

# Морской лед: свойства льда, основные виды морского льда, ледяной покров полярных областей

Смирнов В.Г.  
(АНИИ/РГГМУ)

Школа молодых ученых  
Санкт-Петербург  
21.12.2017

## ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОРСКОГО ЛЬДА

Земля содержит около 16 млрд. км<sup>3</sup> воды, что составляет 0,25% массы всей планеты. Из этого количества на долю гидросферы Земли (океаны, моря, озера, реки, ледники и подземные воды) приходится 1,386 млрд км<sup>3</sup>, в том числе 97,75% – это соленые воды океанов и морей; остальные 2,25% – пресные воды [Беховых и др., 2008]. Общая масса снега и льда достигает примерно  $(2,5-3,0) \cdot 10^{16}$  т, что составляет лишь 0,0004% массы всей нашей планеты.

## Соленость морской воды

Морская вода состоит из молекул воды, анионов и катионов солей и ряда примесей. С помощью ионных концентраций состав морской воды выглядит так:  $\text{Cl}^- = 18,98\text{‰}$ ,  $\text{Na}^+ = 10,56\text{‰}$ ,  $\text{SO}_4^{-2} = 2,65\text{‰}$  и т.д. Учитывая, что солевой состав морской воды практически не меняется, морскую воду часто считают бинарной системой, состоящей из пресной воды и соли.

### Температура замерзания и температура наибольшей плотности морской воды, °С [Океаногр. таблицы, 1975]

	Соленость, ‰.								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Температура Замерзания	0	-0,27	-0,53	-0,80	-1,07	-1,35	-1,63	-1,91	-2,2
Температура наибольшей плотности	3,98	2,93	1,86	0,77	-0,31	-1,40	-2,47	-3,52	-4,54

## Процесс замерзания соленой воды

При очень медленном замерзании водного раствора каких-либо солей ионы солей остаются в расплаве и образующийся лед представляет собой чистую замерзшую воду (пресный лед). При формировании ледяного покрова на поверхности моря также происходит выпадение солей, и таким образом лед самоочищается. Однако обычно процесс замерзания идет слишком быстро, чтобы выделение солей было достаточно полным, и кристаллы растущего льда все же захватывают некоторое количество рассола. Количество захваченного льдом рассола зависит от скорости замерзания. При разрушении ледяного покрова зимой в Арктике поверхность воды соприкасается с воздухом, температура которого может достигать  $-30^{\circ}$  и даже  $-40^{\circ}$  С; в этих условиях соленость первого слоя вновь образующегося льда может достигать 20‰, в то время как средняя соленость однолетнего льда 4‰, то есть почти 80% солей вытекает из ледяного покрова в виде рассола

# Соленость морского льда

Под соленостью морского льда понимается соленость морской воды, полученной при его растапливании.

Рассол на поверхности молодого ровного льда представляет собой одно из очень характерных явлений. Так как рассол остается в жидком виде даже при очень низкой температуре воздуха, то поверхность молодого льда всегда визуальна представляется влажной. Если температура воздуха еще более понижается, то весь поверхностный рассол вымерзает, превращаясь в криогидрат – смесь кристаллов льда и солей. При этом на поверхности льда образуются небольшие белоснежные кустики, называемые *ледяными цветами*, похожими на сильный иней на траве.

*Ледяные цветы* на молодом льду замерзшего разводья, образовавшегося среди старых льдов (дрейфующая станция СП-13Ф, март 1966 г.).



## Физические свойства льда

Плотность льда, образовавшегося при замерзании морской воды, зависит от его температуры и количества воздушных пузырьков, а также от содержания солей в прослойках между кристаллами льда и от количества рассола в этих прослойках. В свою очередь, содержание солей и рассола зависит от быстроты замерзания и от возраста льда. Старый морской лед имеет иное распределение солёности по глубине, чем молодой. Значения плотности морского льда составляют 0,85 до 0,94 г/см<sup>3</sup>.

Чистый лед обладает сравнительно высокой прозрачностью в видимом диапазоне спектра. По данным Дорсея [Dorsey, 1940, С.490] значение коэффициента поглощения льдом ( $k$ ) составляет  $6 \cdot 10^{-3} \cdot \text{см}^{-1}$  для голубого света и  $14 \cdot 10^{-3} \cdot \text{см}^{-1}$  – для красного. В первом приближении, полагая для видимого диапазона в среднем  $k = 10 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ , можно получить, что метровый слой льда поглощает 63 % света, падающего на его поверхность [Паундер, 1967]. Лед, содержащий пузырьки воздуха, капельки рассола или частицы выпавших в осадок солей, другие инородные включения, пропускает свет значительно хуже, благодаря процессам рассеивания световых лучей в толще льда. Другим важным свойством льда является двойное лучепреломление. С точки зрения оптики лед представляет собой одноосевой кристалл, оптическую ось которого кристаллографы называют *c-осью*. Если луч света направлен параллельно *c-оси*, то его прохождение через лед происходит обычным путем. Однако в случае, когда свет падает под некоторым углом к *c-оси*, он разлагается на так называемые обыкновенный и необыкновенный лучи, которые проходят толщу льда с разными скоростями и поэтому преломляются под разными углами [Паундер, 1967].

Средняя удельная теплопроводность морского льда примерно в пять раз выше, чем у воды, и в восемь раз выше, чем у снега, и составляет около 2,1 Вт/м·градус, но к нижней и верхней поверхностям льда может уменьшаться из-за увеличения солёности и роста количества пор.

# **ОСНОВНЫЕ ВИДЫ МОРСКОГО ЛЬДА. МЕЖДУНАРОДНАЯ НОМЕНКЛАТУРА ВМО ПО МОРСКОМУ ЛЬДУ**

- В первом приближении морской лед по его строению можно разделить на игольчатый, губчатый и зернистый, а по глубине образования на: поверхностный, глубинный и донный.
- **Игольчатый лед** состоит из правильных шестигранных пирамид с осями перпендикулярными поверхности моря (ориентированные кристаллы). По внешнему виду такой лед напоминает стекло.
- **Губчатый лед** состоит из перепутанных в разных направлениях игл, пластин и зерен (неориентированные кристаллы).
- **Зернистый лед** состоит из округлых зерен – отдельных кристаллов округлой формы – с непараллельными осями. Образуется из снега и льда при трении и давлении льдин друг о друга. Когда зерна очень сближены между собой, этот лед также напоминает стекло.
- Поверхностный лед образуется у самой поверхности моря из морской воды или снега. Если такой лед образуется из морской воды и при очень спокойном состоянии моря, то его структура приближается к игольчатой, а при беспокойном море – к губчатой.
- Глубинный лед образуется на некоторой глубине под поверхностью моря; его структура обычно губчатая.
- Донный лед образуется на придонных предметах, является разновидностью глубинного льда и также имеет губчатую структуру.

- Планомерная международная стандартизация ледовой терминологии на основе существовавших национальных терминов была начата ВМО вскоре после образования этой организации. К работе были привлечены эксперты рабочей группы (РГ) по морскому льду Комиссии по морской метеорологии (КММ) ВМО. Подготовленная РГ КММ и принятая ВМО в 1968 г. номенклатура была опубликована в 1970 г. [Номенклатура ВМО, 1970]. Эта номенклатура основывалась, в основном, на предложениях Советского Союза и состояла из двух томов – терминологии и иллюстрированного словаря.
- Номенклатура ВМО по морскому льду 1968 года послужила основой разработанного и изданного в 1974 г. отечественного пособия «Номенклатура морских льдов, условные обозначения для ледовых карт»
- На ее основе ААНИИ была подготовлена и издана в 1984 г. «Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов».

**Символика для ледовых карт**

Для отображения характеристик на ледовых картах используется одна из двух символик, различающихся по условным обозначениям, по раскраске / штриховке (в черно-белом варианте):

**Российская национальная символика**

**Международная символика**

Общая сплоченность

Частная сплоченность

Возраст и формы льда

Общая сплоченность

Частная сплоченность

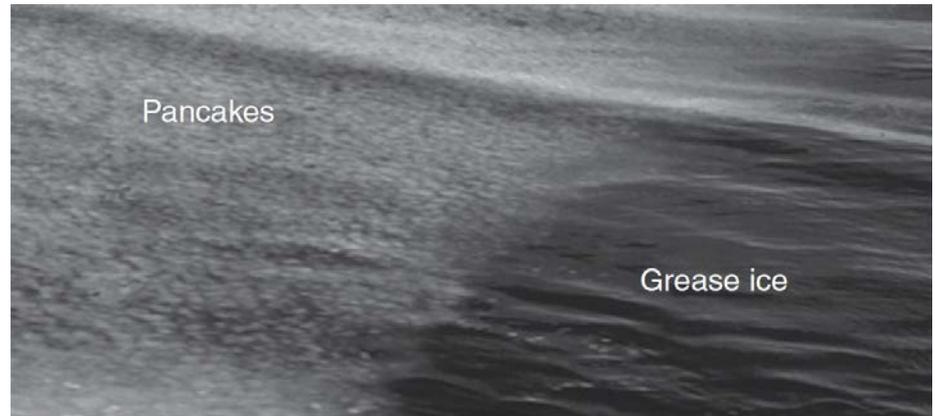
Возраст льда

Формы льда

## Начальные виды льда

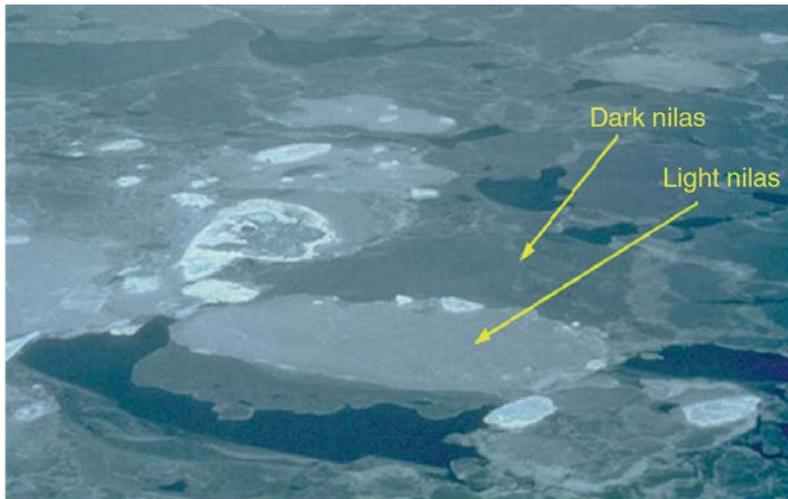
- **Ледяные иглы (2.1.1\*)**. После того как верхний слой воды в море охладится до температуры замерзания, начинают образовываться ледяные иглы – мелкие продолговатые кристаллы, имеющие форму пластинок, взвешенных в воде. Образование этих кристаллов происходит не только на самой поверхности воды, но и на некоторой глубине. Далее, если проследить естественный природный процесс, при спокойной поверхности моря происходит интенсивное увеличение количества ледяных кристаллов и они образуют на поверхности воды скопления в виде бесформенных пятен или полос – ледяное сало.
- **Ледяное сало (2.1.2)**: Хорошо распознается при наблюдении с борта судна, с берега или низко летящего самолета. Появление ледяного сала на поверхности открытой воды не всегда является признаком начала льдообразования. При усилении скорости ветра и волнения моря верхний охлажденный слой воды перемешивается с нижележащим, более теплым – ледяное сало и ледяные иглы могут исчезнуть (растаять).
- **Снежура (2.1.3)**: Если на открытую воду в море, имеющую температуру ниже нуля градусов, выпадают значительные массы снега, который не тает, то образуется вязкая масса в виде снежной каши, называемой снежурой.
- **Шуга (2.1.4)**: При ветре и волнении из сала, снежуры и внутриводного льда может образоваться шуга – скопление рыхлых пористых, белесоватого цвета комков льда. После образования на поверхности моря сплошного слоя этих начальных видов льда, дальнейшее его нарастание происходит за счет теплопроводности верхних слоев моря. Скорость нарастания зависит в основном от температуры приземного слоя воздуха.
- Ледяные иглы, ледяное сало, снежура и шуга относятся к начальным видам льда. Эти виды льда состоят из слабо смерзшихся кристаллов (если они вообще смерзлись) и имеют определенную форму только, когда они на плаву.
- **Нилас (2.2.)**: Может подразделяться на темный нилас (Dark nilas, 2.2.1) – толщиной до 5 см, и светлый нилас (Light nilas, 2.2.2) – толщиной до 10 см. Эти две возрастные стадии ниласа при визуальном наблюдении с борта судна различают по тоновым признакам.
- **БЛИНЧАТЫЙ ЛЕД (Pancake ice)**: Пластины льда преимущественно круглой формы от 30 см до 3 м в диаметре и приблизительно до 10 см толщиной, с приподнятыми краями вследствие удара льдин одна о другую. Он может образовываться на легкой волне из *ледяного сала*, *шуги* или *снежуры*, а также в результате разлома *склянки*, *ниласа* и *серого льда* в условиях большой зыби. *Блинчатый лед* может также образовываться на некоторой глубине на поверхности раздела между водными массами с различными
- **Склянка (Ice rind, 2.2.3)**. Осенью в прибрежных зонах и устьях рек на спокойной поверхности воды образуются большие площади склянки (поморское название «резун») – тонкого хрупкого льда, образовавшегося в верхнем слое распресненной воды, легко ломающегося под действием ветра и волнения, обычно на прямоугольные куски. Толщина склянки до 5 см.

## Начальные виды льда



**Ледяные иглы** (Frazil ice): Тонкие иглы или пластинки льда, взвешенные в воде

**Ледяное сало** (Grease ice): Следующая после ледяных игл стадия замерзания, когда кристаллы льда сгустились и образуют густой слой на поверхности. Ледяное сало отражает мало света и придает поверхности воды матовый оттенок.



**Блинчатый лед** ( Pancake ice)

**Нилас** (Nilash ): Тонкая, эластичная корка льда, легко прогибающаяся на волне и зыби и при сжатии образующая зубчатые наслоения. Имеет матовую поверхность и толщину до 10 см. Может подразделяться на темный нилас и светлый нилас.

**Молодой лед (2.4):** Может подразделяться на серый лед толщиной 10 – 15 см и серо-белый лед толщиной 15 – 30 см.

Поля и обломки серого льда с наслоениями



### **Однолетний лед (2.5):**

Тонкий однолетний лед: 30-70 см



Однолетний лед средней толщины: 70-120 см



Толстый однолетний лед: более 120 см



### **Старый лед (2.6).**

Ледяные поля старого льда имеют характерные внешние признаки, которые связаны с изображением рельефа их поверхности. Четко выделяются гряды и холмы сглаженных летним таянием торосов и ропаков, которые образовались еще прошедшей зимой.



- **Остаточным льдом** называют однолетний лед, который не растаял за лето, после начала устойчивого ледообразования осенью. Этот лед имеет толщину до 160 – 180 см и после 1 января в северном полушарии (после 1 июля в южном полушарии) называется двухлетним.
- **Двухлетний лед** (2.6.1). Хотя пятна голого льда обычно зеленовато-голубого цвета, в Арктике встречаются льды грязно-серого оттенка (рис. 1.2.5– цв. вкл. ).
- **Многолетний лед** (2.6.2): старый лед толщиной около 3 м и более (рис. 1.2.6 – цв. вкл.).
- Отдельный раздел в номенклатуре льдов касается подводного плавания в полярном бассейне. Спутниковые методы зондирования позволяют выявить такую важную для подводного плавания характеристику, как наличие просвета во льдах. ИСЗ оперативно выдает информацию о пространственных размерах «окон во льду» и их точном географическом положении.

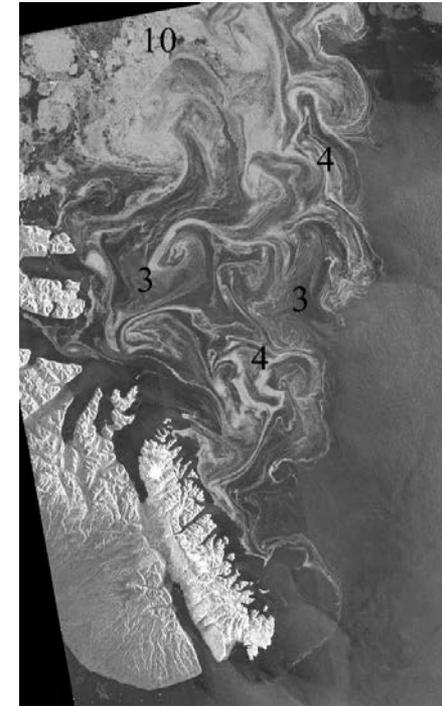
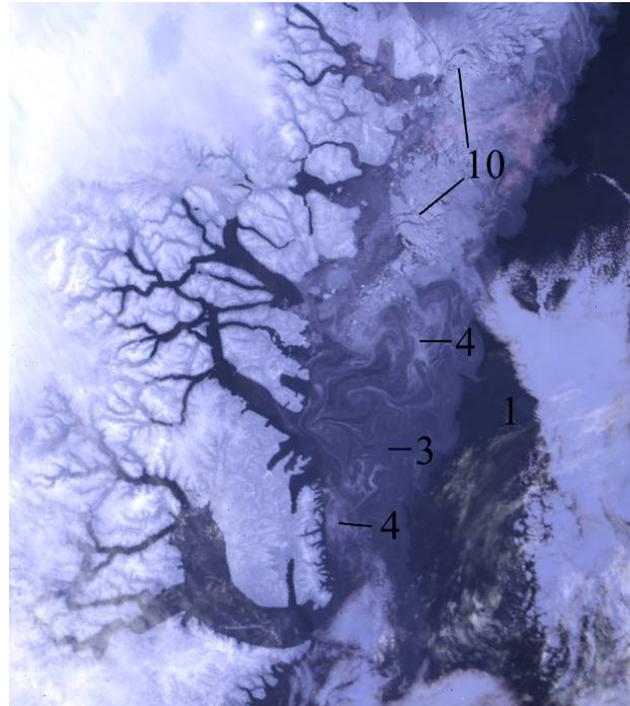
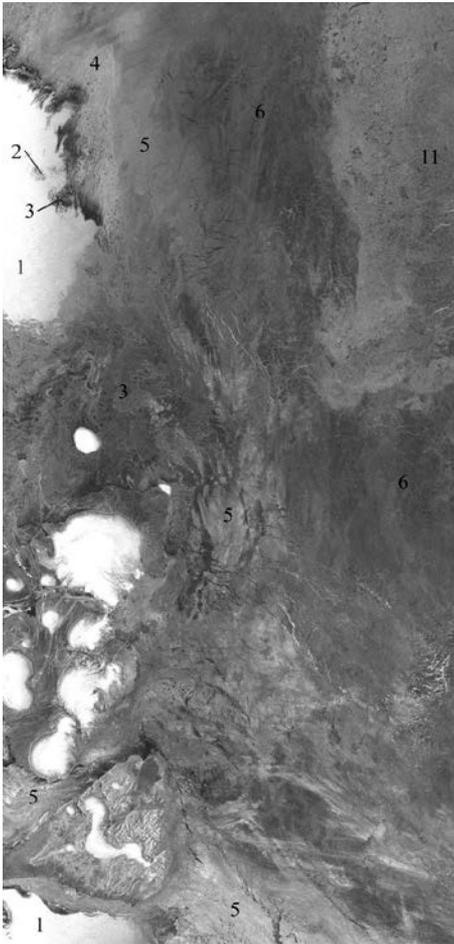


Окно во льду (Skylight).

# Примеры дешифрирования спутниковых изображений

РЛ-снимок ИСЗ Envisat за 25 октября 2009. Район Северной Земли.

1 – чистая вода, 2 – начальные виды льда, 3 – темный и светлый нилас, 4 – блинчатый лед, 5 – серый лед, 6 – серо-белый лед, 10 – остаточный лед.



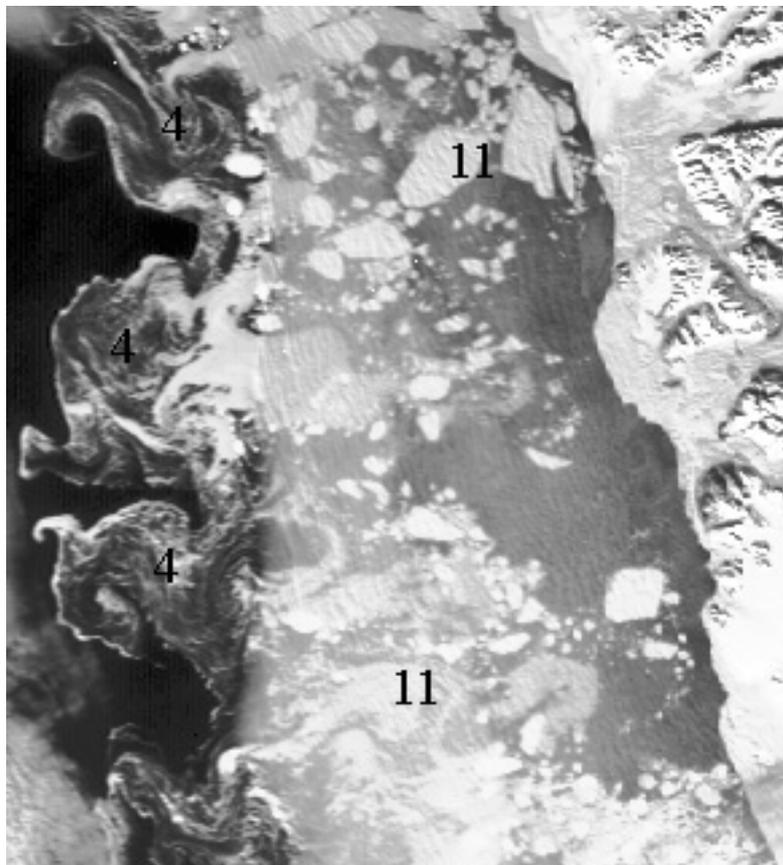
а) Гренландское море.

б)

а) ИК- изображение с ИСЗ NOAA-17, б) РЛ-изображение с ИСЗ Envisat.

1 – чистая вода, 3 – нилас, 4 – блинчатый лед, 10 – остаточный лед.

## Примеры дешифрирования спутниковых изображений



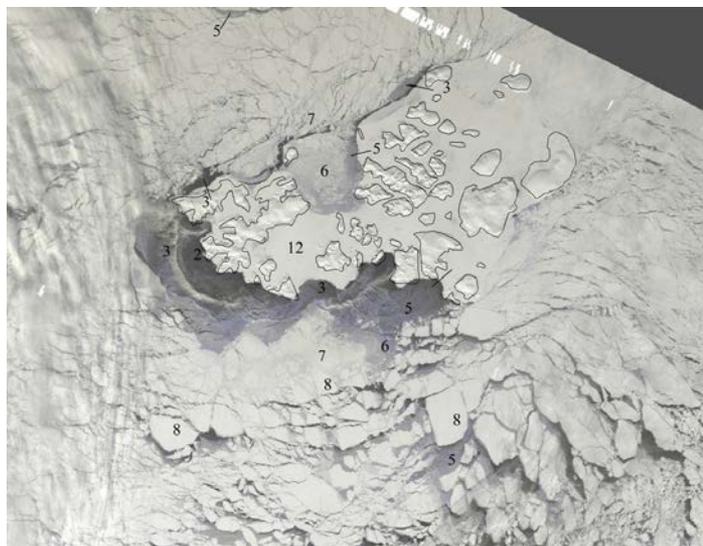
Изображение видимого диапазона с ИСЗ NOAA (1-й канал). Гренландское море.  
4 – блинчатый лед, 11 – старый лед.



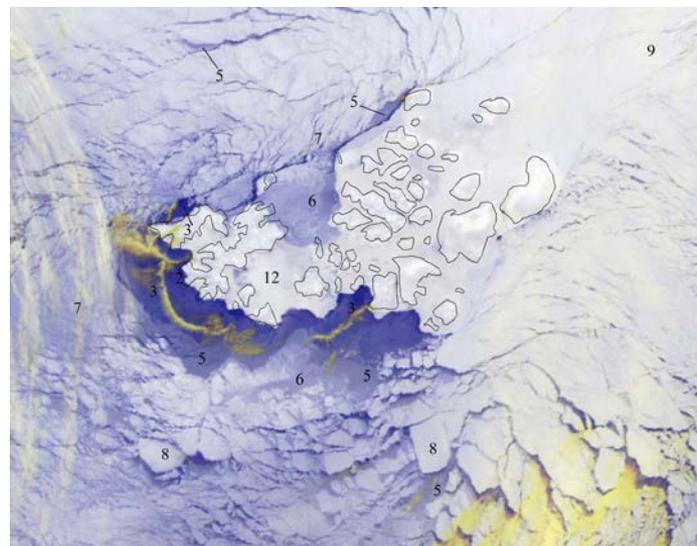
Синтезированное изображение с ИСЗ Terra/MODIS (1-й и 2-й каналы). апрель, юго-восточная часть Баренцева моря.

2 – начальные виды льда, 3 – нилас, 4 – блинчатый лед, 5 – серый лед, 7 а – обломки и битый однолетний тонкий лед, 7 – поля однолетнего тонкого льда, 8 – поля однолетнего среднего льда.

# Примеры дешифрирования спутниковых изображений



а)



б)



в)

Баренцево море, 4 апреля 2009 г.

а) Изображение видимого канала с Terra/MODIS, б), ИК- изображение с ИСЗ NOAA (5-,4-,3-й каналы), в) РЛ- изображение с ИСЗ Envisat.

2 – начальные виды льда, 3 – темный и светлый нилас, 5 – серый лед, 6 – серо-белый лед, 7 – однолетний тонкий лед, 8 – однолетний средний лед, 9 – однолетний толстый лед, 12 – припай.

# Примеры дешифрирования спутниковых изображений

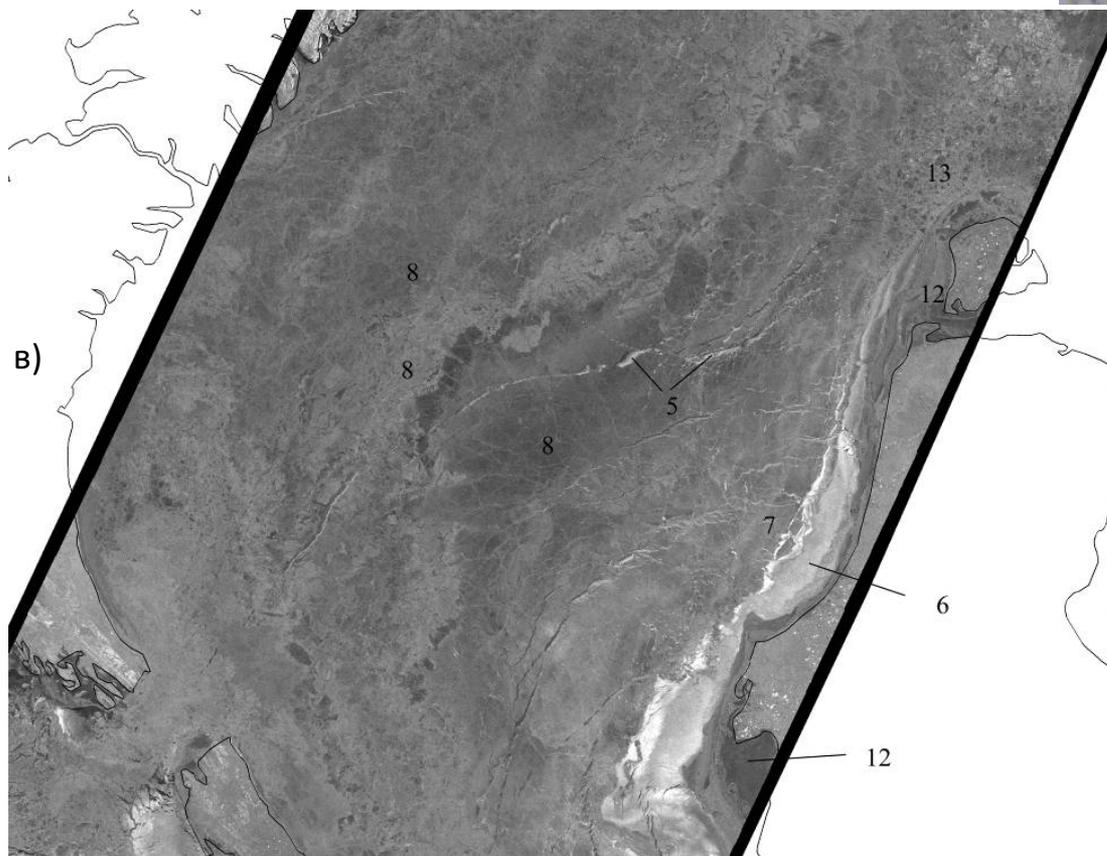
а)



б)



в)

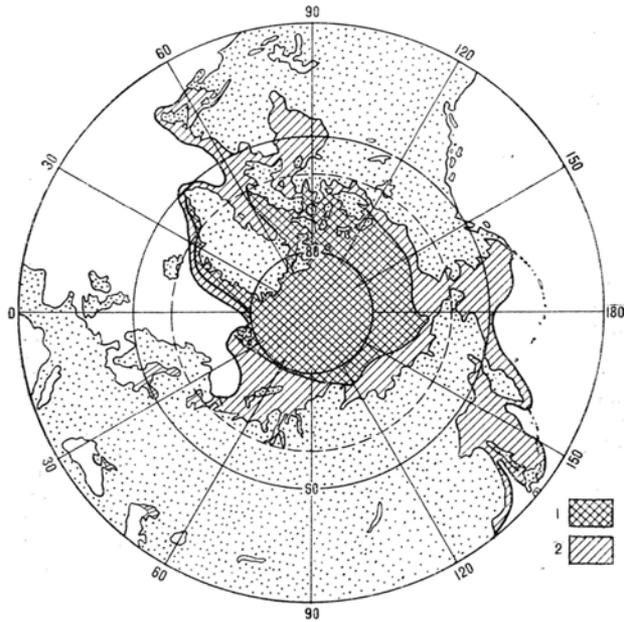


4 апреля 2009 г. Карское море.

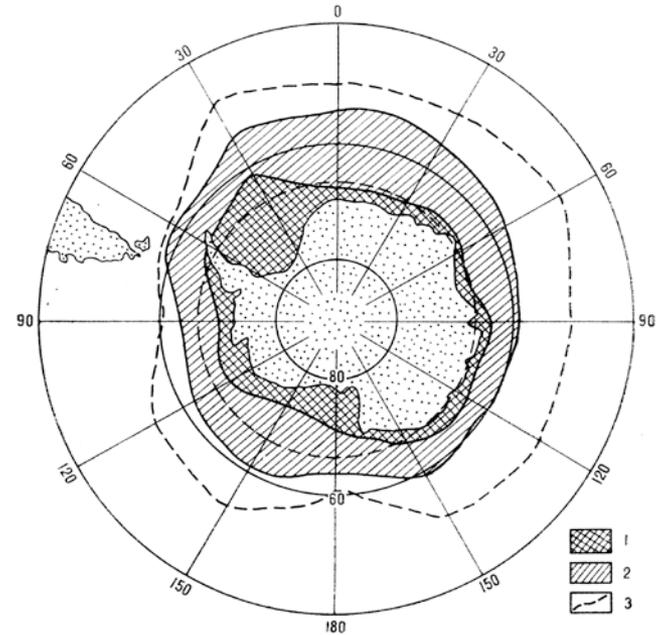
а) Синтезированный снимок с ИСЗ Terra/MODIS, б) ИК-снимок с ИСЗ NOAA, в) РЛ-снимок с ИСЗ Envisat.

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

# ледяной покров полярных областей

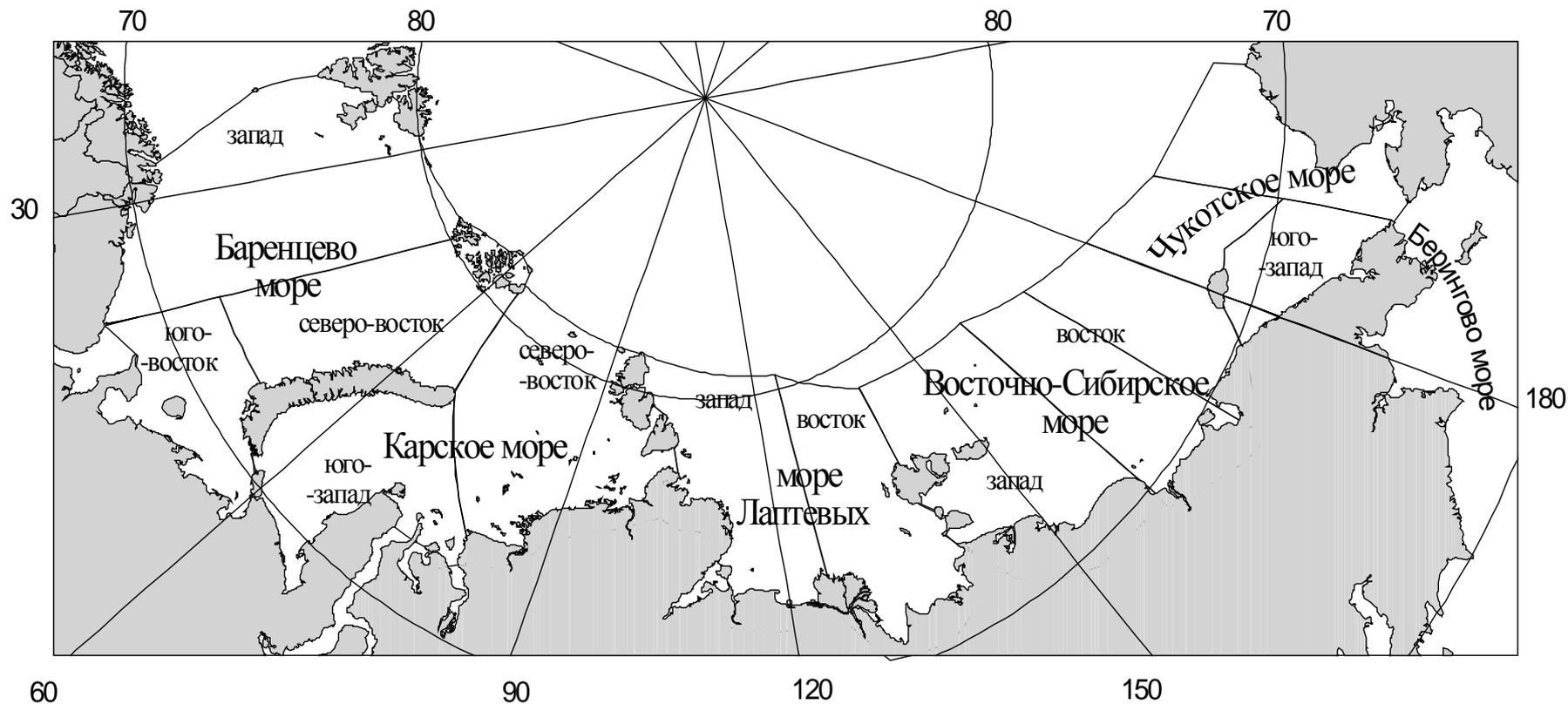


Среднегодовое распределение ледяного покрова в северном полушарии в летний (1) и зимний (2) периоды года



Распространение морских льдов в южном полушарии (1 - в марте; 2 - в сентябре; 3 - граница антарктической конвергенции)

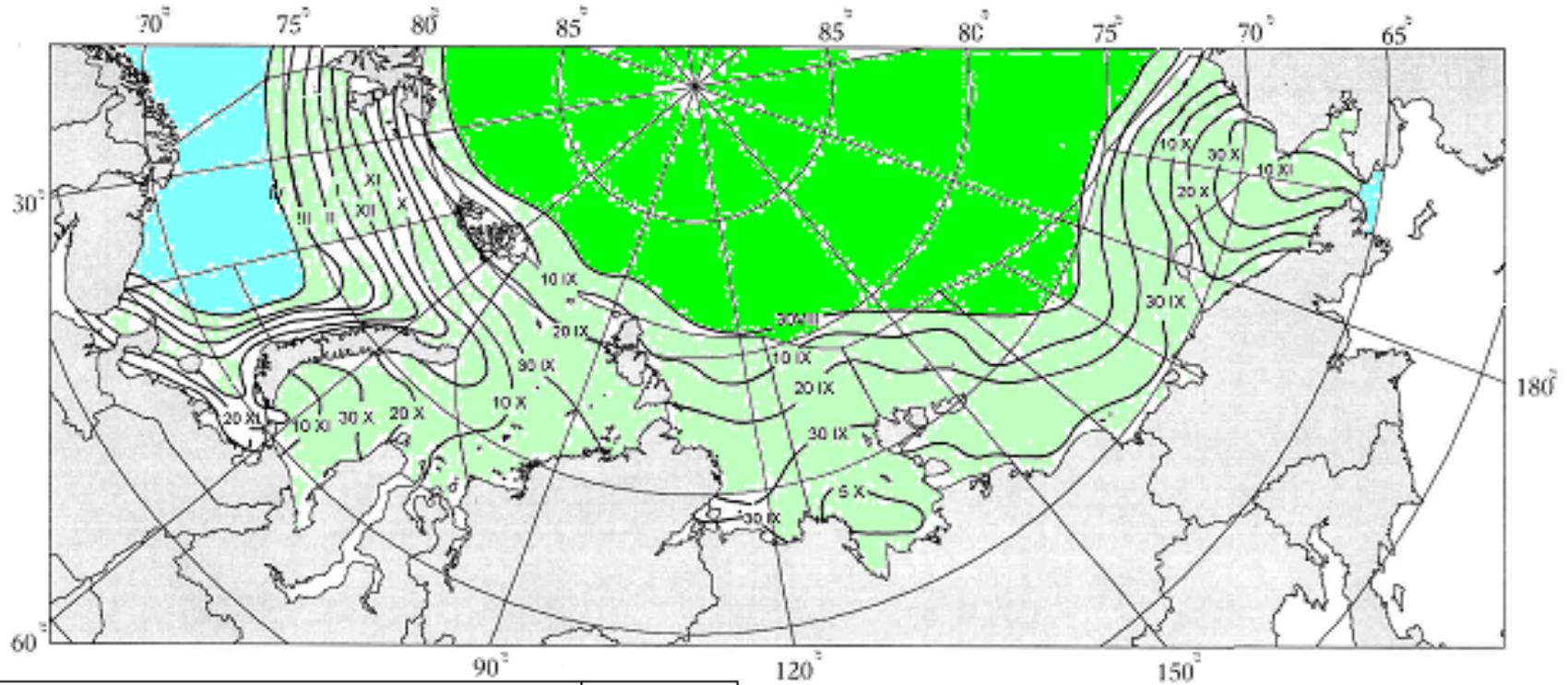
# Границы арктических морей сибирского шельфа и их районов



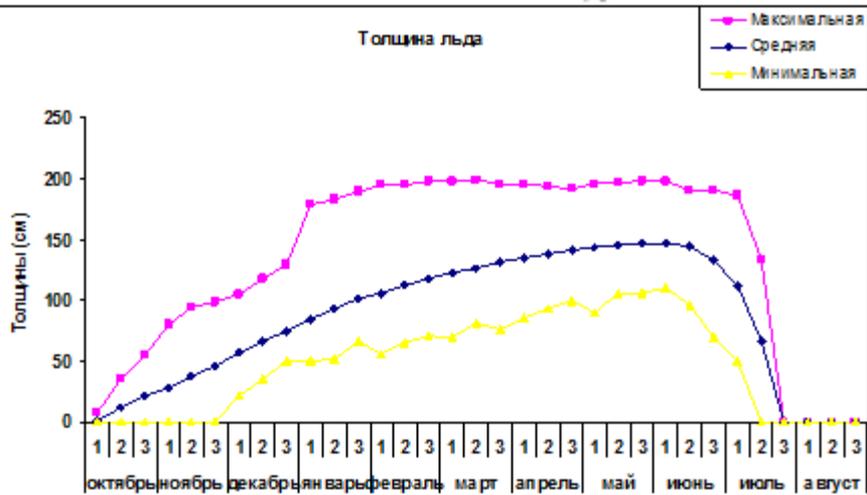
Общая площадь 2 500 000 км<sup>2</sup>

Карские Ворота – Берингов пролив 5550 км

## Средние сроки устойчивого ледообразования в арктических морях



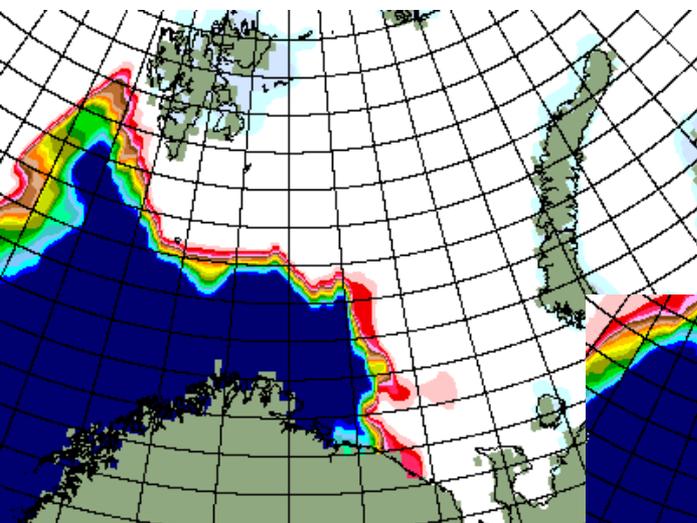
Толщина льда



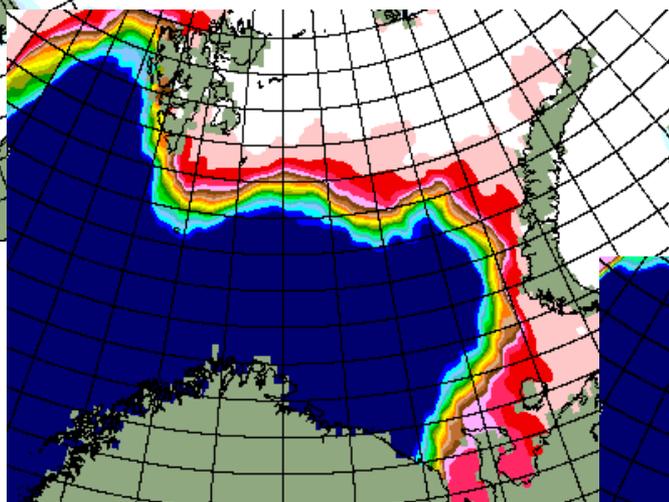
Нарастание толщины льда

## Распределение льда в Баренцевом море на период максимального нарастания в апреле

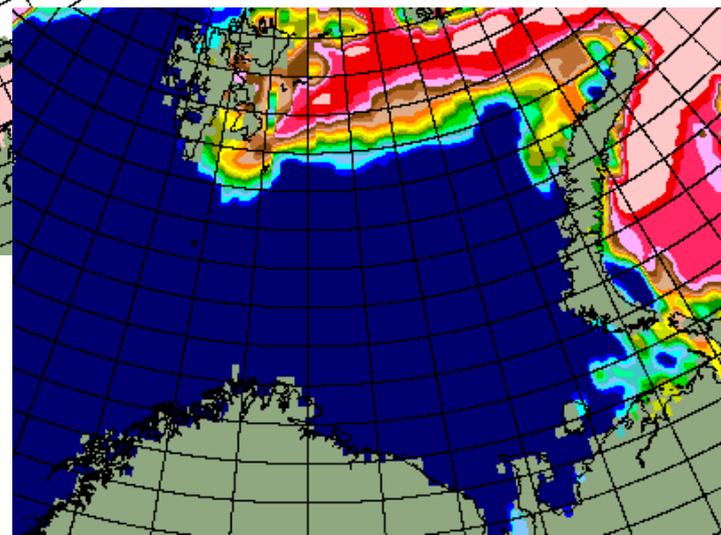
Тяжелый тип



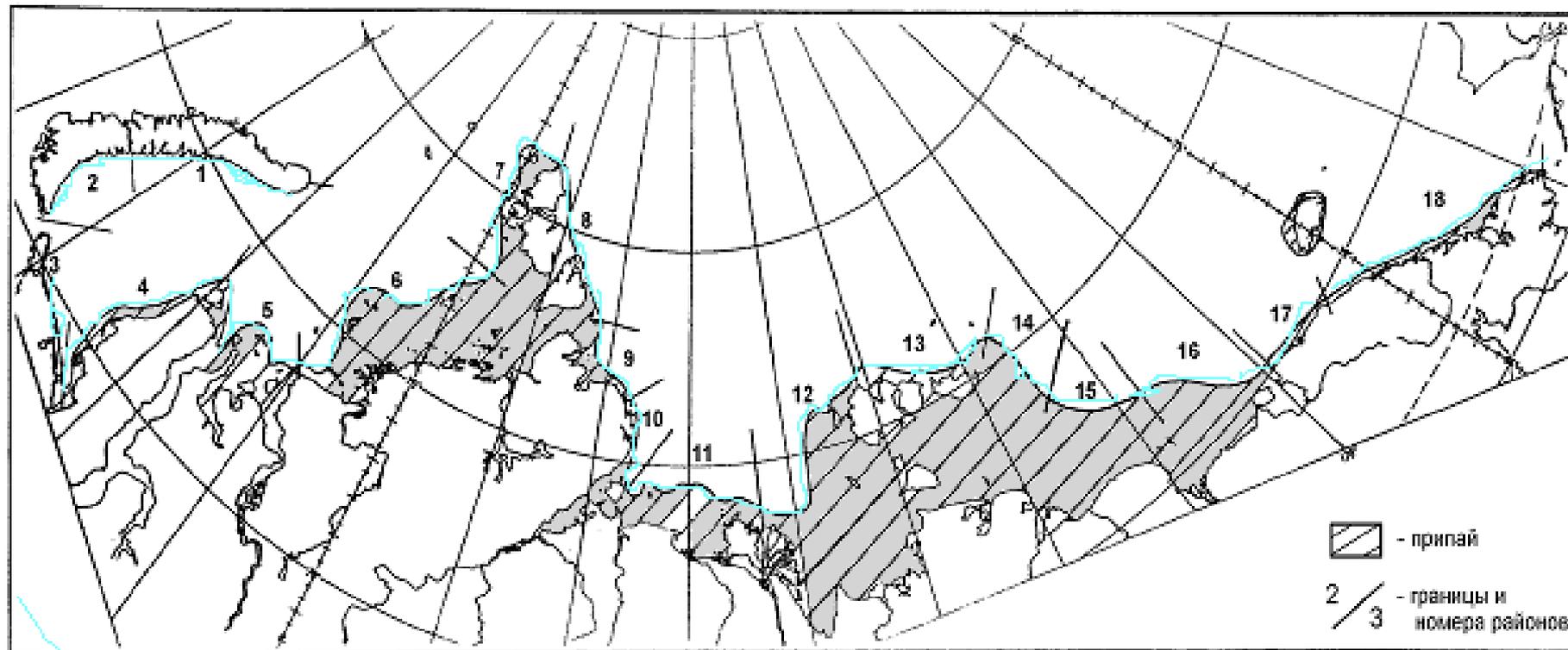
Средний тип



Легкий тип



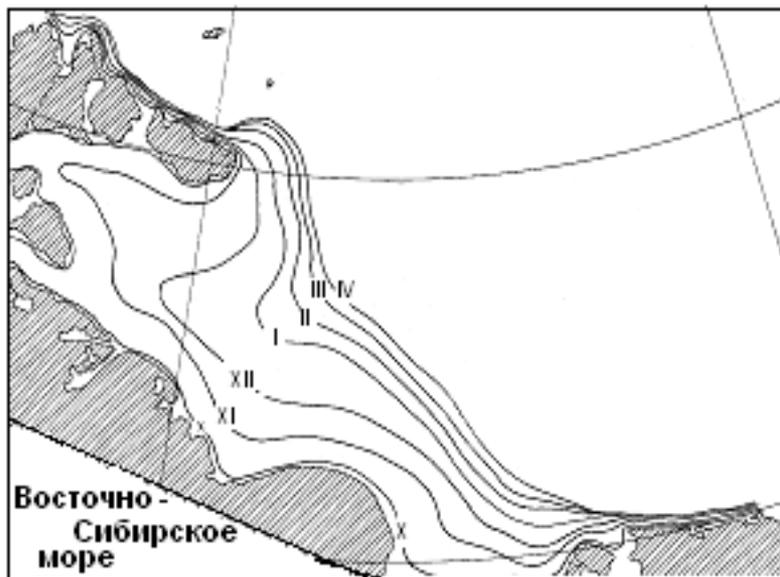
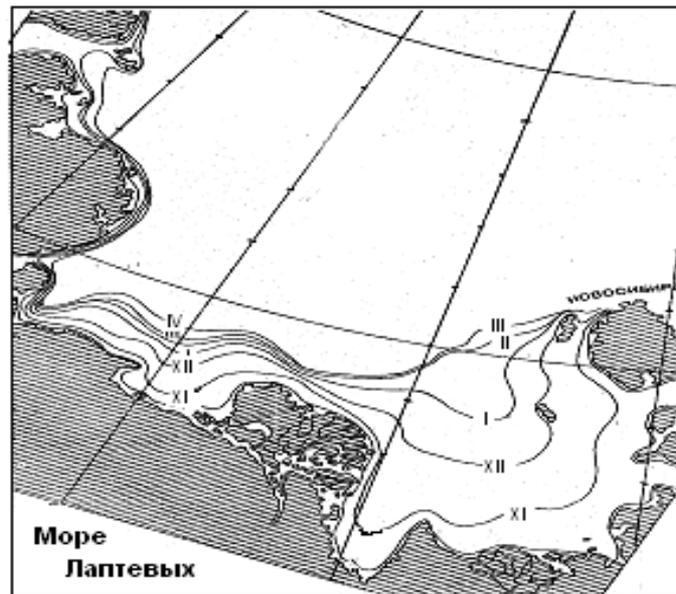
## Положение припая и заприпайных полыней в арктических морях сибирского шельфа



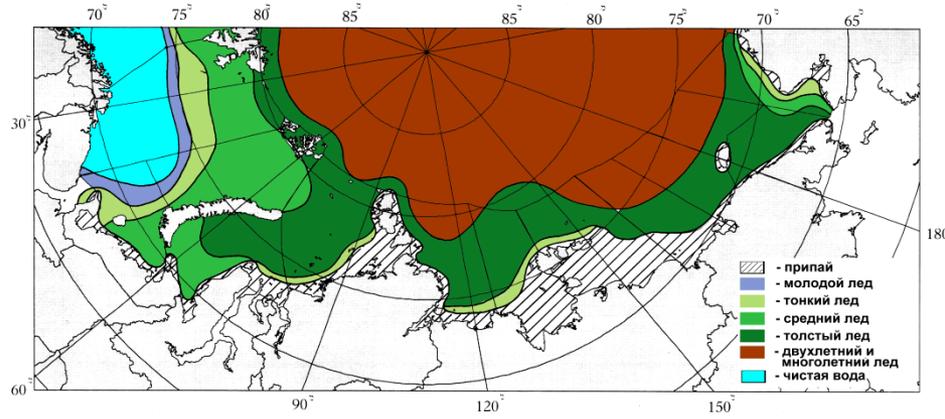
Средняя площадь припая – 650 000 км<sup>2</sup> (26%)  
Максимальная площадь – 878 000 км<sup>2</sup> (35%)

Средняя площадь полыней в марте составляет:  
Карском море – 47 тыс. км<sup>2</sup>,  
море Лаптевых – 34 тыс. км<sup>2</sup>,  
Восточно-Сибирском море – 7 тыс. км<sup>2</sup>  
юго-западной части Чукотского моря – 6 тыс. км<sup>2</sup>

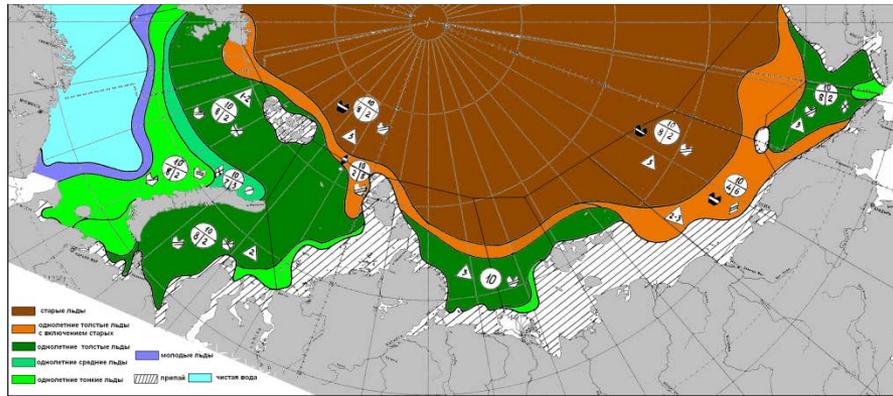
Среднее положение границ припая в период его нарастания в припайных зонах морей Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирском



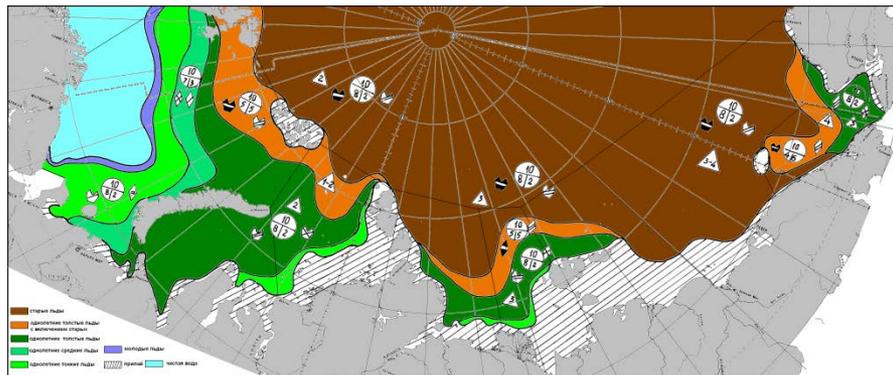
# Распределение льда различного возраста при средних, тяжелых и экстремально тяжелых условия в конце периода нарастания ледяного покрова



Средние условия



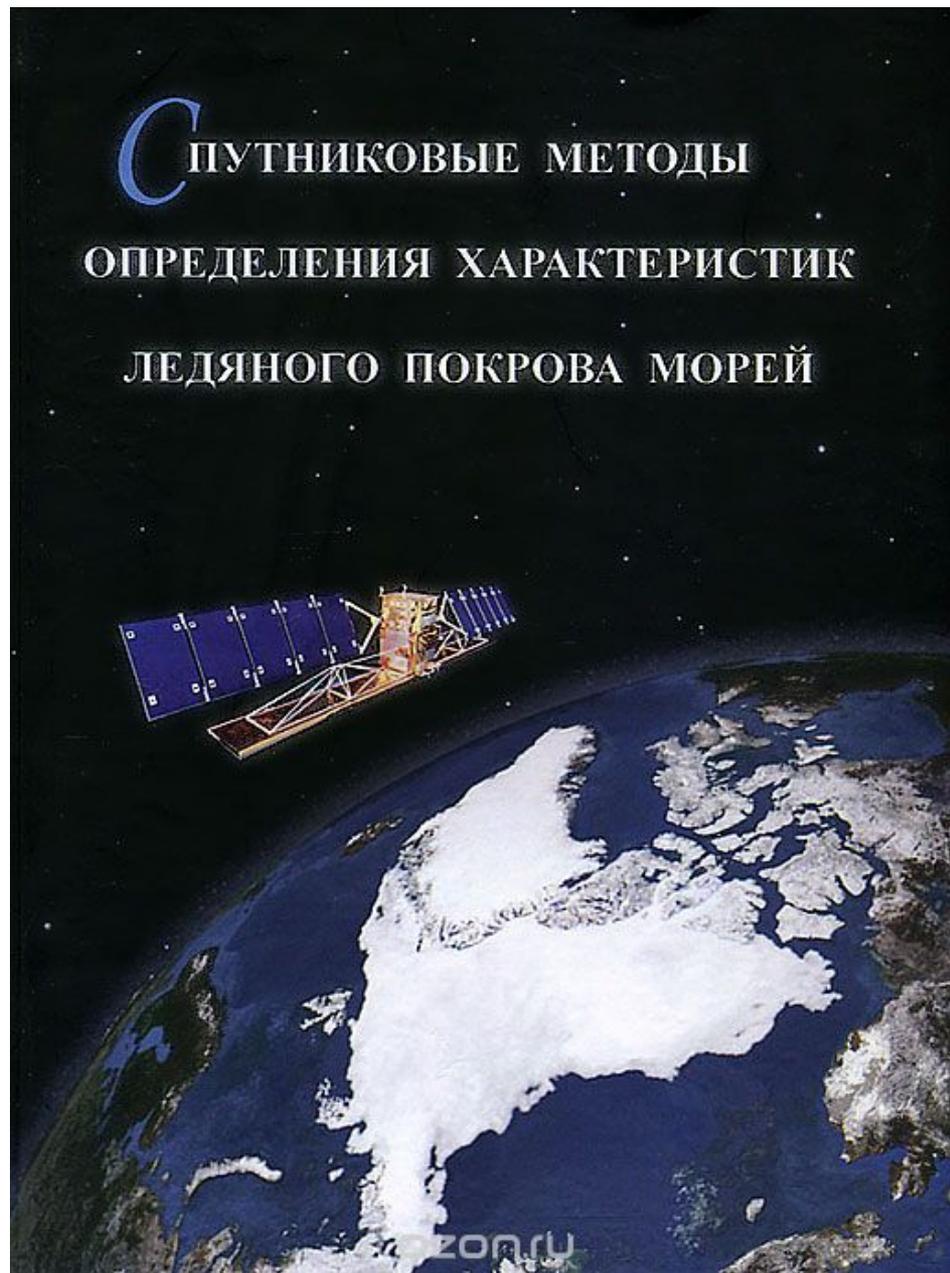
Тяжелые условия



Экстремально тяжелые условия

Часть информации можно  
найти в книге

СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА МОРЕЙ



Спасибо за внимание