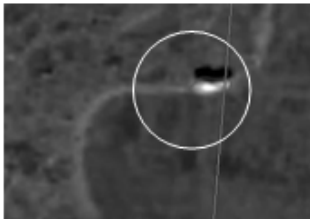
Также следует учитывать, что при определенных условиях (достаточно редко) возможен отрыв стамухи от дна и ее перемещение. В этих случаях идентификация «всплывших» стамух затрудняется. При этом в качестве основного признака идентификации используется хаотичная текстура и неровные внешние границы объекта

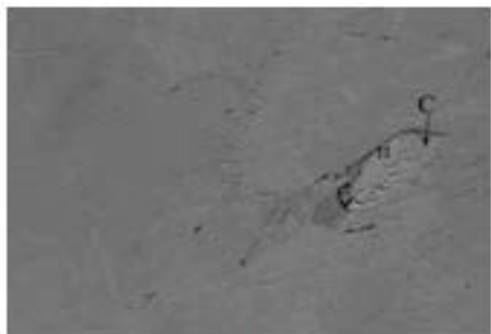


Положение стамух у побережья о-ва Большевик (залив Ахматова) архипелага Северная Земля на панхроматическом снимке Landsat-8 за 24 июля 2014 г. (а) и на батиметрической карте (б); красным цветом отмечены стамухи, оранжевым – айсберги

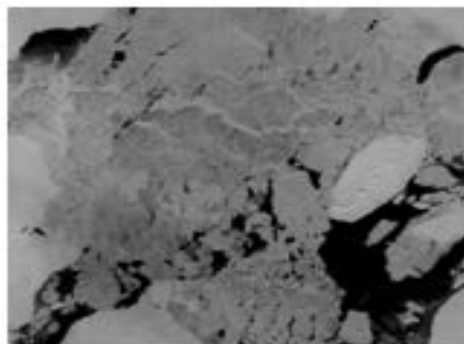


Параметры стамух, обнаруженных в феврале-апреле 2017 в море Лаптевых

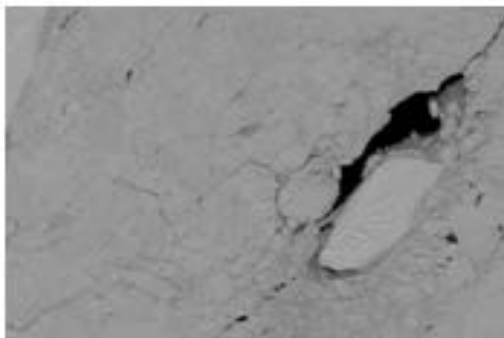
№	дата эксперимента	дата съемки Landsat-8	размер		Landsat-8	Снимок с ледовой станции
			длина, м	ширина, м		
1	25.03.2017	14.03 2017	360	60		
2	26.03.2017	14.03 2017	185	40		
3	02.04.2017	10.04 2017	210	45		



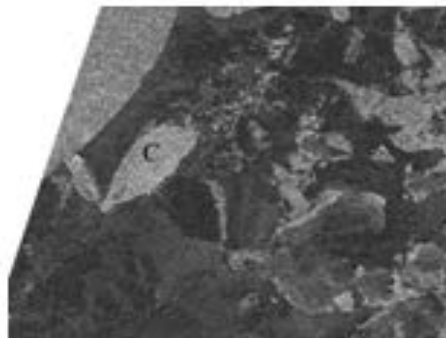
а)



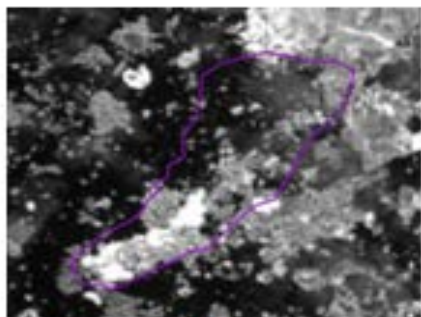
б)



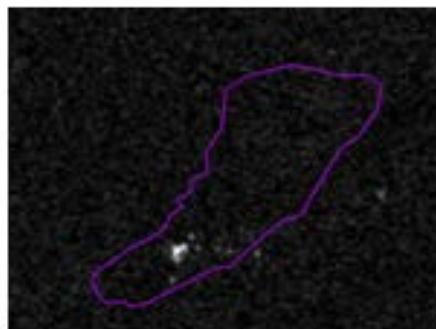
в)



г)

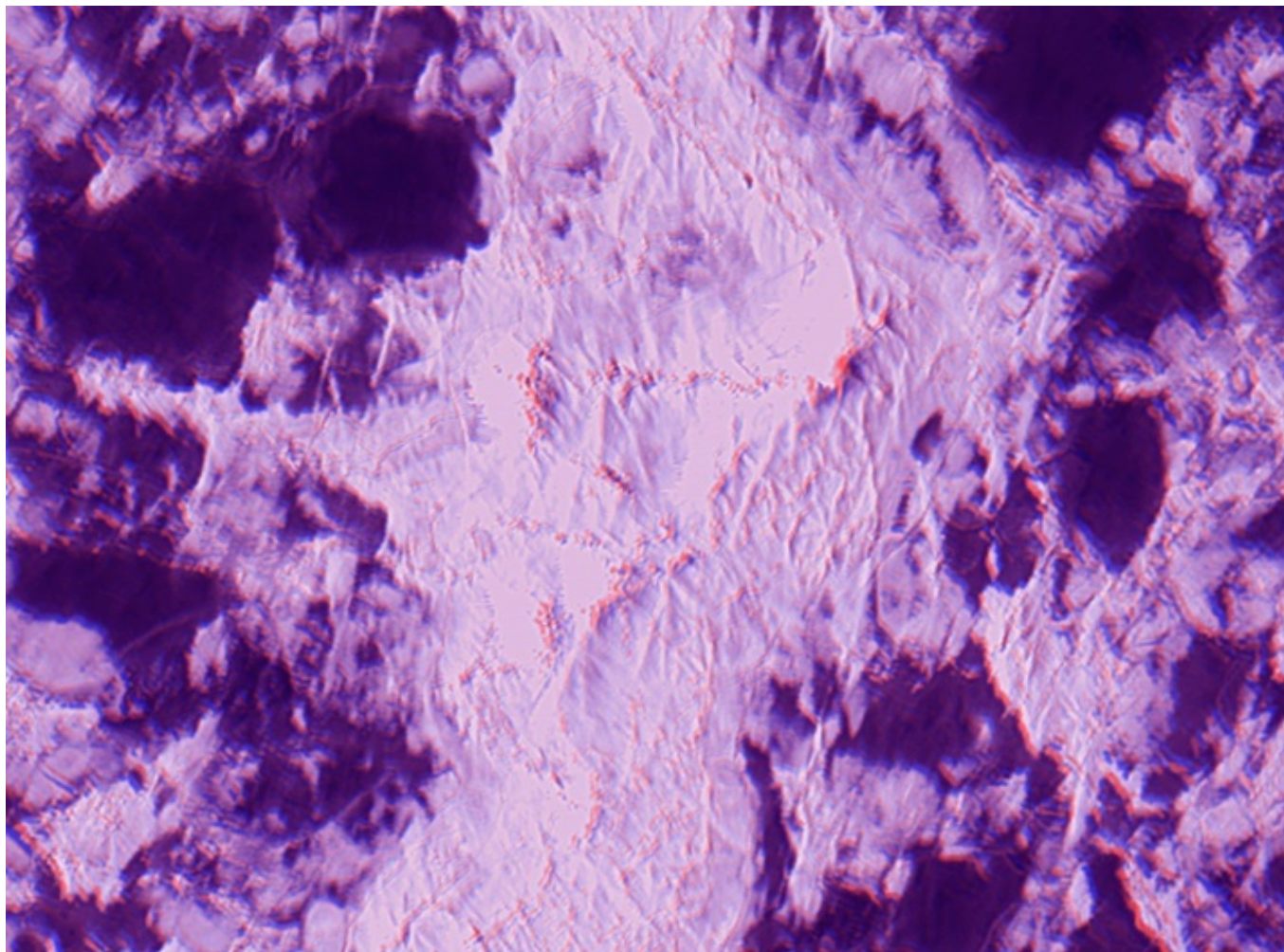


д)

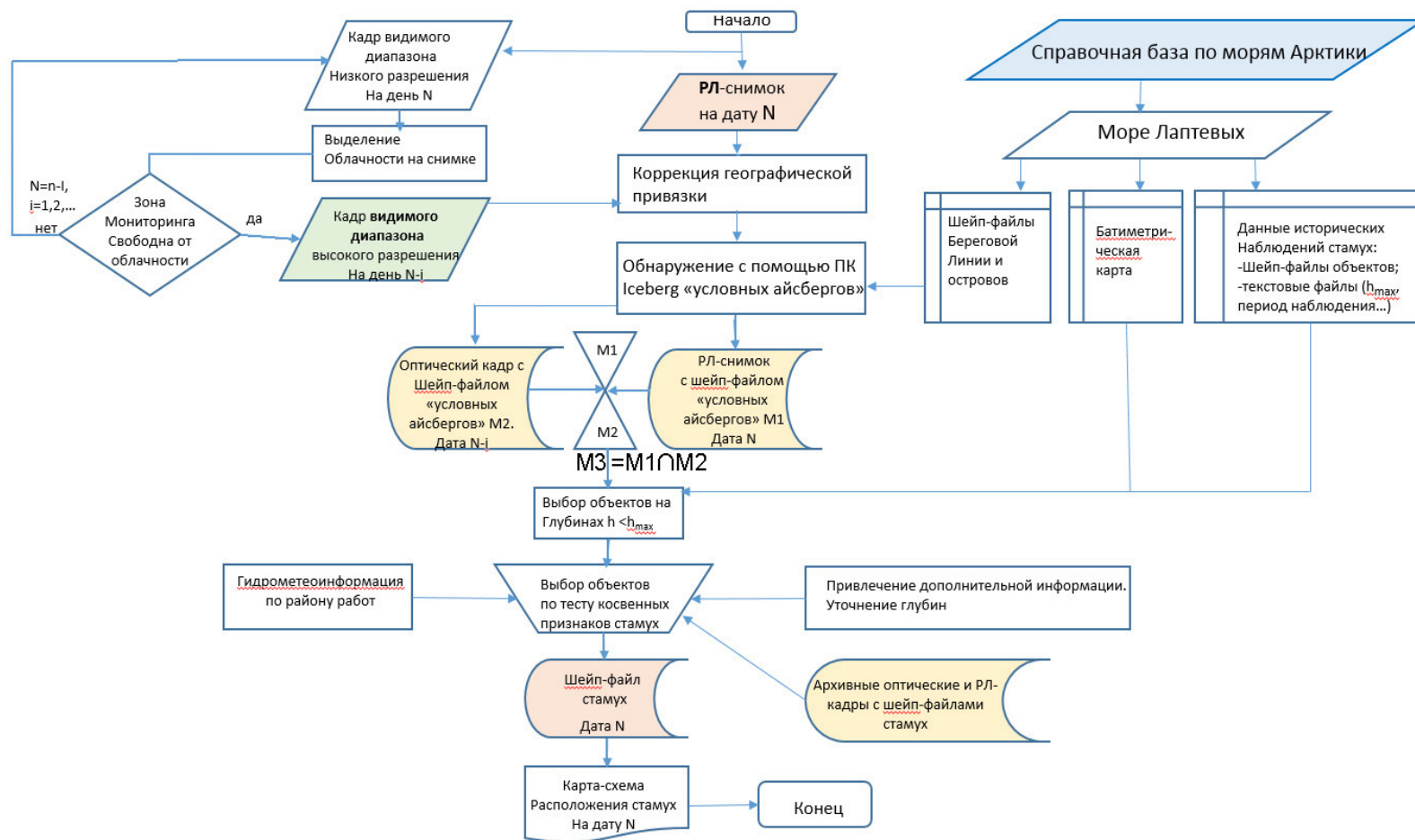


е)

Стамбух на
снимках ИСЗ
Landsat-8 (а-в,
д) и
RADARSAT-2 (г,
е)
а) 26.02 2017; б)
9.03 2017; в)
15.04 2017; г)
25.04 2017; д)
20.07 2017; е)
30.07



2009 г, июнь, Байдарацкая губа, «Эрос», разрешение 1 м
Панхром, стамуха.



Технологическая схема обнаружения стамух в Арктических морях в период полярного дня по спутниковым радиолокационным снимкам и оптическим изображениям (на примере моря Лаптевых)



Айсберги

- Ледяные образования материкового происхождения на шельфе замерзающих морей встречаются значительно реже, чем гряды торосов и стамухи. Однако появление айсбергов (обломков или кусков айсберга) в непосредственной близости от гидротехнических сооружений создает угрозу их повреждения или разрушения. В соответствии с Номенклатурой ВМО по морскому льду ледяные образования материкового происхождения подразделяются так:
- 1) *Ледяной дрейфующий остров (ice island)* – большой кусок плавучего льда, возвышающийся над уровнем моря, который откололся от арктического шельфового ледника. Имеет толщину 30- 50 м и площадь от нескольких тысяч квадратных метров до 500 км² и более.
- 2) *Айсберг (iceberg)* – массивный, отколовшийся от ледника кусок льда любой формы, который выступает над уровнем моря более чем на 5 метров, который может быть на плаву или сидящим на мели.
- 3) *Обломок айсберга (bergy bit)* – большой кусок плавающего глетчерного льда, обычно выступающий меньше 5 м над уровнем моря, но более чем 1 м и имеющий площадь около 100 – 300 м².
- 4) *Кусок айсберга (growler)* – кусок льда материкового происхождения меньшего размера, чем обломок айсберга или крупный несяк, часто прозрачный, но по цвету кажущийся зеленым или почти черным, выступающий менее 1м над поверхностью моря и занимающий площадь приблизительно 20 м².

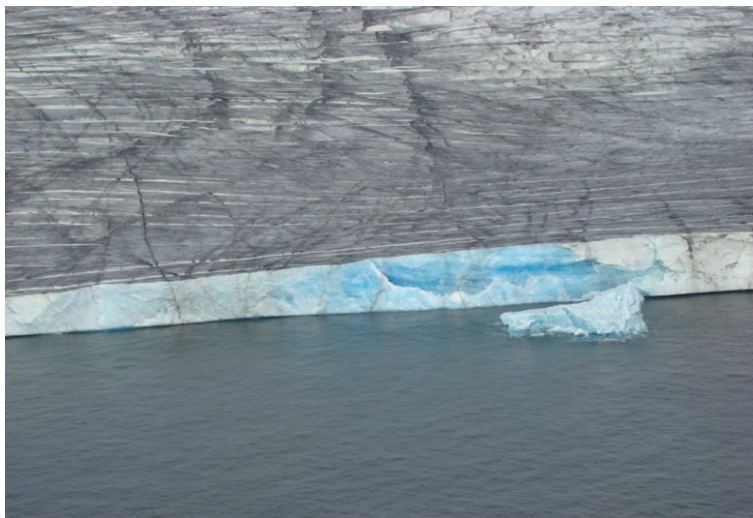


Айсберги арктических морей

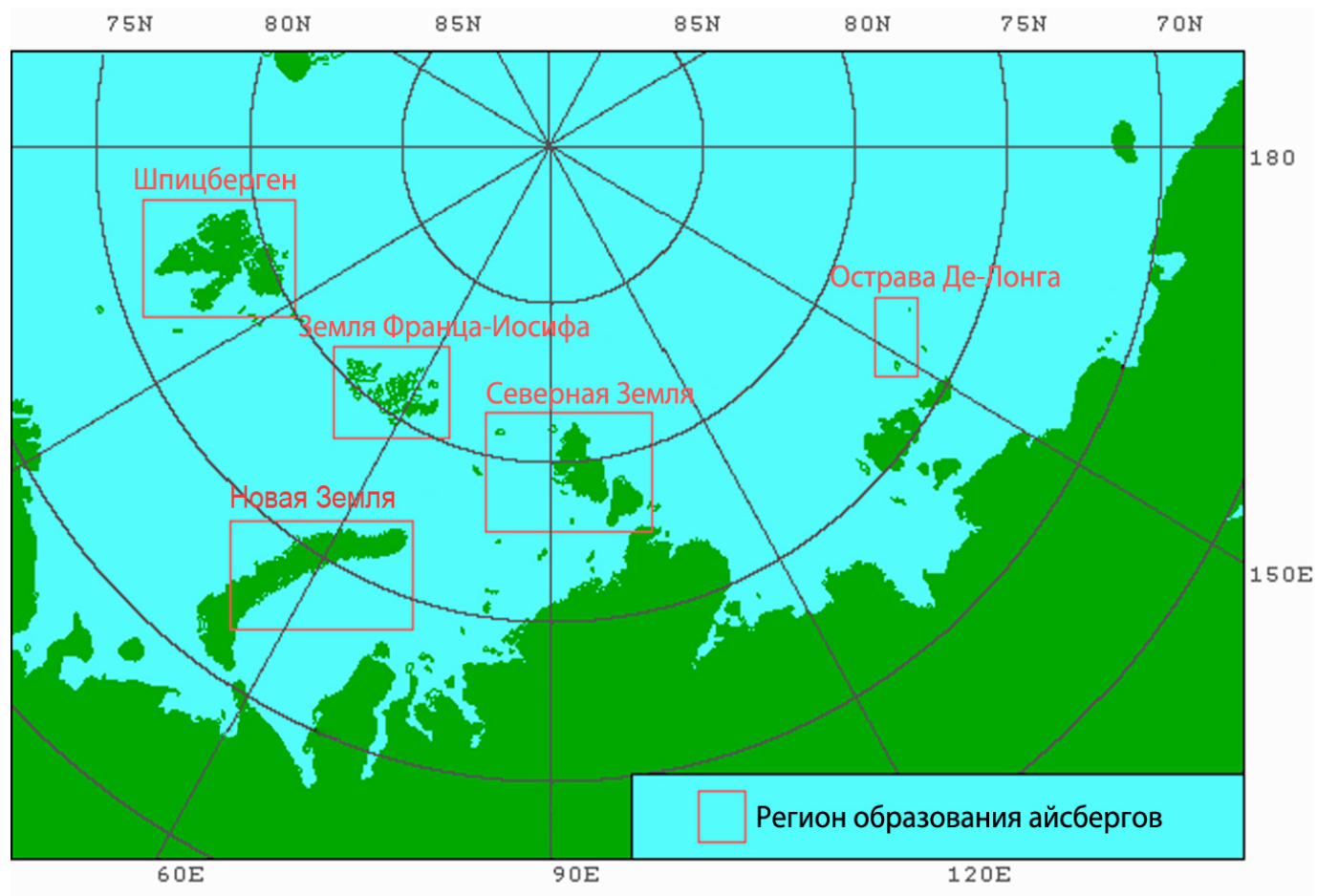
Основными источниками айсбергов в российской Арктике являются продуцирующие ледники на островах Шпицбергена, Новой Земли, Северной Земли, Земле Франца-Иосифа.

Ориентируясь на данные А.Ф. Глазовского, опубликованные в журнале «Проблемы Арктики и Антарктики» за 2008 г., поток льда на архипелаге Шпицберген на продуцирующих фронтах оценивается 3 ± 1 км³/год, а годовое отступление ледников составляет порядка 1 км³; полная потеря льда за счет айсбергообразования равна 4 ± 1 км³/год. Айсберговый сток Земли Франца-Иосифа составляет порядка 4,4 км³/год (4,0 км³/год – поток льда на продуцирующих ледниковых фронтах, 0,4 км³/год – годовое отступление ледников). На образование новоземельских айсбергов общие потери льда составляют около 1,5 км³/год (1,0 км³/год – поток льда на продуцирующих фронтах; 0,5 км³/год – годовое отступление ледников). Оценки айсбергового стока с Северной Земли дают величину в пределах 0,4 – 0,8 км³/год ($>0,7$ км³/год [Dowdeswell, 1992]).

Последние исследования («Лед и Снег» № 4, 2020) показывают, что айсберговый сток с ледников Северной Земли составляет 1,5-1,9 км³/год



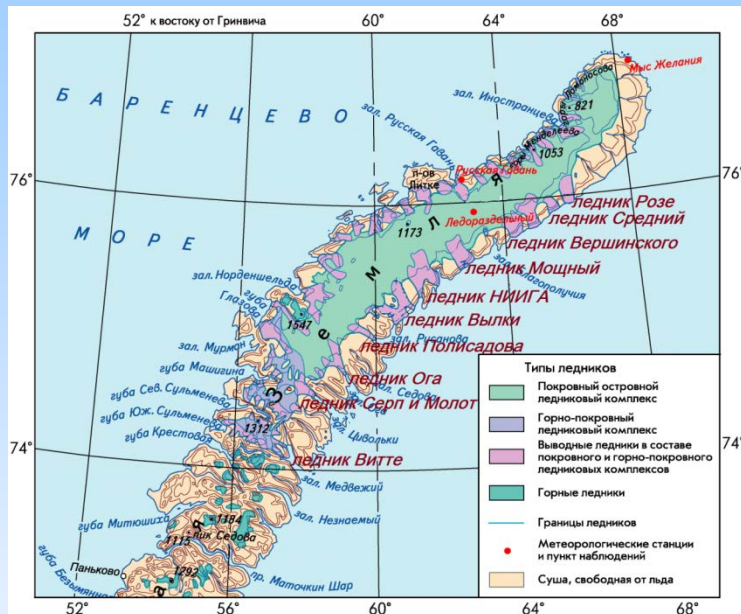
Отрыв глыбы льда от фронта выводного ледника Новой Земли с образованием обломка айсберга



Области повышенной айсберговой угрозы в
Арктике

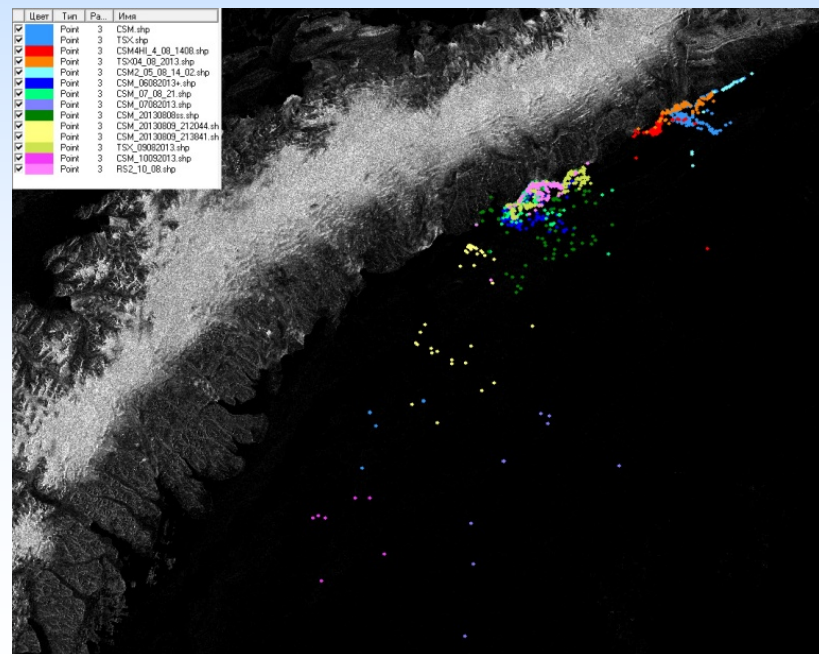


AARI



Выводные ледники восточного побережья Новой Земли

Айсберги, обнаруженные у побережья
Новой Земли с использованием РСА
различных спутников





AARI

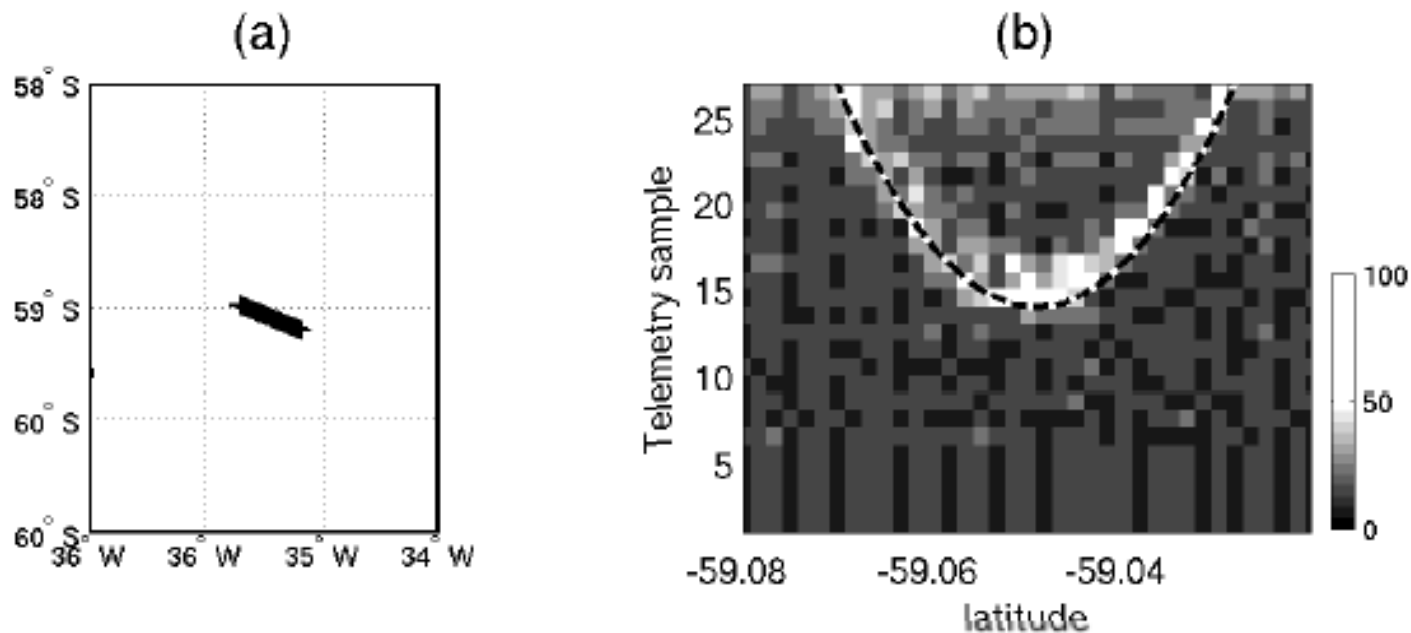
Потенциальные возможности и ограничения спутниковых систем для обнаружения опасных ледяных образований

Системы	Разрешение, м	Повторяемость
Микроволновые СВЧ-радиометры	4000 x6000 м	2 р./сут
Альтиметры и скаттерометры (активное ДЗ)	400 м (MFT) – 7 км (RA-2)	35 сут
Лазерные альтиметры (активное ДЗ) ICESAT	70 м Между отпечатками 172 ± 3 м	

Systems	Resolution	Revisit time
radars with synthetic aperture, SAR (active RS) RADARSAT -2; TerraSAR X and TanDEM-X CosmoSkyMed Sentinel И.т.д.	3 – 25 m (swath width 20 – 100 km) 1-18 m (scene 10x5 – 100x150 km) 1- 30 m (swath width 10 – 100 km) 5-100 m (swath width 80-400 km)	2-3 days 1-3 days 2.5 days (10 h – for 4 sat.) 2.5 days
optical spectral range (passive RS) high resolution (pan/multi) Ikonos, Eros, GeoEye, WorldView, QuickBird, etc	0,5/2m	2-3 days



Альтиметры



Сигнатура айсберга высотой 8,5 м, обнаруженного 25 ноября 2005 г. вблизи Антарктики с использованием данных альтиметра Jason (Tournadre et al., 2008).

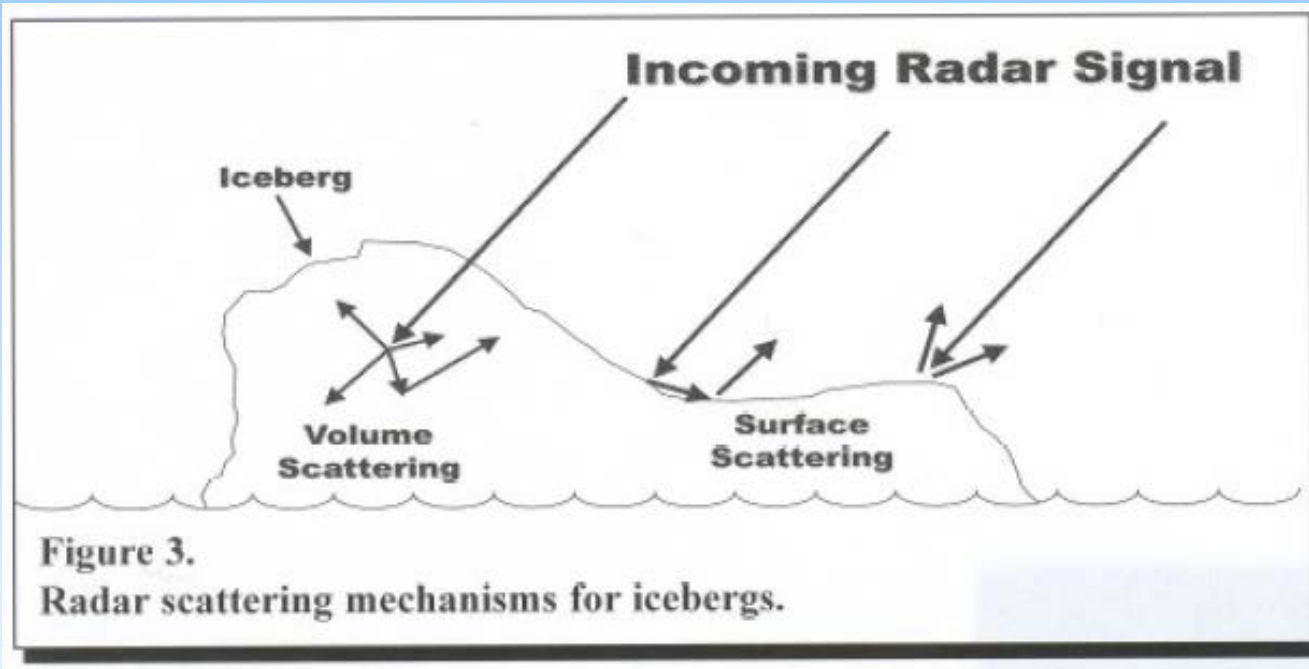
а)– географическое положение; б) – волновая форма для образцов телеметрии 1 – 30 (тепловой шум); штриховая линия представляет лучшее соответствие для айсберга, размещенного под спутником в надире.

Обнаружение айсбергов по этому методу ограничено случаями открытой воды и применимо для айсбергов с горизонтальными размерами в пределах 1 км.

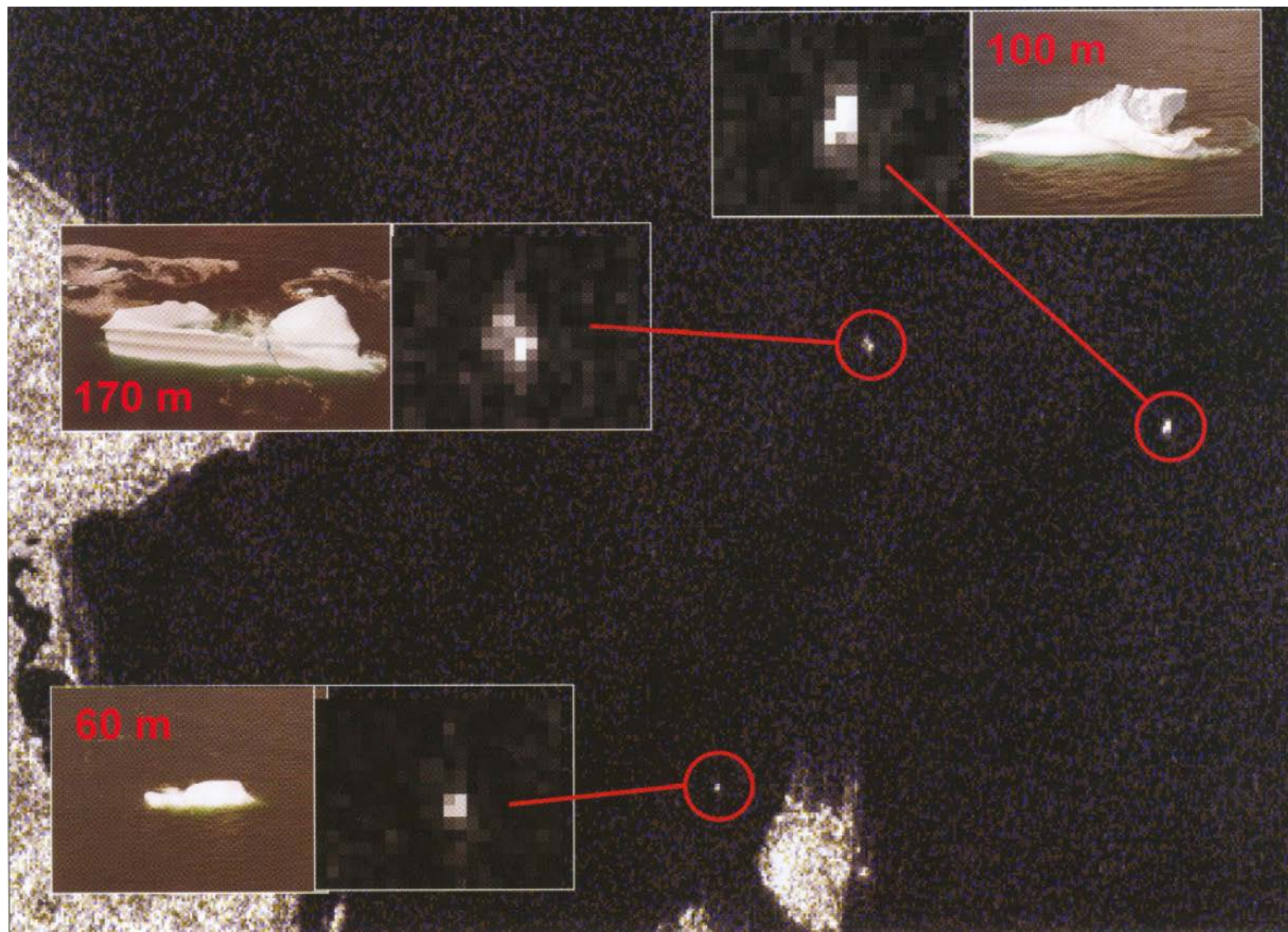


AARI

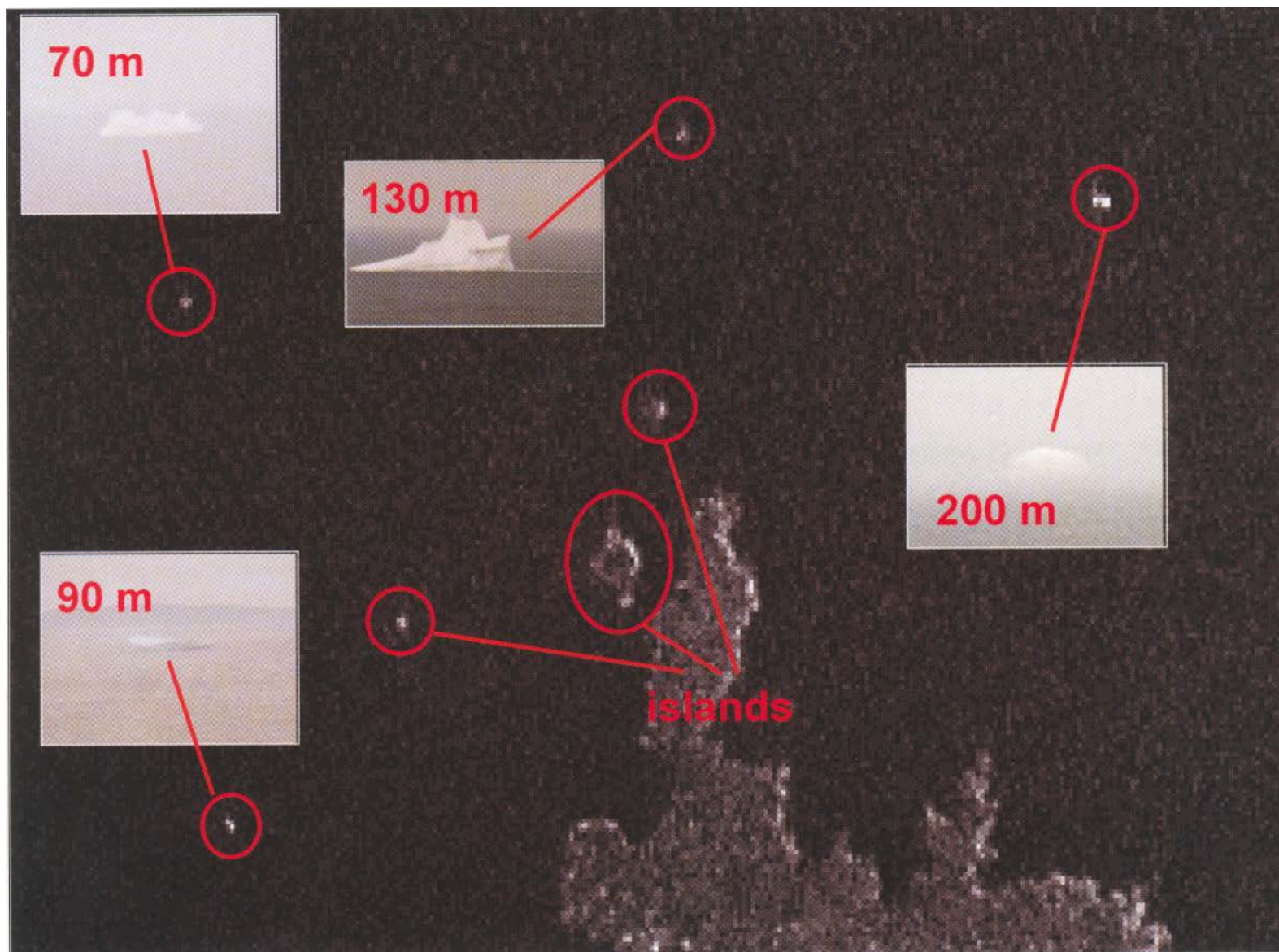
РАДАРЫ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ



Принцип обнаружения айсберга на открытой воде

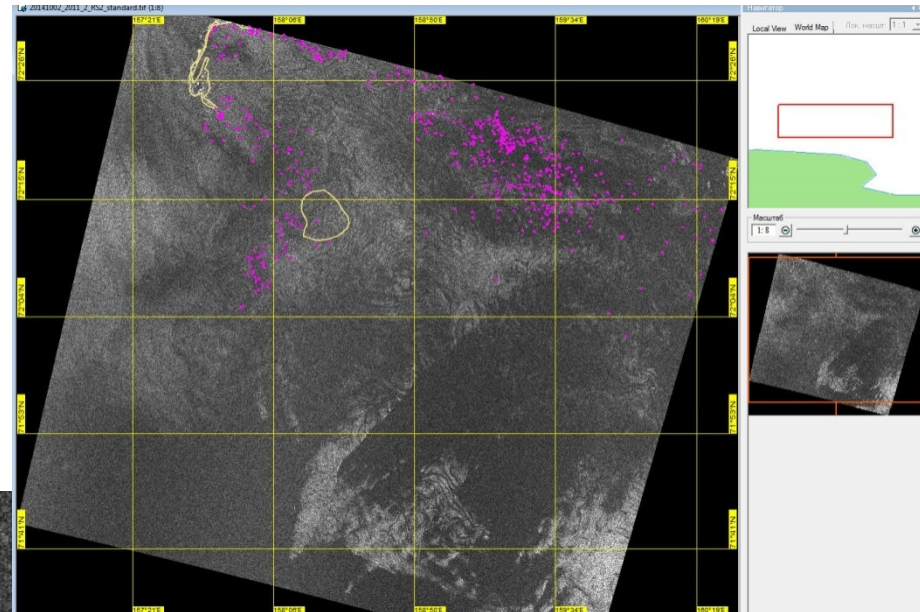


На открытой воде (SAR)



На открытой воде (SAR)

Айсберги в Восточно-Сибирском море



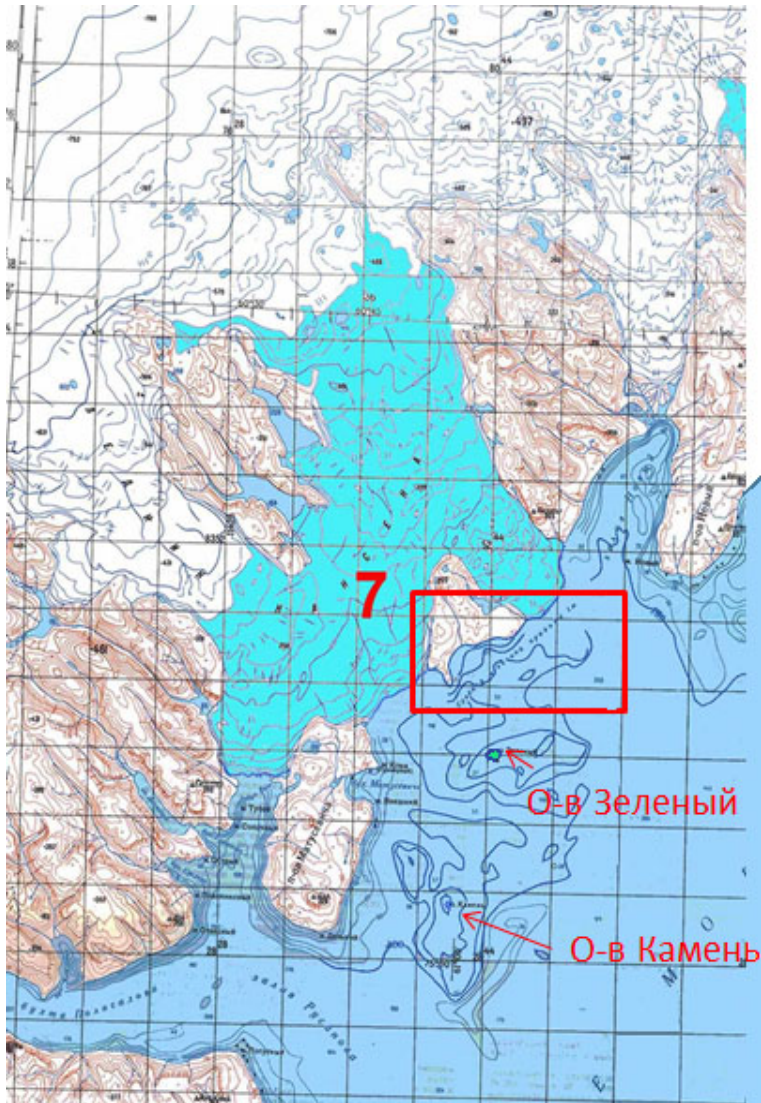
Iceberg of 500 m length

Icebergs

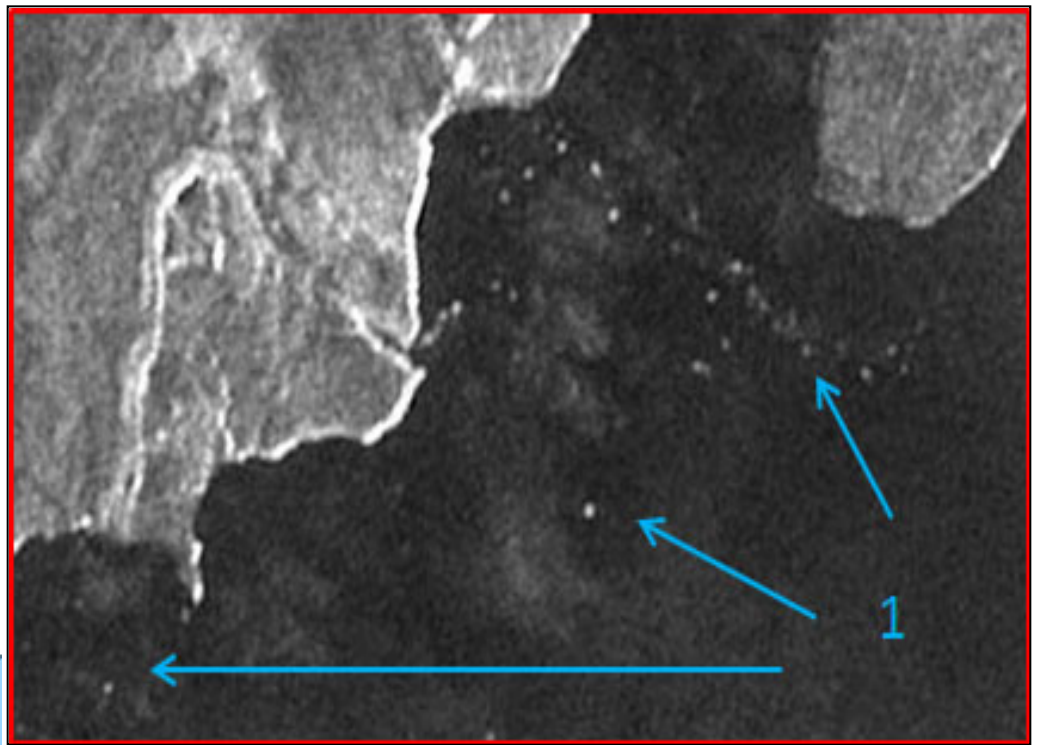
Fragment of the
RADARSAT-2 SAR
Image. 2.10.14



Айсберги на снимке SAR

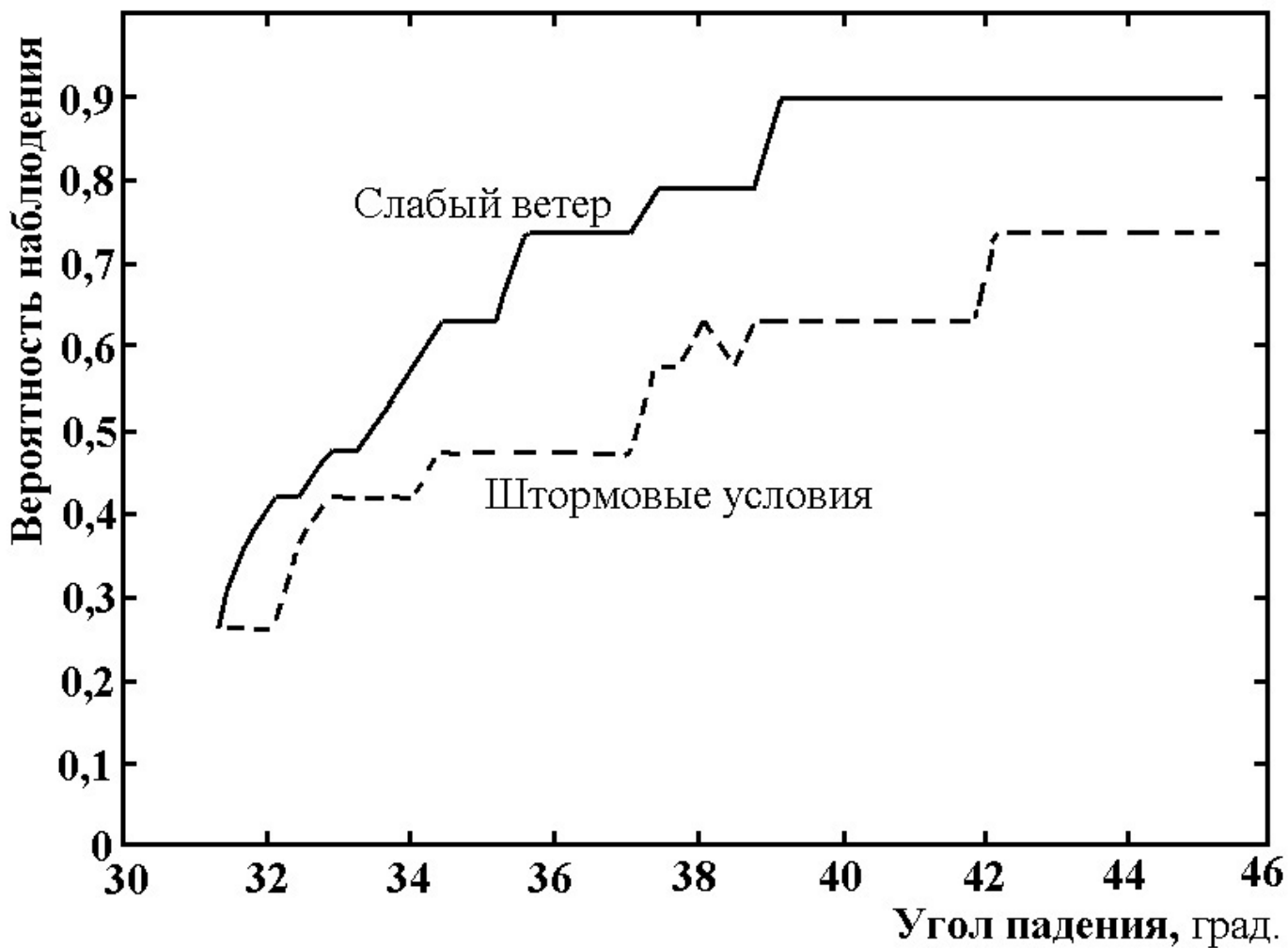


Location of the satellite image.
Kara Sea, near glacier Nansen.

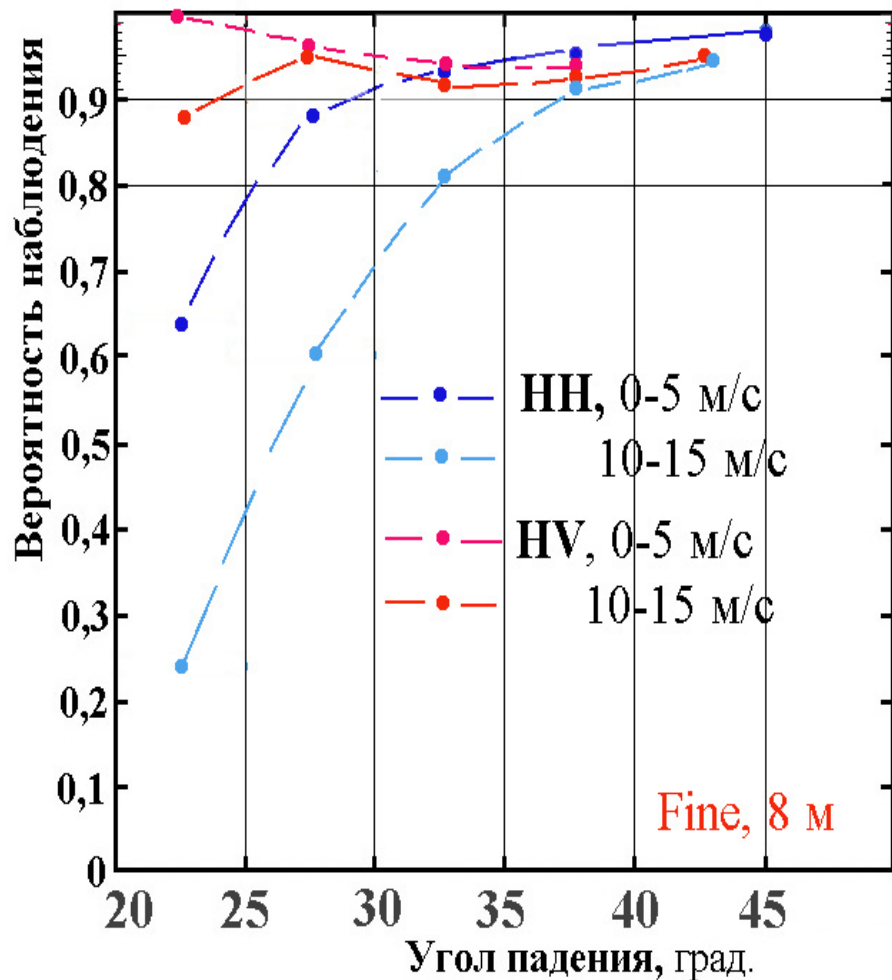


Fragment of the SAR
image from
Envisat/IMM 04.09.
2011 and
GeoEye-1, 30.07.10

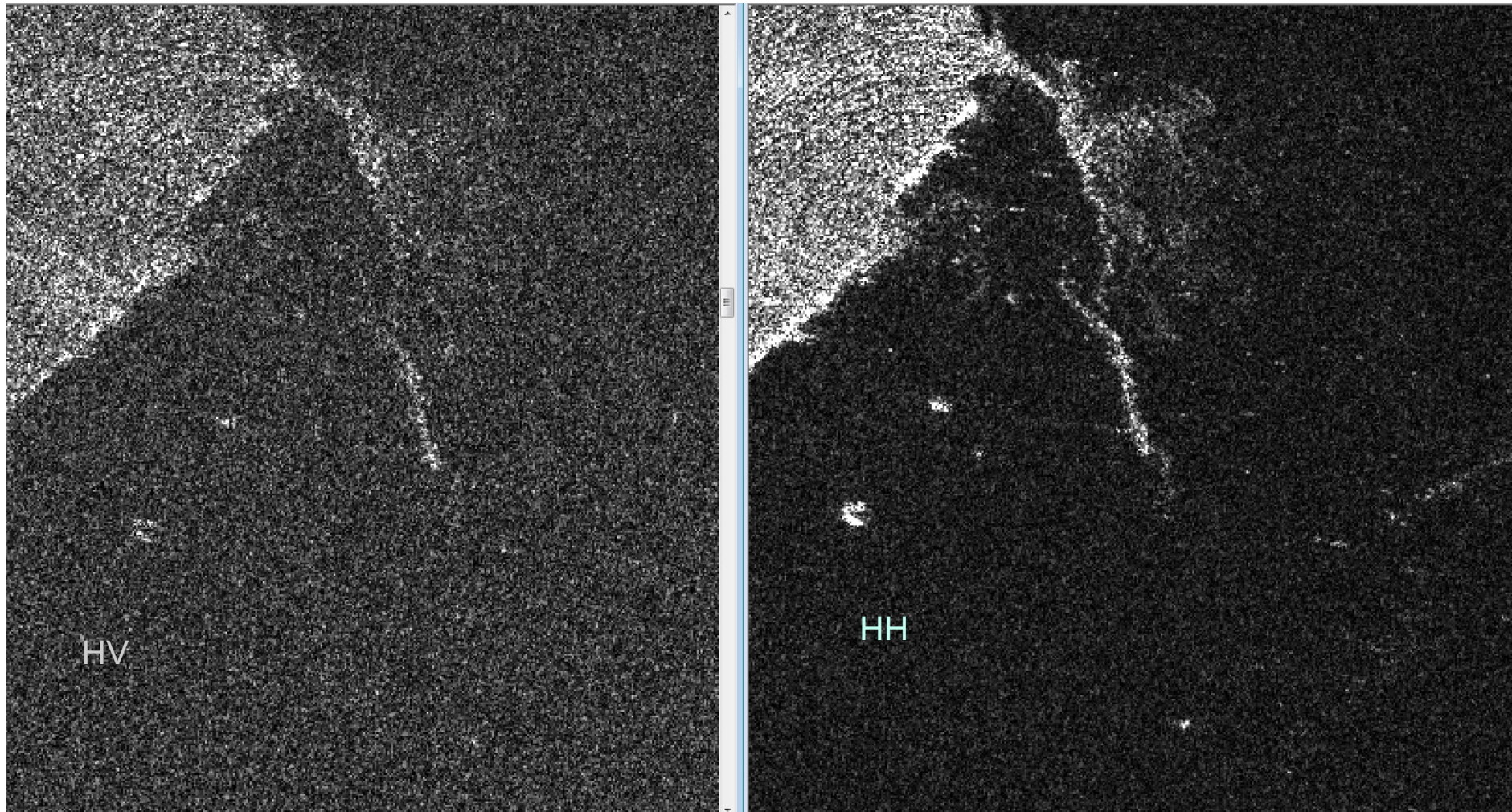
icebergs



**Вероятность обнаружения айсбергов на открытой воде в зависимости от угла и ветра
(высота айсберга 5-15 м, длина 15-60 м)**



Вероятность обнаружения средних айсбергов (50–120 м) по данным RADARSAT-2 при различной скорости ветра и разной поляризации (HH, HV). Разрешение 8 м.



Айсберги на открытой воде. Различная поляризация, RADARSAT-2.



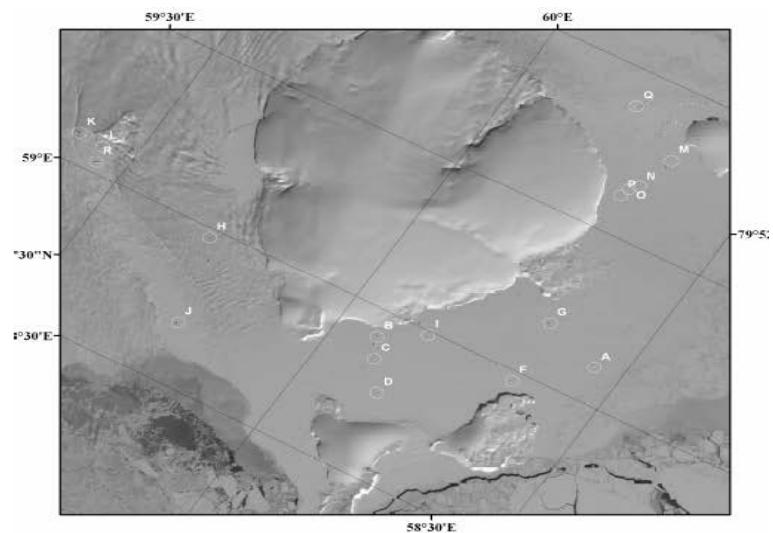
AARI

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (видимый и ИК-диапазоны)

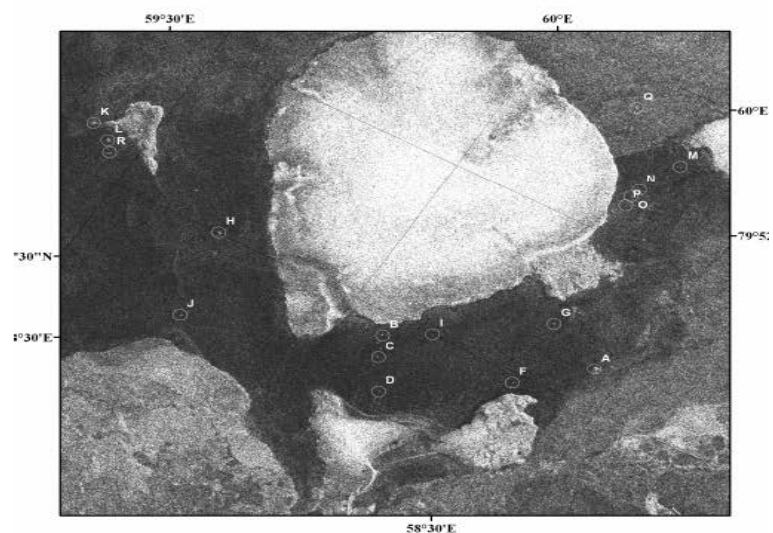


Изображения полей старого льда в проливе Кеннеди в видимых каналах оптического диапазона с пространственным разрешением 250 м

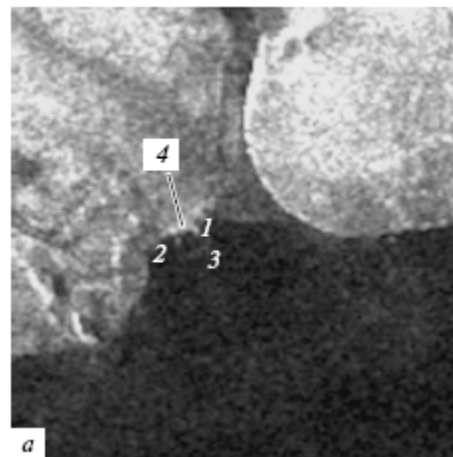
Основным ограничением для применения спутниковых данных в оптическом диапазоне является уровень естественной освещенности. Исключением является использование сканеров в инфракрасных (тепловых) каналах спектра. Для арктических регионов в весенний и летний период года, когда солнечная освещенность достаточна для получения спутниковых изображений почти круглые сутки, главным ограничением является облачность.



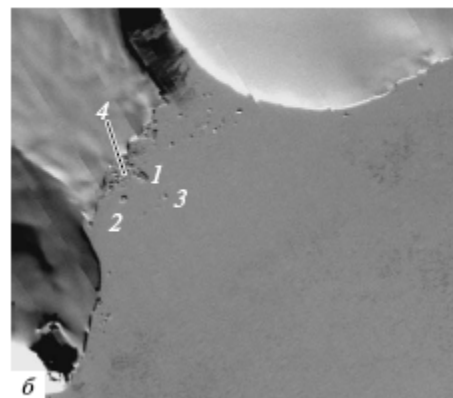
а



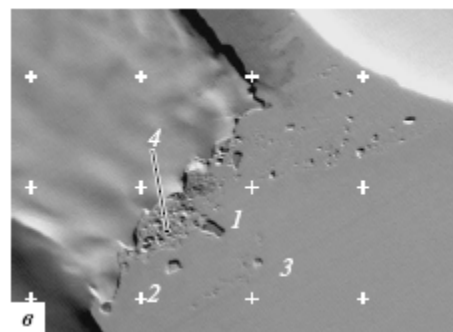
Айсберги (А – R) в районе Земли Франца-Иосифа, наблюдавшиеся на снимке с ИСЗ Landsat за 14 апреля 2006 г. (а) и Envisat/SAR за 12 апреля 2006 г. (б) (Sandven et al., 2007).



а



б



в



Изображения айсбергов в припае Земли Франца-Иосифа.

а – фрагмент изображения с Envisat ASAR за 5 апреля 2006 г., б – фрагмент изображения с Landsat за 14 апреля 2006 г., в – фрагмент изображения со спутника «Монитор-Э» за 7 апреля 2006 г. (Александров и др., 2008).

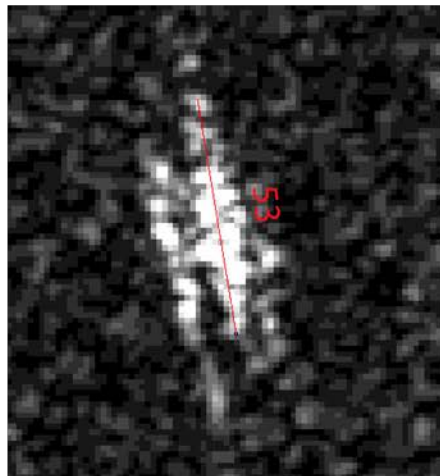
• **Оценка точности определения местоположения**



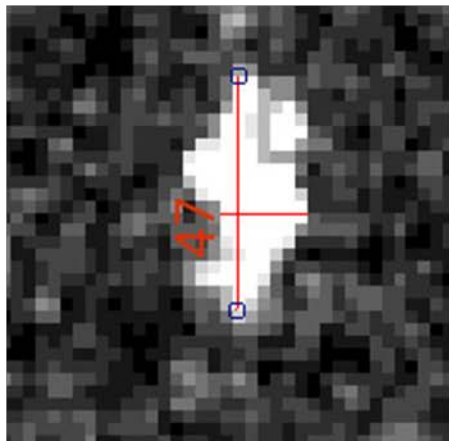
- **Геопривязка**
- **Геопривязка осуществляется по рассчитываемым орбитальным данным**
- **Орбитальные данные содержат ошибки и очень часто нет возможности использования береговой линии для уточнения привязки.**
- **Для определения точности привязки используются неподвижные объекты, или объекты с GPS .**
- **Точности, оцененные экспериментально:**
 - **+/- 100 m for TerraSAR X**
 - **more than +/- 100 m and less than +/- 200 m for RADARSAT2**
 - **up to +/- 300 m for CosmoSkyMed**
 - **In our opinion this accuracy is enough for iceberg monitoring and supporting offshore activity**

Оценка точности определения размеров

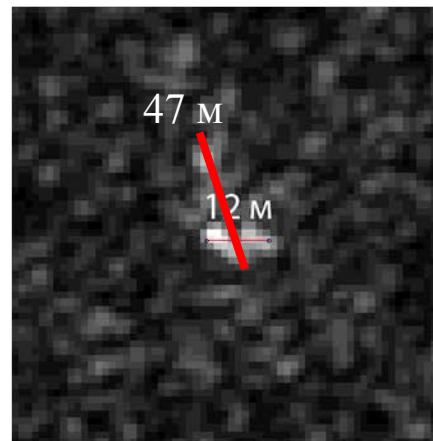
Айсберг, на котором был установлен буй 131490



TerraSAR-X 2.08.13
12:40 UTC. L=53 m



COSMO-SkyMed 2.08.13,
13:32 UTC. L=47 m



TerraSAR-X 3.08.13,
12:23 UTC. L=47 m

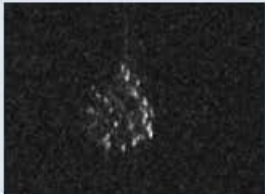
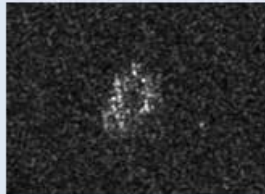
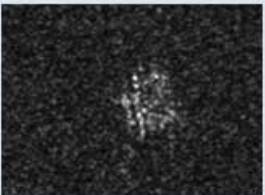
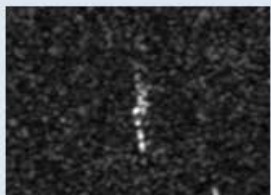
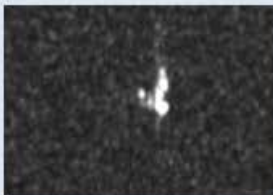
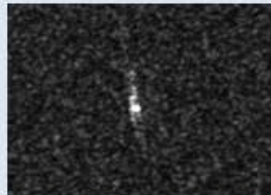


фотосъемка с вертолета 2.08.13. 9 UTC. L=55 m

Слежение за айсбергом с помощью
радарных наблюдений с ИСЗ и
аэрофотосъемки

Сравнение спутниковых и самолетных измерений размеров айсбергов

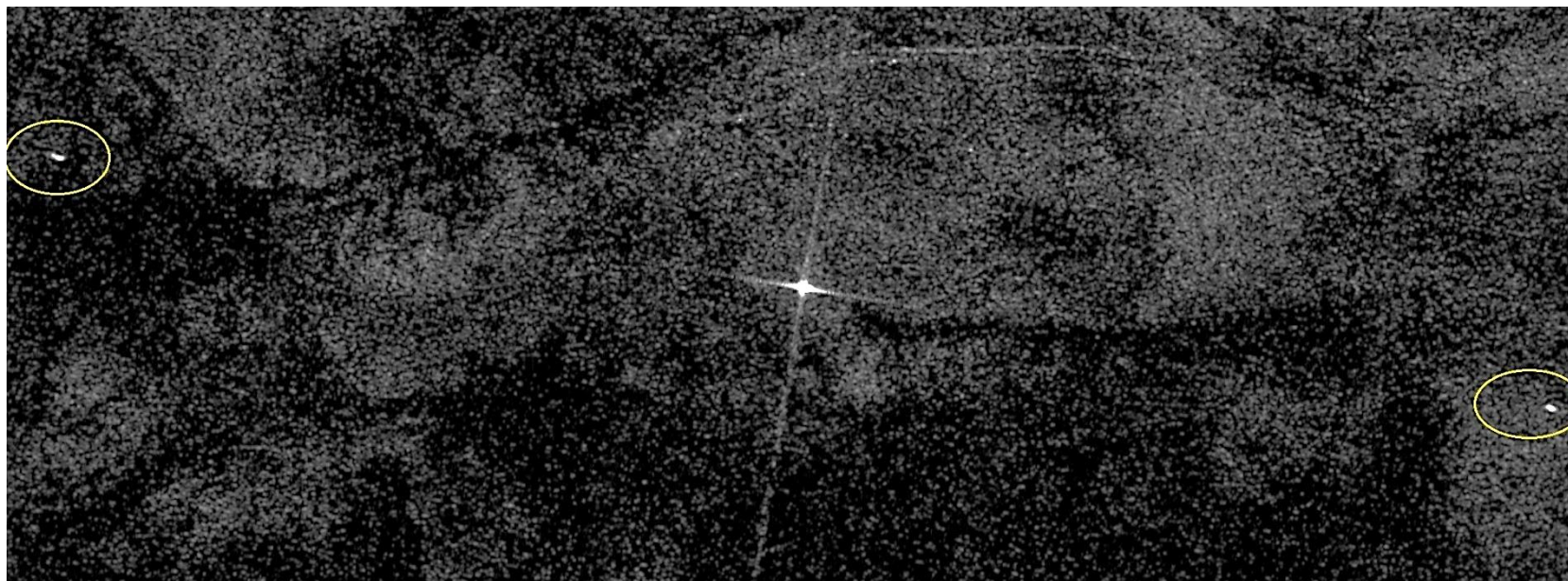
Comparison of iceberg dimensions defined with the use of aircraft and satellite SAR

Number	Sizes (m)		Frames	
	Aircraft SAR	TerraSAR-X	Aircraft SAR	TerraSAR-X
1	90×52	85×55		
2	71×55	67×58		
3	7×12	10×15		
4	12×8	14×8		





Примеры ошибочного детектирования



Two false SPASATEL KAVDEJKIN positions.
False targets away from the ship at 5250 m
distance. TerraSAR-X, August 27, 2014.

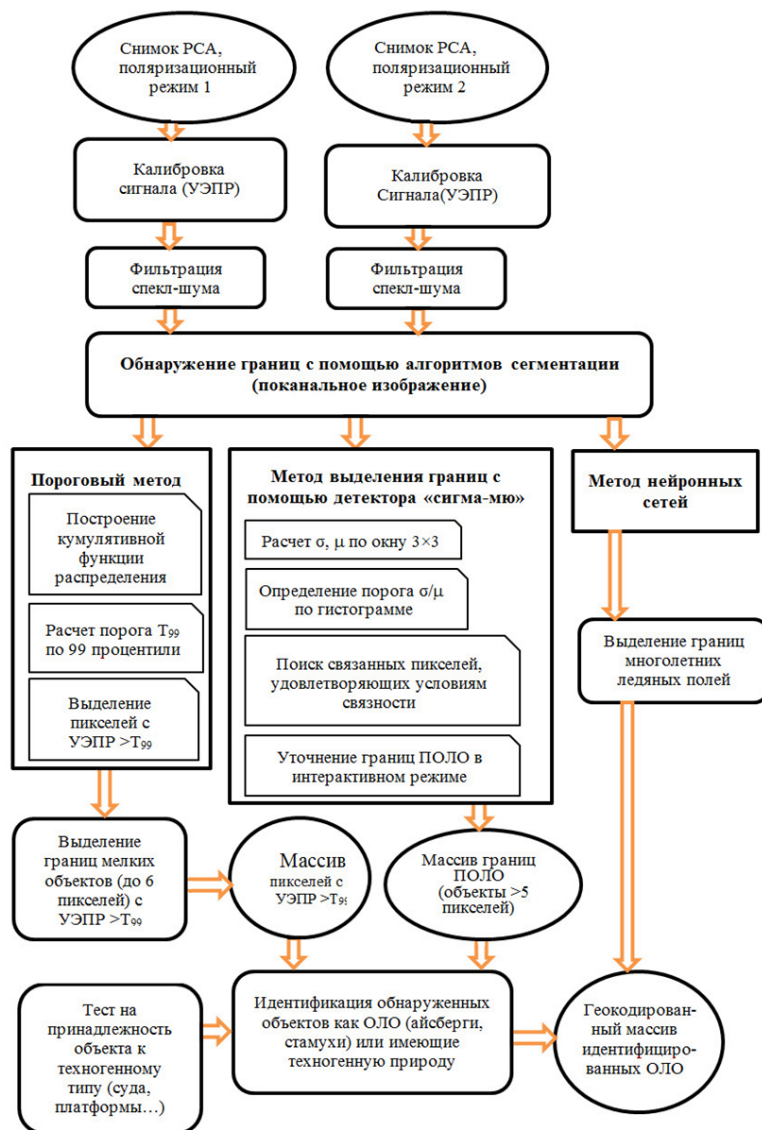




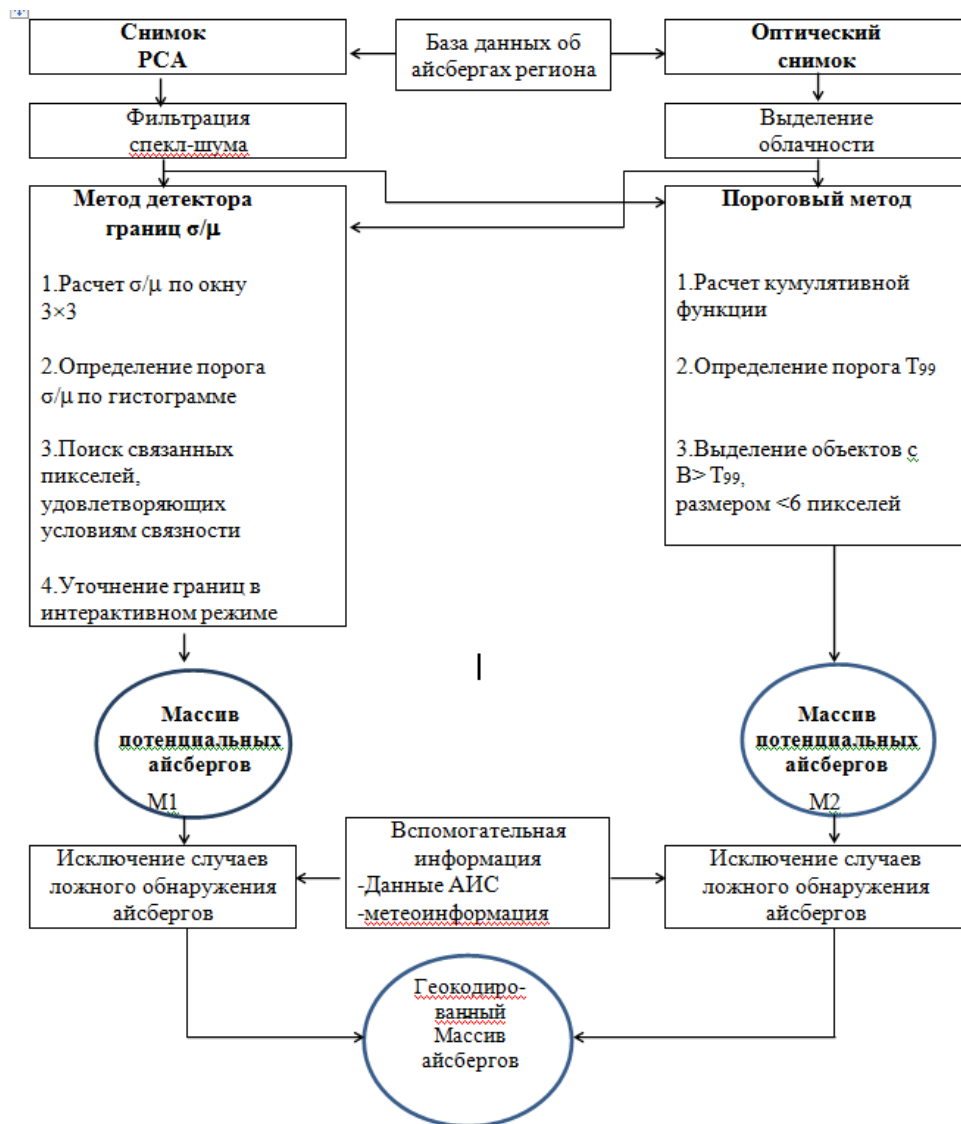
Алгоритмы мониторинга

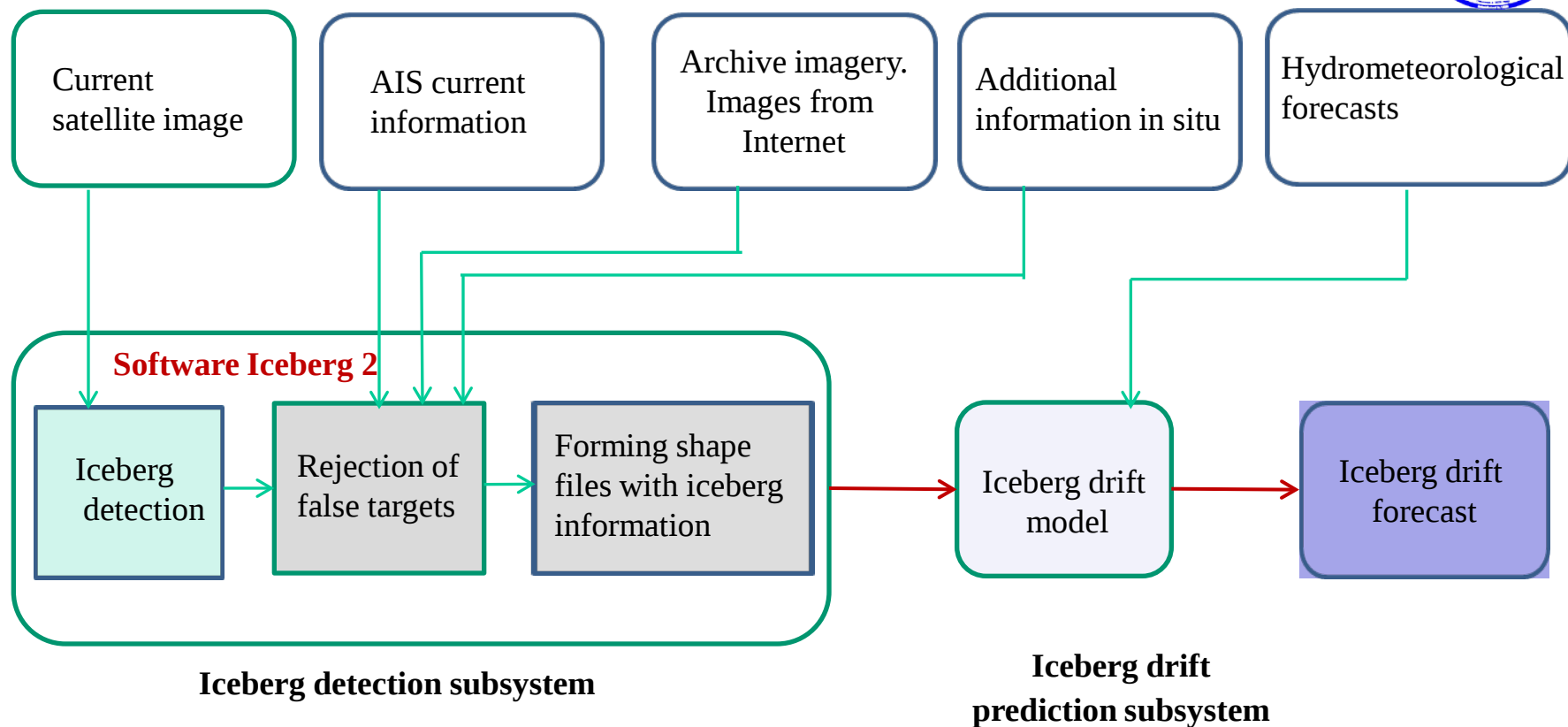


Алгоритмы обнаружения



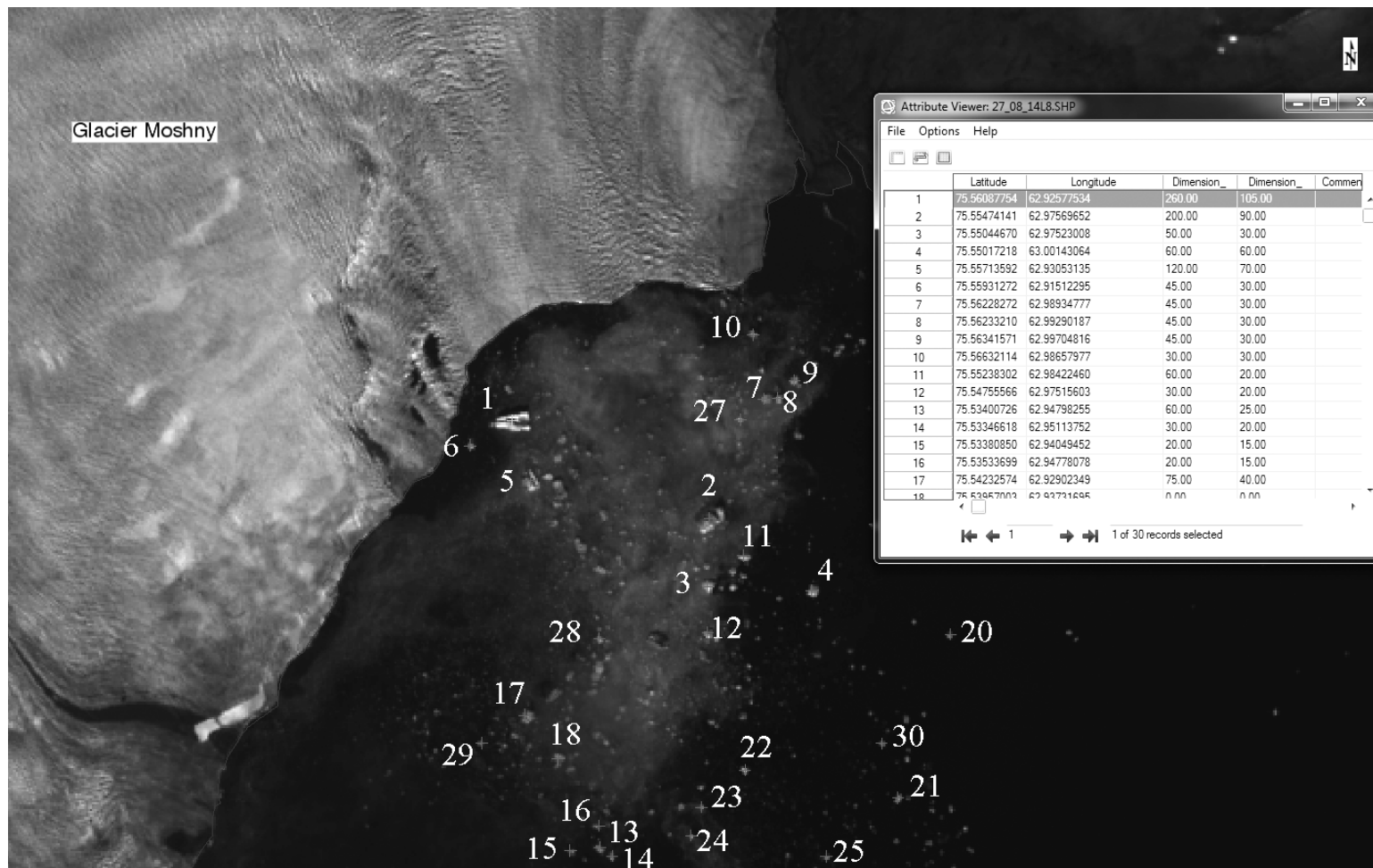
Алгоритмы обнаружения

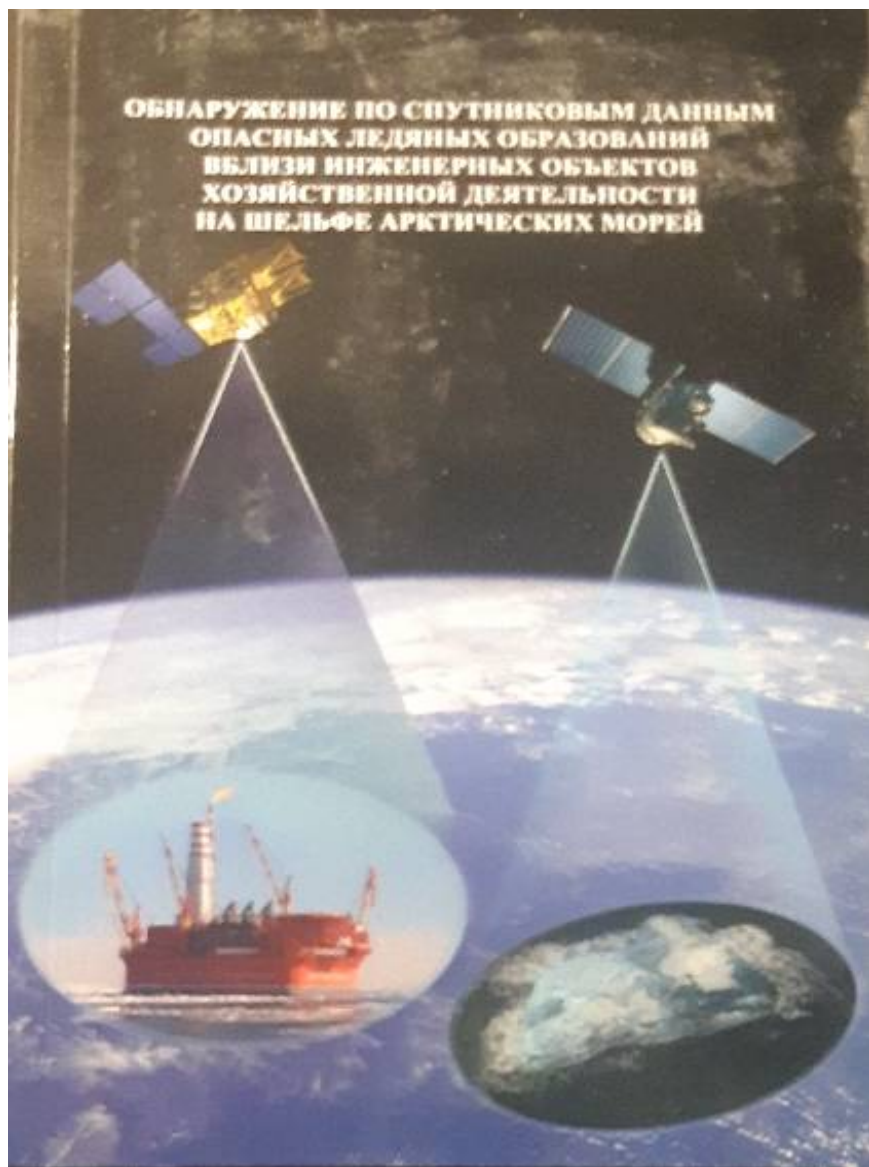




Функциональная структура аппаратно-
Программного комплекса «Айсберг»

Выходная продукция. Программа Айсберг 2 (АПК «Айсберг»)





***Более детальную
информацию по теме лекции
можно найти в:***

***Обнаружение по
спутниковым данным
опасных ледяных образований
вблизи инженерных объектов
хозяйственной деятельности
на шельфе арктических
морей: Методическое пособие
(под ред. к.ф.-м.н. В.Г.
Смирнова). СПб.: ААНИИ.
2017. 76 с.***



Спасибо за внимание

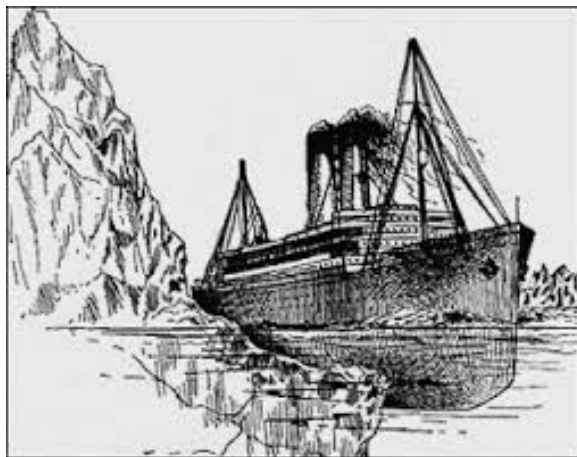
Icebergs and ships

The farther apart the better

The sinking of the **Titanic** is the world's most famous sea **tragedy**, with over 1,500 lives lost on that cold April night in 1912.



Damage to
vessels with
material damage
and
human losses.
Hard-renewable
environmental
damage



Danish ship "Hans Hedtoft",
January 7, 1959
human losses -95 people



Cruise liner
"Explorer", 24 November
2007 North Atlantic



In 1994, iceberg (Columbia Glacier, Alaska) severely damaged the nose of empty tanker "Overseas Ohio". The damage amounted to more than \$ 1 million

There were not collisions with icebergs on the NSR (Севморпуть) yet. Could it be? One wants to say "never". Never say never.