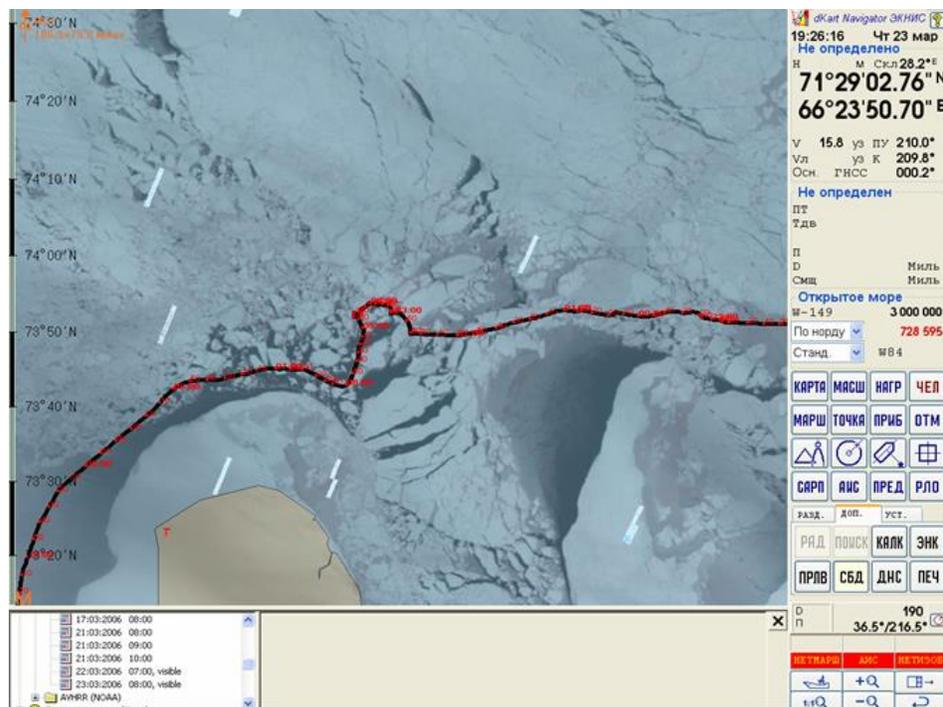
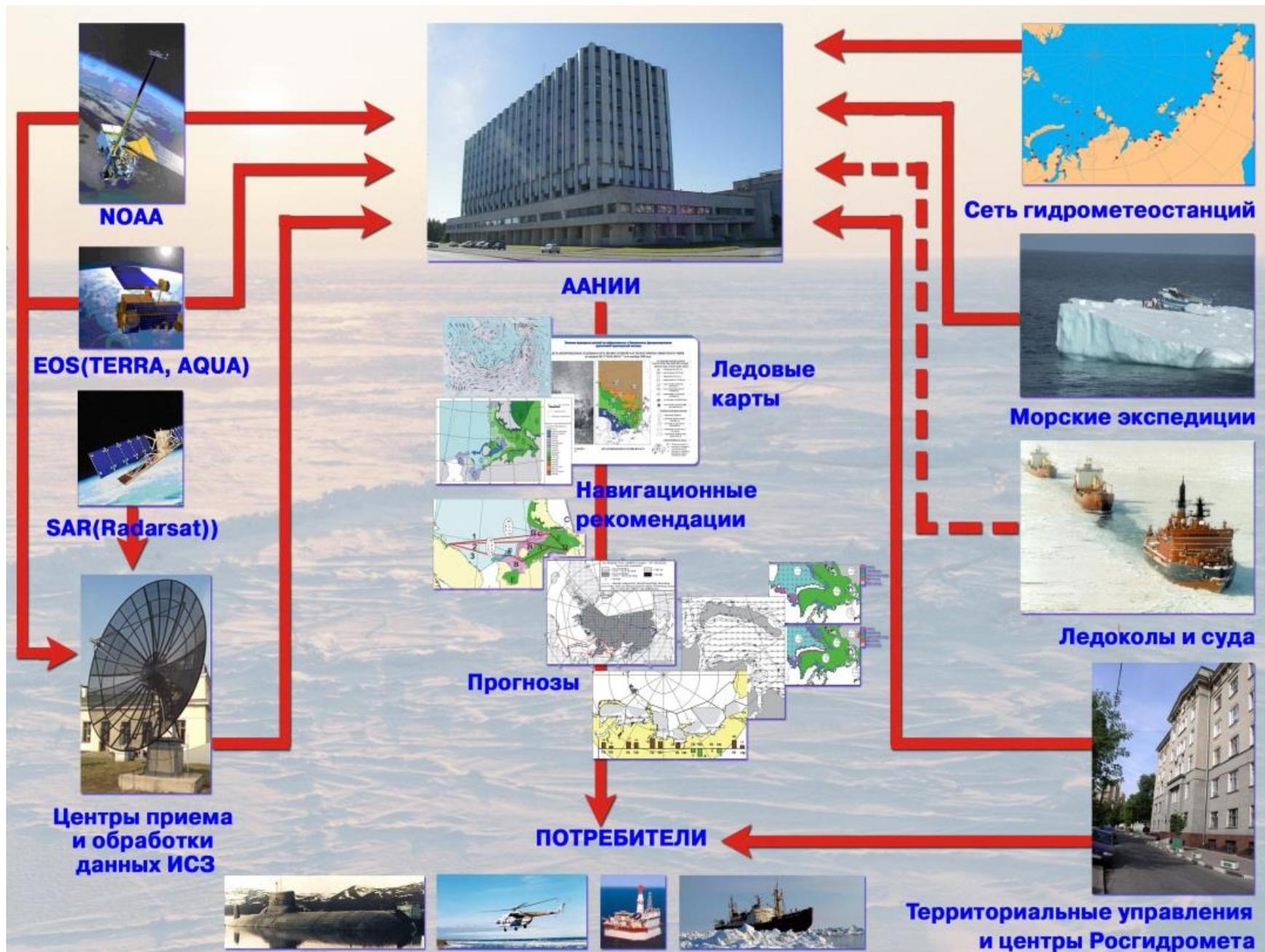


Выбор оптимальных маршрутов плавания во льдах: входные данные, разработанные методы и пути развития



Алексеева Татьяна Алексеевна
зав. лабораторией изучения
ледового плавания

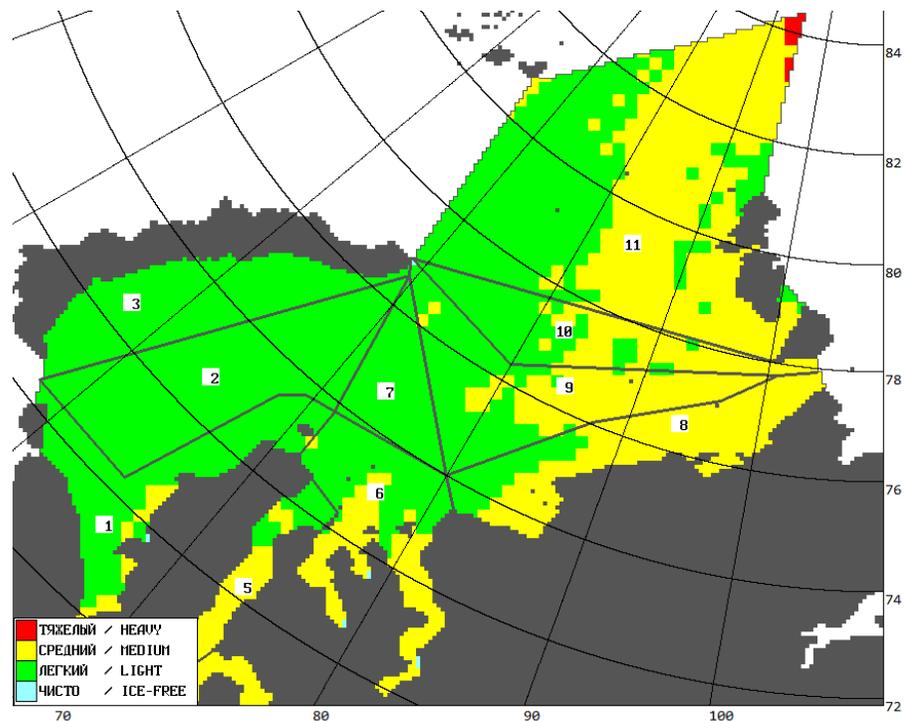
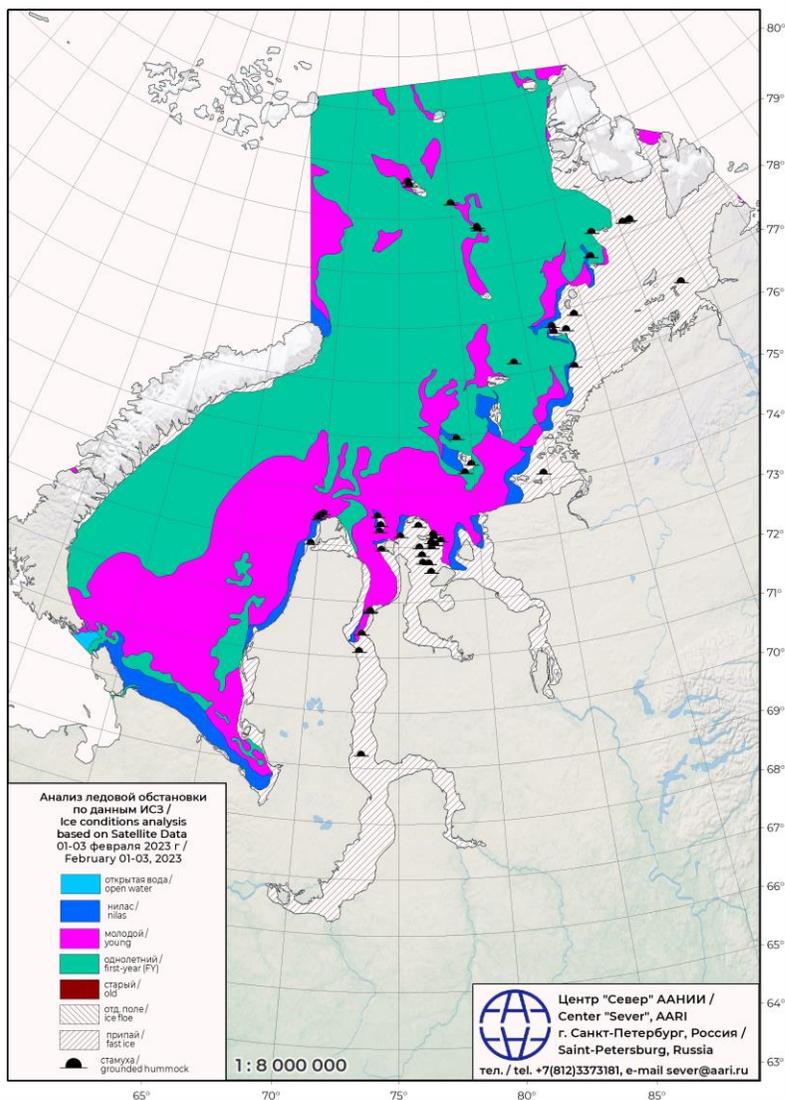
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ААНИИ



ЛЕДОВЫЕ УСЛОВИЯ И ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ

Ледовые условия – распределение характеристик льда в пределах изучаемого района, являются обобщенной характеристикой.

КАРСКОЕ МОРЕ / KARA SEA



Тип ледовых условий в Карском море / Type of ice conditions in the Kara Sea
Прогноз на 12-00 МСК 03.02.2023 - 12-00 МСК 07.02.2023 / Forecast on 12-00 Moscow 03.02.2023 - 12-00 Moscow 07.02.2023
Составлен 03.02.2023 / Issued 03.02.2023

КРИТЕРИИ ТИПА ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ

ЧИСТО:
общ. сплоч-сть 0 баллов

ЛЕГКИЙ:
сумма частных сплоченностей
(1-л. средние + 1-л. толстые + остаточные + старые) < 3 баллов

СРЕДНИЙ:
сумма частных сплоченностей
(1-л. средние + 1-л. толстые + остаточные + старые) > 3 баллов
при этом сумма частных сплоченностей
(1-л. толстые + остаточные + старые) < 3 баллов

ТЯЖЕЛЫЙ:
сумма частных сплоченностей
(1-л. толстые + остаточные + старые) > 3 баллов

CRITERIA OF ICE CONDITIONS TYPE

ICE FREE:
total concentration 0%:

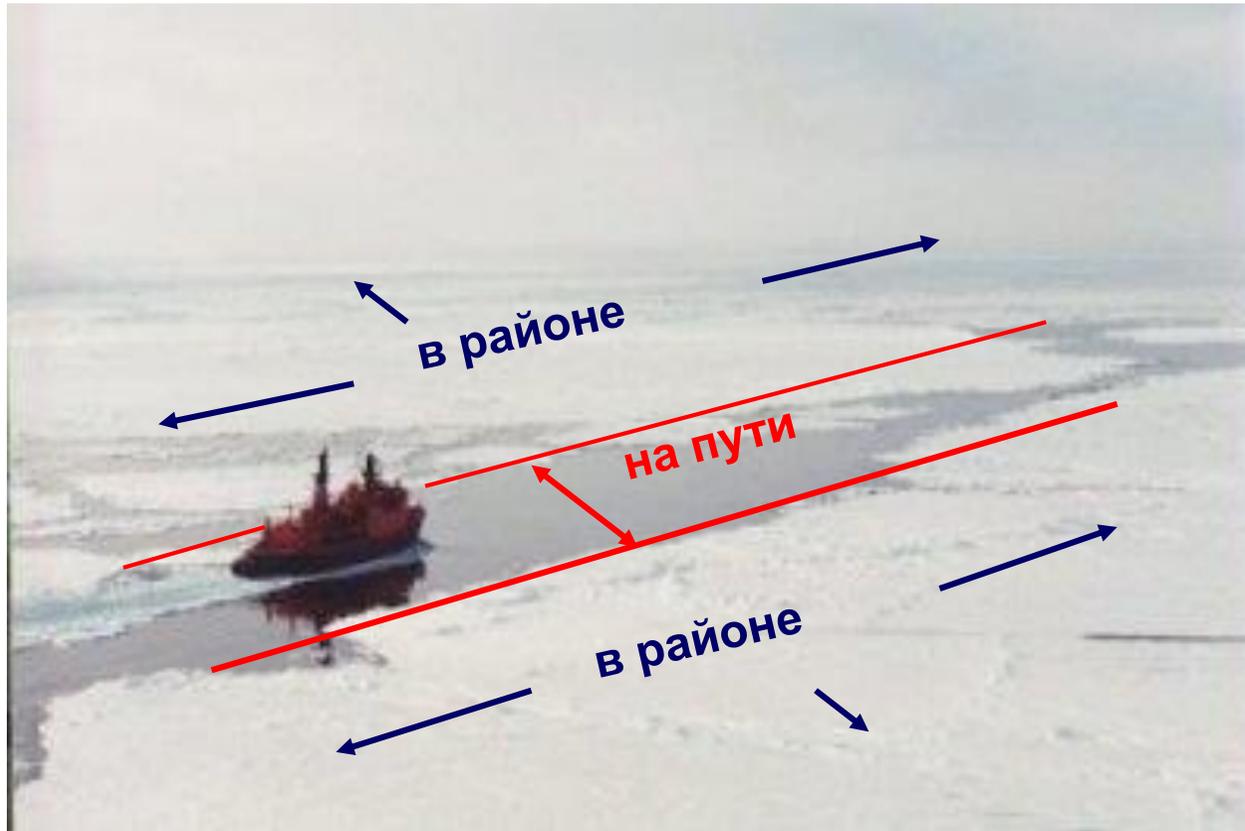
LIGHT:
sum of partial concentrations
(FY medium + FY thick + residual + old) < 30%:

MEDIUM:
sum of partial concentrations
(FY medium + FY thick + residual + old) > 30%:
but sum of partial concentrations
(FY thick + residual + old) < 30%:

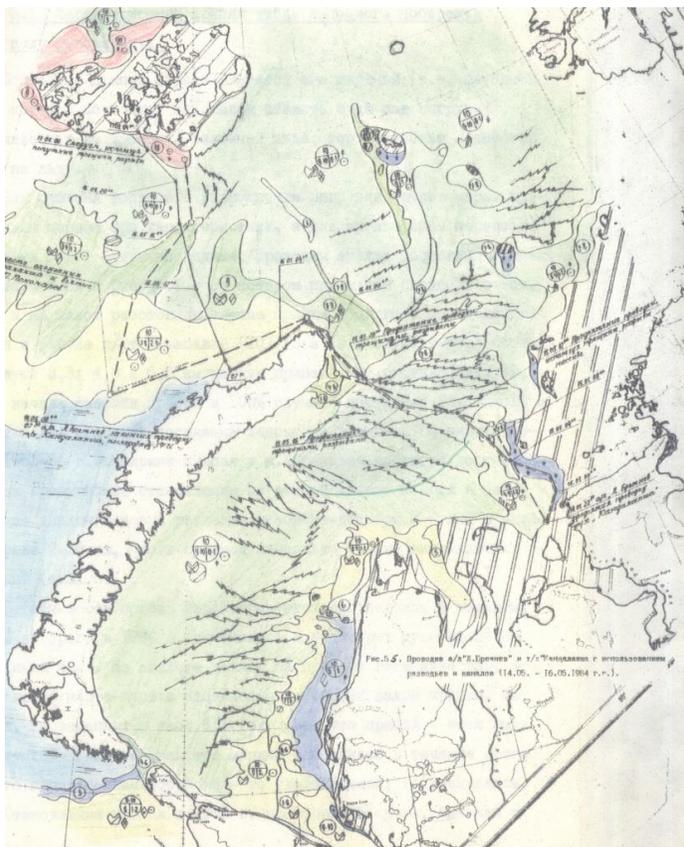
HEAVY:
sum of partial concentrations
(FY thick + residual + old) > 30%:

ЛЕДОВЫЕ УСЛОВИЯ ПЛАВАНИЯ

Ледовые условия плавания – характеристики льда, непосредственно оказывающие воздействие на корпус судна, то есть особенности распределения льда непосредственно на пути плавания.



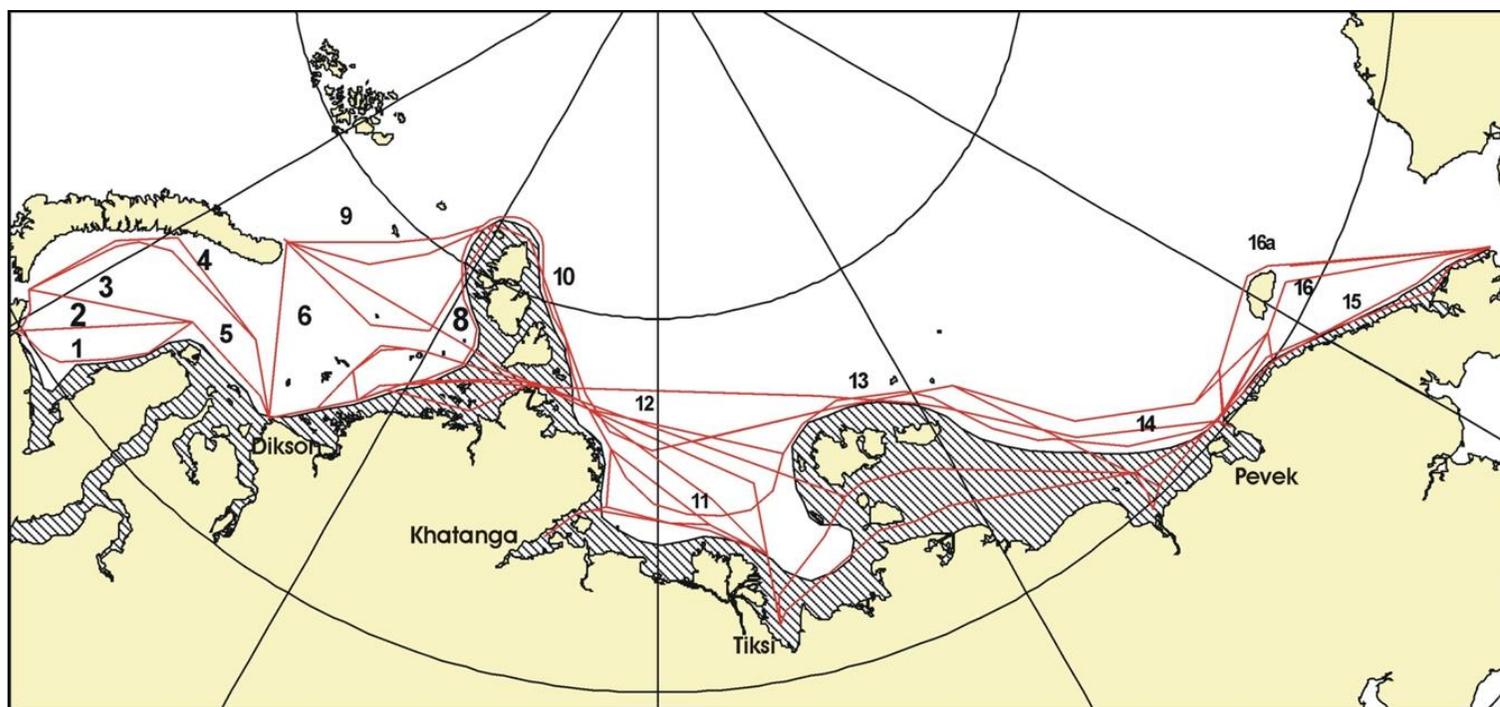
ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА КАК СРЕДЫ СУДОХОДСТВА



В середине XX века развернулись широкие исследования на трассе Северного Морского пути (СМП) и в Арктическом бассейне. В связи с обновлением транспортного и ледокольного флота изменилась тактика ледового плавания, возникла необходимость плавания в припайных районах, расширении сроков навигации, увеличения скоростей проводки судов, увеличения пропускной способности трассы СМП, появились новые требования к обеспечению судоходства. Появилась потребность создания специализированной ледовой информации о состоянии ледяного покрова непосредственно на пути движения судов. Для решения этих задач возникла необходимость исследования ледяного покрова как среды судоходства, создания алгоритмов количественной оценки влияния льдов на движения судов во льдах.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА КАК СРЕДЫ СУДОХОДСТВА

Анализ материалов натуральных наблюдений показал, что ледовые условия на пути плавания судов и ледоколов часто отличаются от ледовых условий, оцениваемых в целом по региону или морю. В 1961 году в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) был создан отдел Изучения ледового плавания, в задачи которого входило исследование ледяного покрова, как среды судоходства, выявление количественных показателей влияния характеристик ледяного покрова на трудность условий плавания. С тех пор специалистами ААНИИ накоплен огромный опыт по обеспечению специализированной гидрометеорологической информацией суда, функционирующие на трассе СМП, и, в частности, практический и методологический опыт разработки оптимального маршрута плавания.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ПЛАВАНИЯ ВО ЛЬДАХ С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ДО 3-5 СУТОК

В ААНИИ сформулирован общий принцип выбора оптимального пути, который предусматривает, что движение судна во льдах осуществляется по кратчайшему пути через зоны, в которых:

- общая сплоченность льда минимальна;
- количество молодых форм льда зимой и разрушенность льда летом максимальны;
- минимальная торосистость и повышенная раздробленность льда;
- преобладающая ориентация нарушений сплошности ледяного покрова **совпадает** с генеральным курсом движения каравана;
- предлагаемый маршрут плавания должен удовлетворять навигационным ограничениям (глубины и т.п.);

При выборе варианта плавания учитываются метеоусловия (в основном видимость и ветер), а также явления в ледяном покрове, оказывающие существенное влияние на эффективность плавания (сжатия, обледенение корпуса и т.д.).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ПЛАВАНИЯ ВО ЛЬДАХ С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ДО 3-5 СУТОК

1. Ежедневный мониторинг всех имеющихся гидрометеорологических данных
2. Ежедневные судовые данные
3. Информация от специалиста ААНИИ, находящегося на борту судна
4. Отслеживание текущего положения судов
5. Текущая и прогностическая ледовая информация
6. Определение оптимального маршрута плавания

Характеристики ледяного покрова, наиболее важные для судоходства:

- Сплоченность льда;
- Возрастной состав ледяного покрова;
- Толщина льда каждой возрастной градации;
- Формы ледяного покрова;
- Разрушенность льда;
- Сжатия льдов;
- Торосистость льда;
- Преобладающая ориентация НСЛ;
- Другие ледовые явления (стамухи, айсберги, ледяные реки)



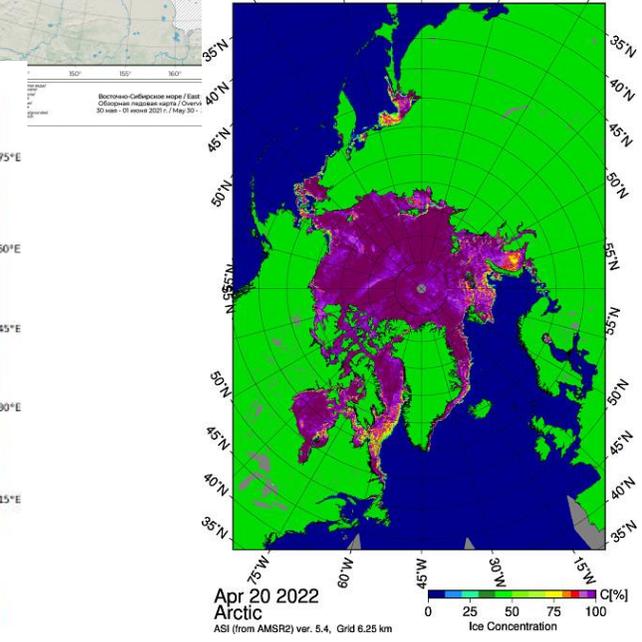
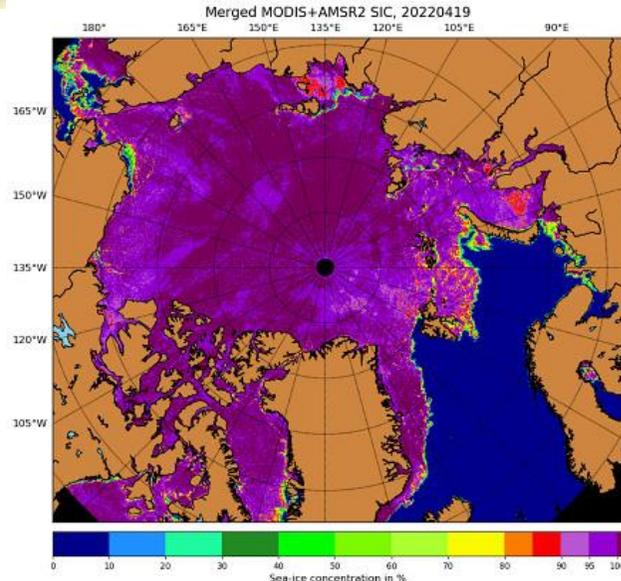
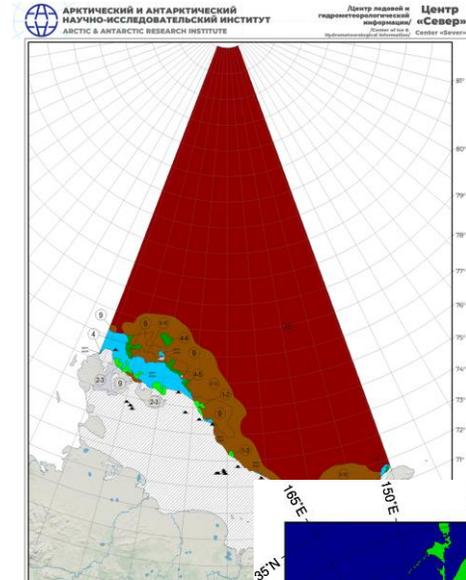
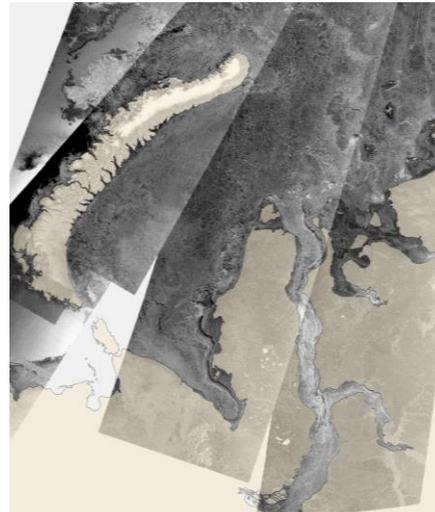
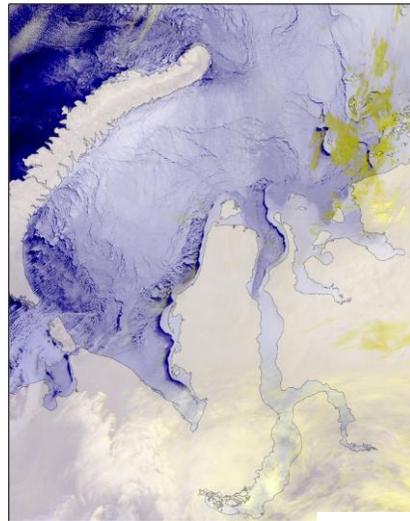
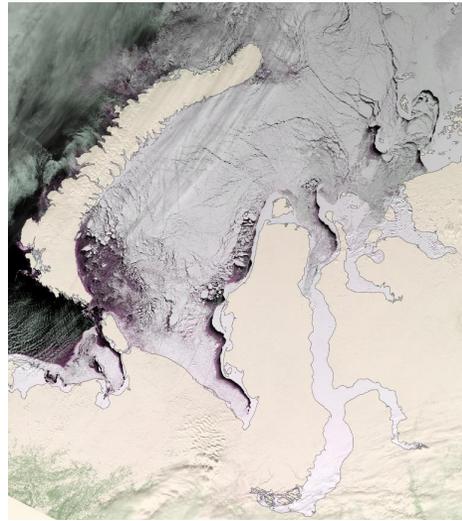
Эксплуатационные характеристики ледоколов и судов, необходимые для составления навигационных рекомендаций:

- Ледокол:
- тип
- мощность СЭУ
- длина
- ширина
- осадка
- предельная ледопроемкость
- скорость на чистой воде



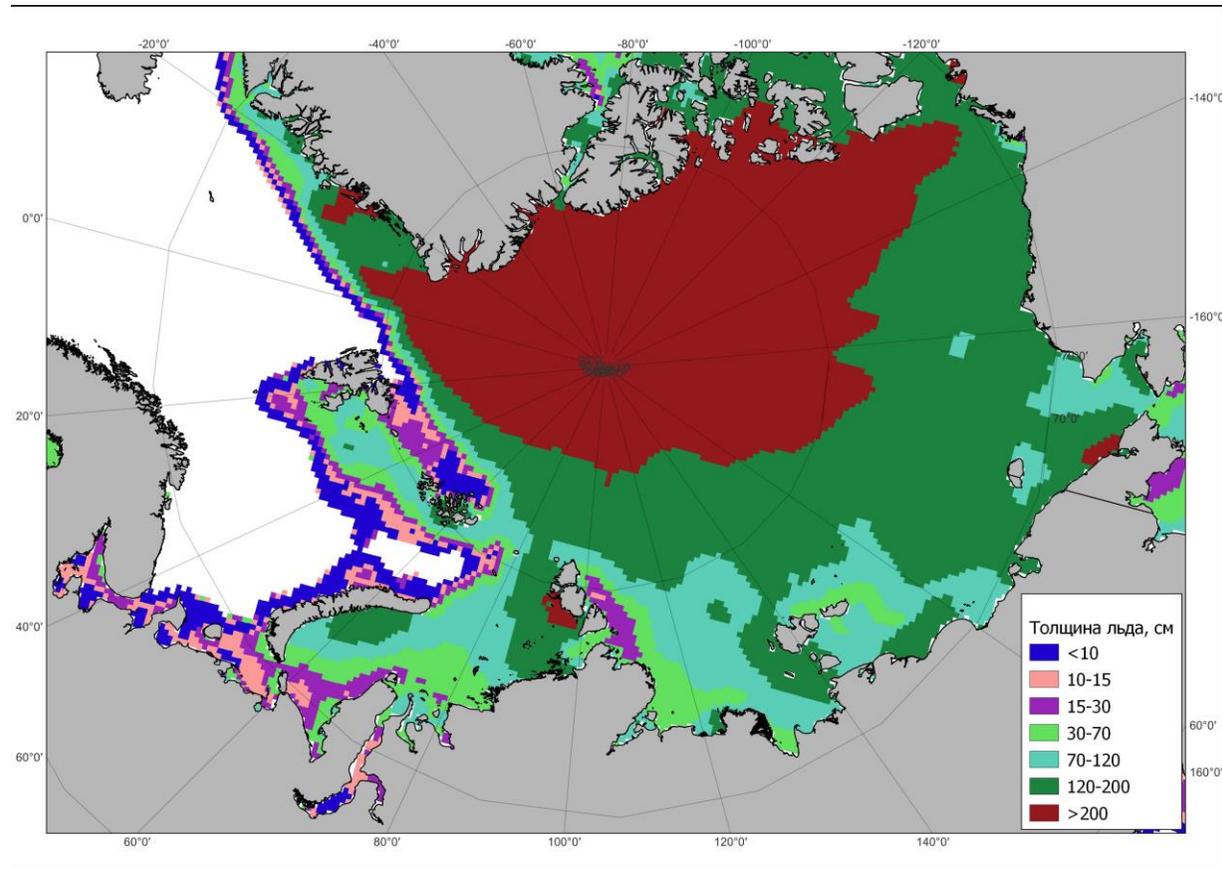
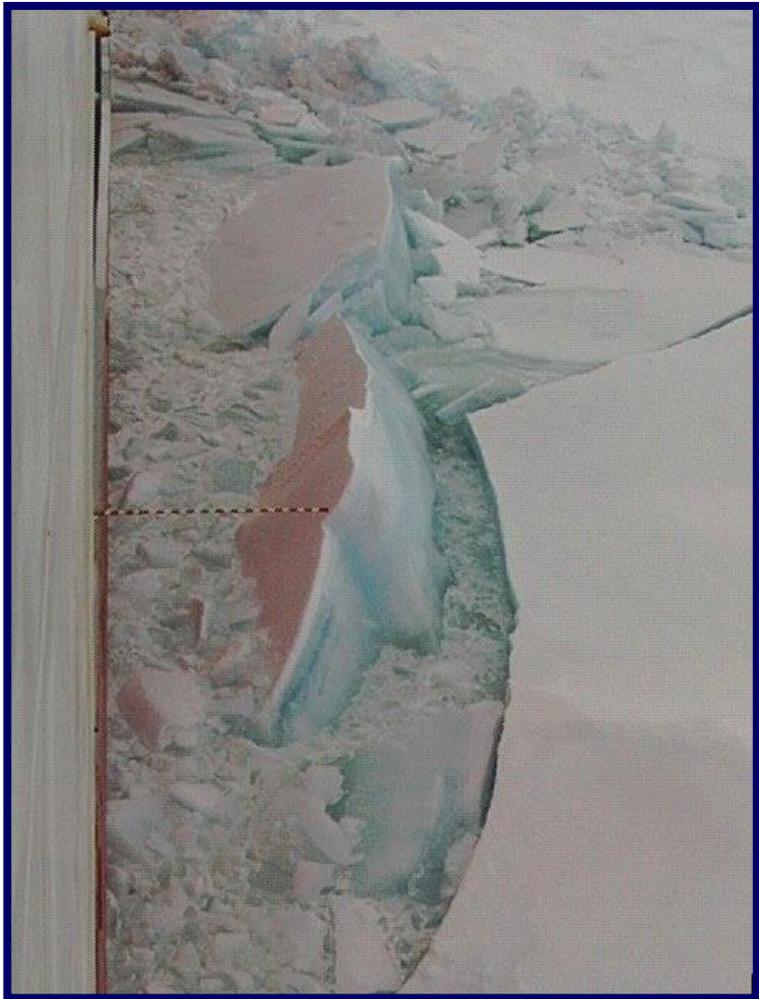
СПЛОЧЕННОСТЬ ЛЬДА И ВОЗРАСТ

Среди многообразия показателей состояния ледяного покрова, определяющих его сопротивление движению судов, решающее значение имеют сплочённость и количество льдов разного возраста



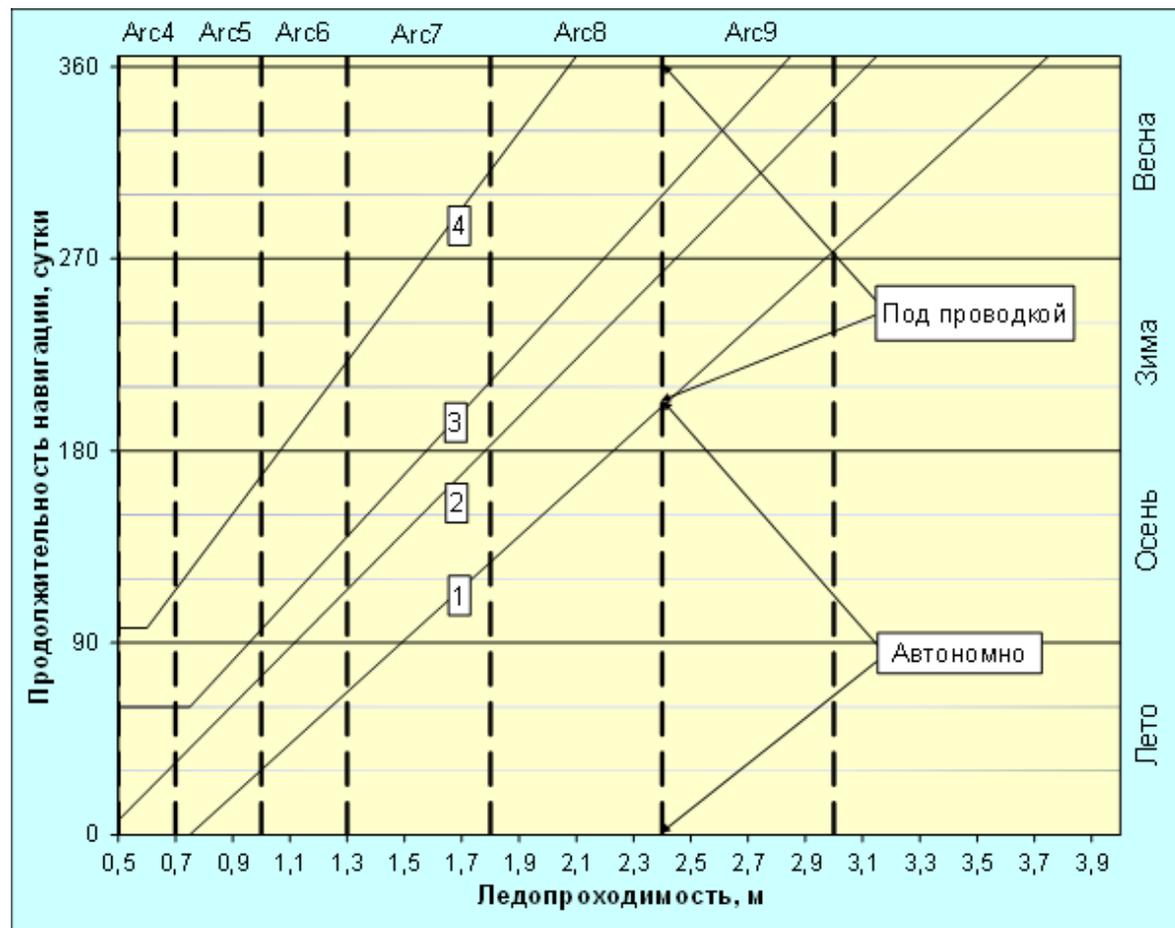
ТОЛЩИНА ЛЬДА

Среди многообразия показателей состояния ледяного покрова, определяющих его сопротивление движению судов, решающее значение имеют сплочённость и количество льдов разного возраста



ЛЕДОПРОХОДИМОСТЬ СУДНА

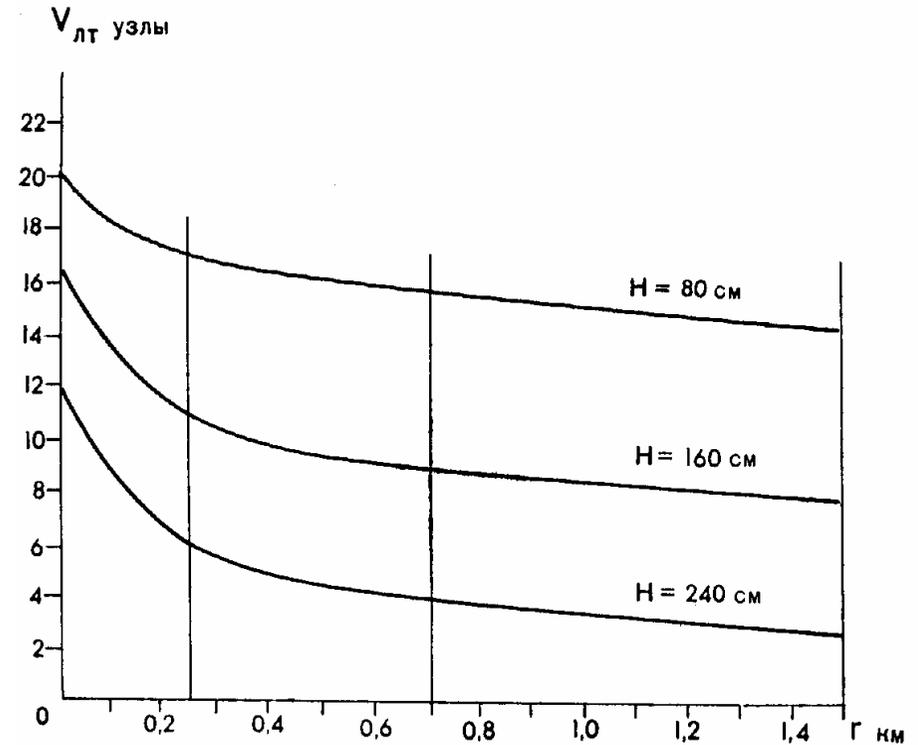
Ледопроеходимость - предельная толщина сплошного ровного льда, которую может преодолеть судно, двигаясь с минимально устойчивой скоростью (приблизительно 1,5-3 узла) при работе главной энергетической установки на полную мощность.



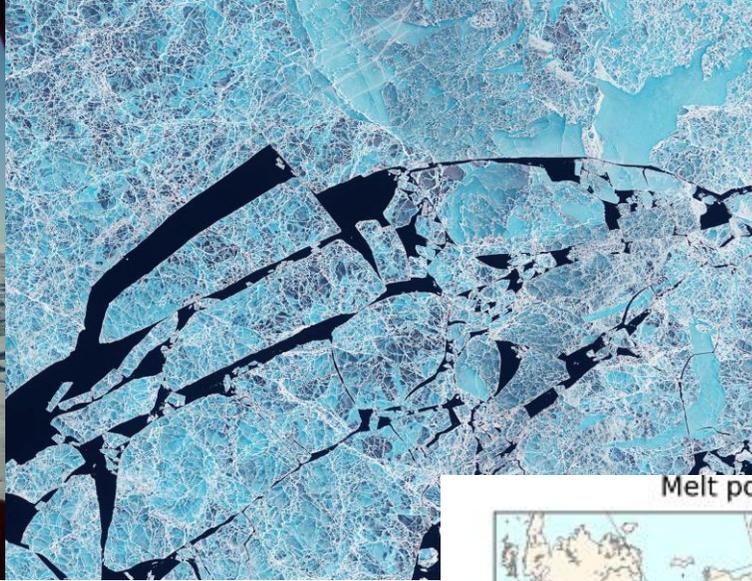
Цой Л. «К вопросу о критерии ледовой ходкости судов». Судостроение и судоремонт. 2019 №2 с.24-28

ФОРМЫ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

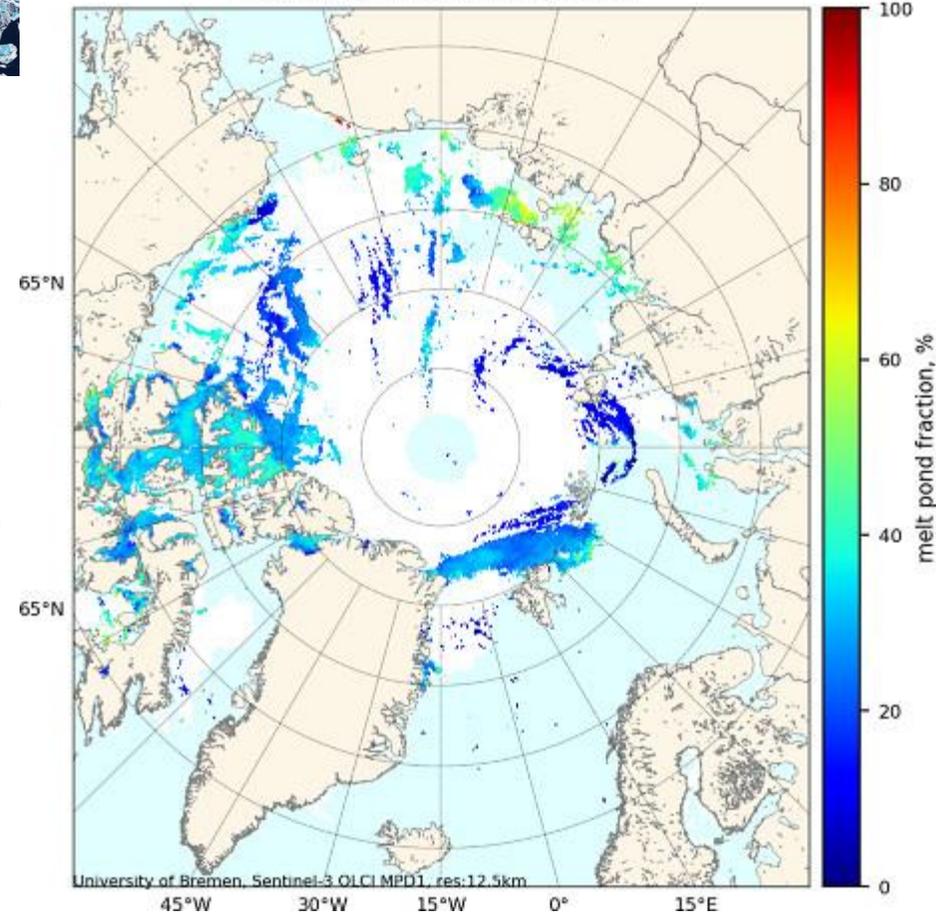
Раздробленность ледяного покрова. Горизонтальные размеры льдин оказывают существенное влияние на скорость движения судов. При прочих равных условиях минимальные значения скорости отмечаются в гигантских (обширных) ледяных полях, а максимальные – при движении в мелкобитых и тертых льдах. Эти различия обусловлены процессом взаимодействия корпуса судна с льдинами различных горизонтальных размеров. При преодолении больших, обширных и гигантских полей и плавании в припайных льдах, судно в основном затрачивает усилия на ломку льда. При движении во льдах меньших горизонтальных размеров усилия затрачиваются в основном на раздвигание и притапливание льдин.



РАЗРУШЕННОСТЬ ЛЬДА



Melt pond fraction 07.07.2021



Разрушенность льда – характеристика изменений состояния ледяного покрова, связанных с процессами таяния. В результате таяния на поверхности льда образуются снежницы, проталины и промоины, нарушающие сплошность ледяного покрова, существенно уменьшая сопротивление льда движению судна. Процесс ломки льда ледоколом (судном) с повышением степени разрушенности ледяного покрова приобретает все более избирательный характер: ломке подвергаются участки более разрушенных и тонких льдов, а толстый лед раздвигается корпусом судна

СЖАТИЯ



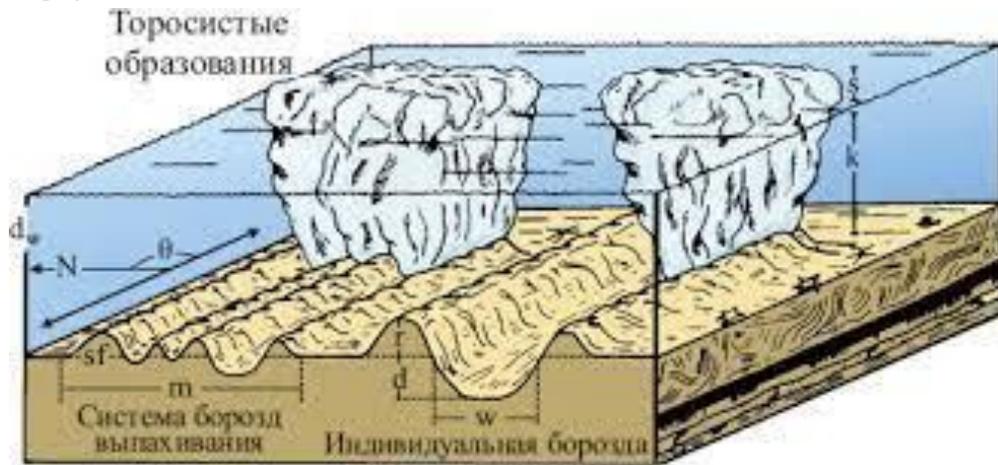
Наиболее существенно сжатия проявляются при плавании во льдах сплоченностью 9-10, 10 баллов и толщиной более 70 см. Сжатия приводят к резкому ухудшению условий плавания, часто оказываются причиной вынужденного дрейфа судов, ледовых повреждений. Хотя в арктических морях преобладают ветровые сжатия льдов, однако, при определенных условиях существенное влияние на судоходство оказывают приливные сжатия.

9 октября 1983 года теплоход "Нина Сагайдак" в результате сжатия затонул в проливе Лонга.

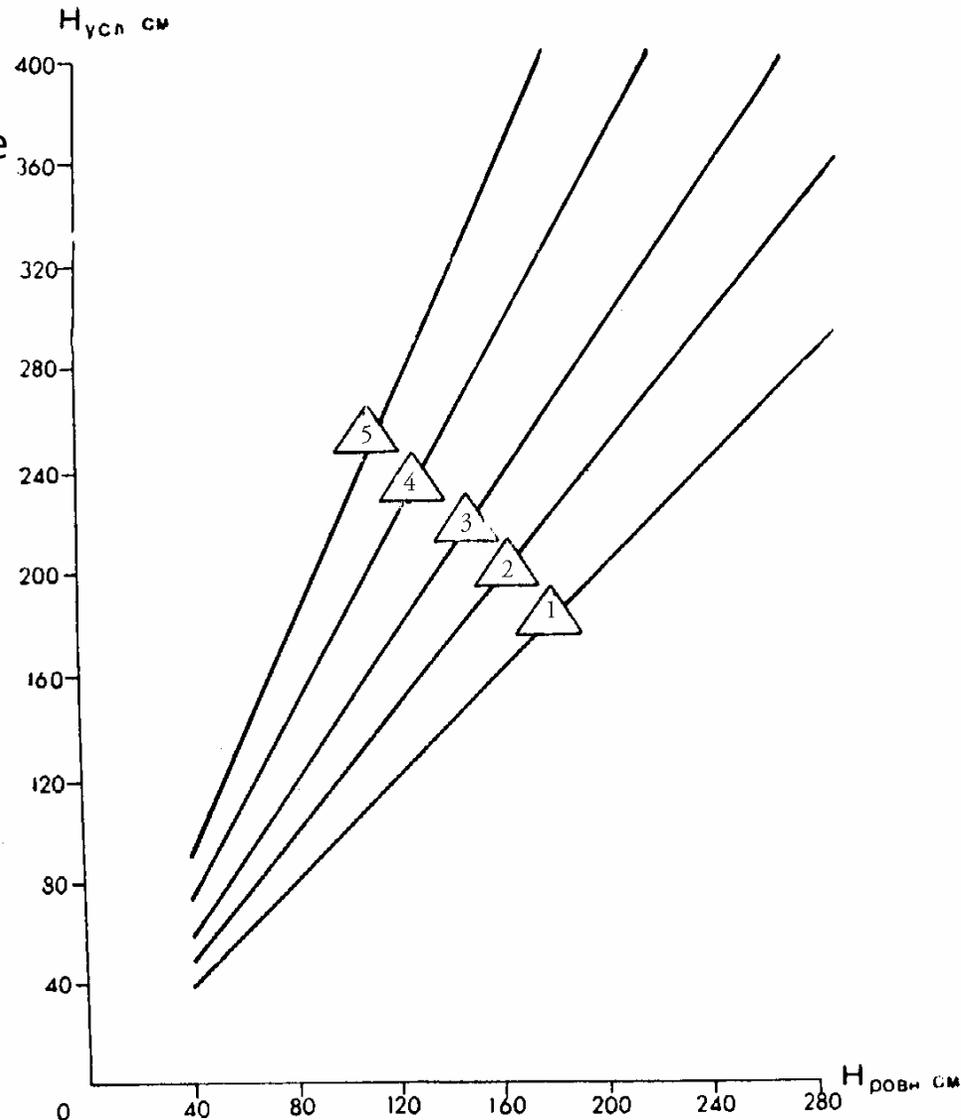


ТОРОСИСТОСТЬ

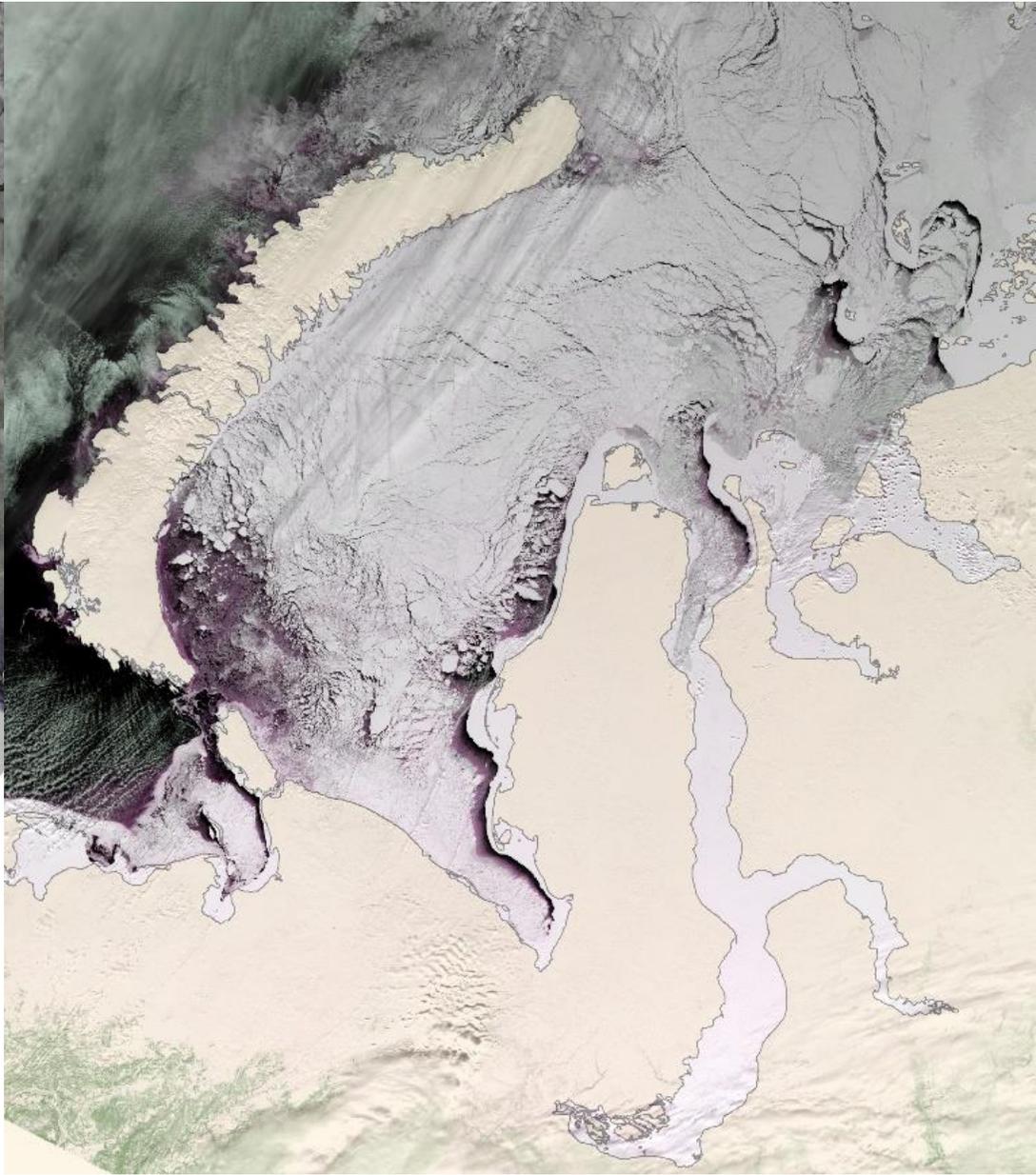
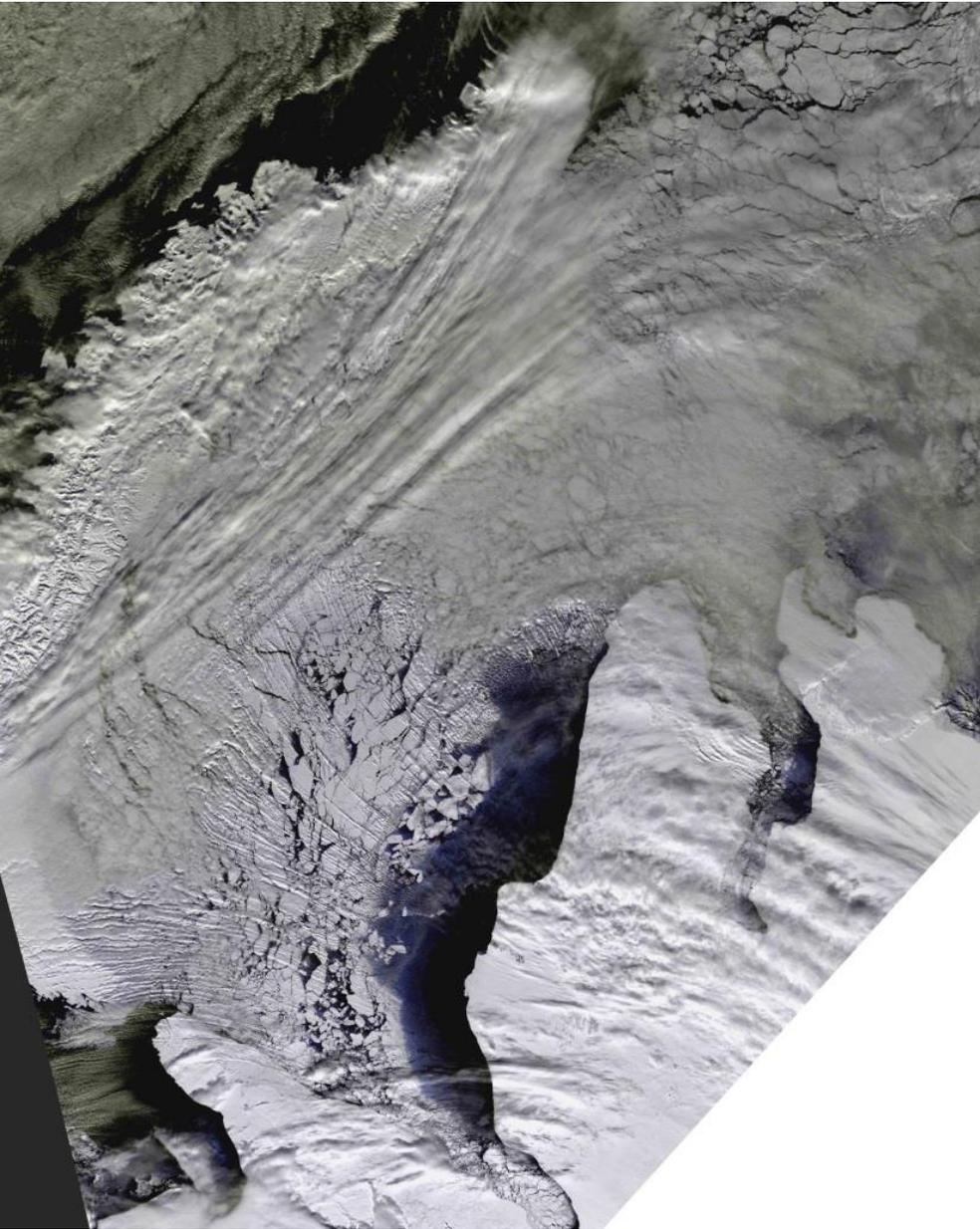
Влияние торосистости ледяного покрова на движение судна проявляется следующим образом: повышается средняя толщина льдов, преодолеваемых судном и тем больше, чем больше степень торосистости. Установлено, что скорость движения в ровных льдах заданной толщины практически не отличается от скорости в торосистых льдах той же “мощности” (эквивалентной толщины) льда. Увеличение торосистости на 1 балл (20 % от общей площади) в среднем приводит к приросту “мощности” льда на 25 %



На мелководье мощные торосы могут «вспахивать» дно и представлять опасность для трубопроводов.

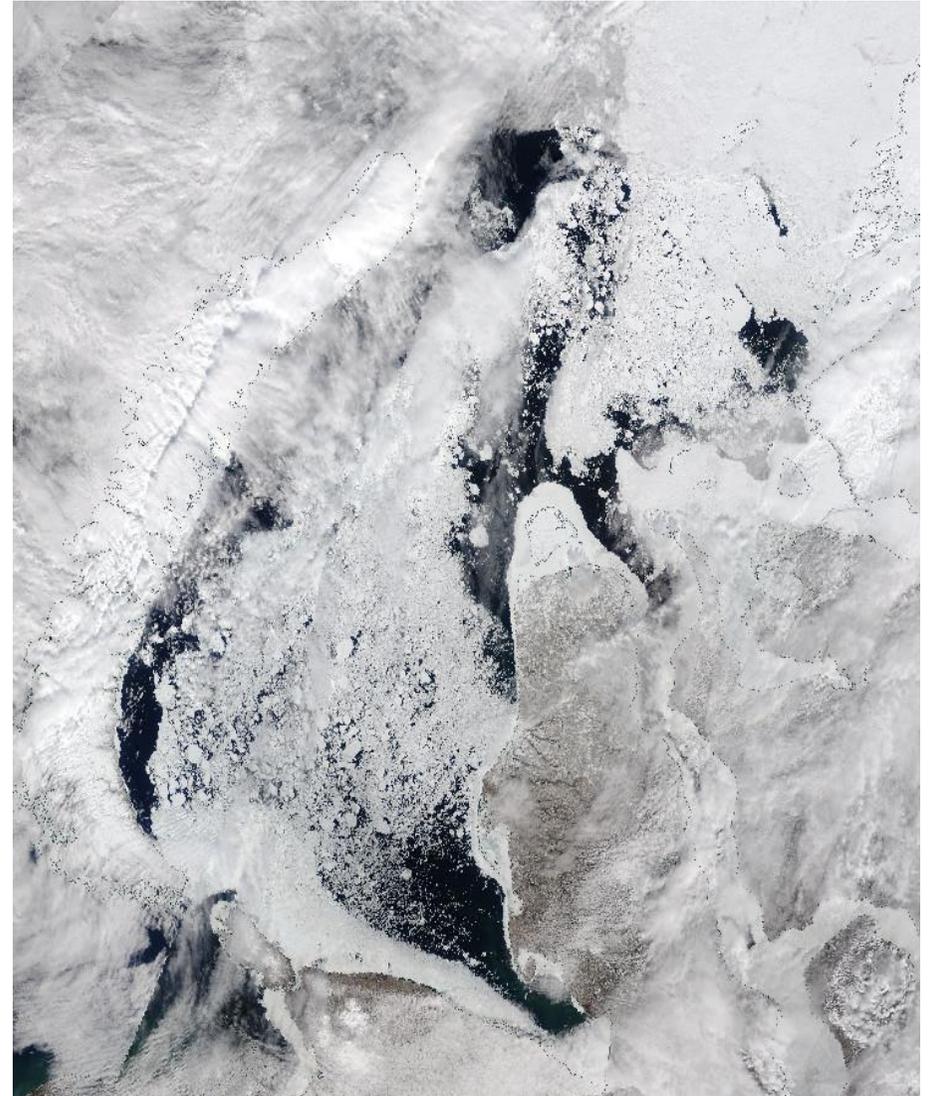


ПОЛЫНЫ



НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ ЛЬДА

Нарушения сплошности льда (разводья и трещины) - характеристики ледяного покрова, существенно влияющие на эффективность и безопасность судоходства



НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ ЛЬДА

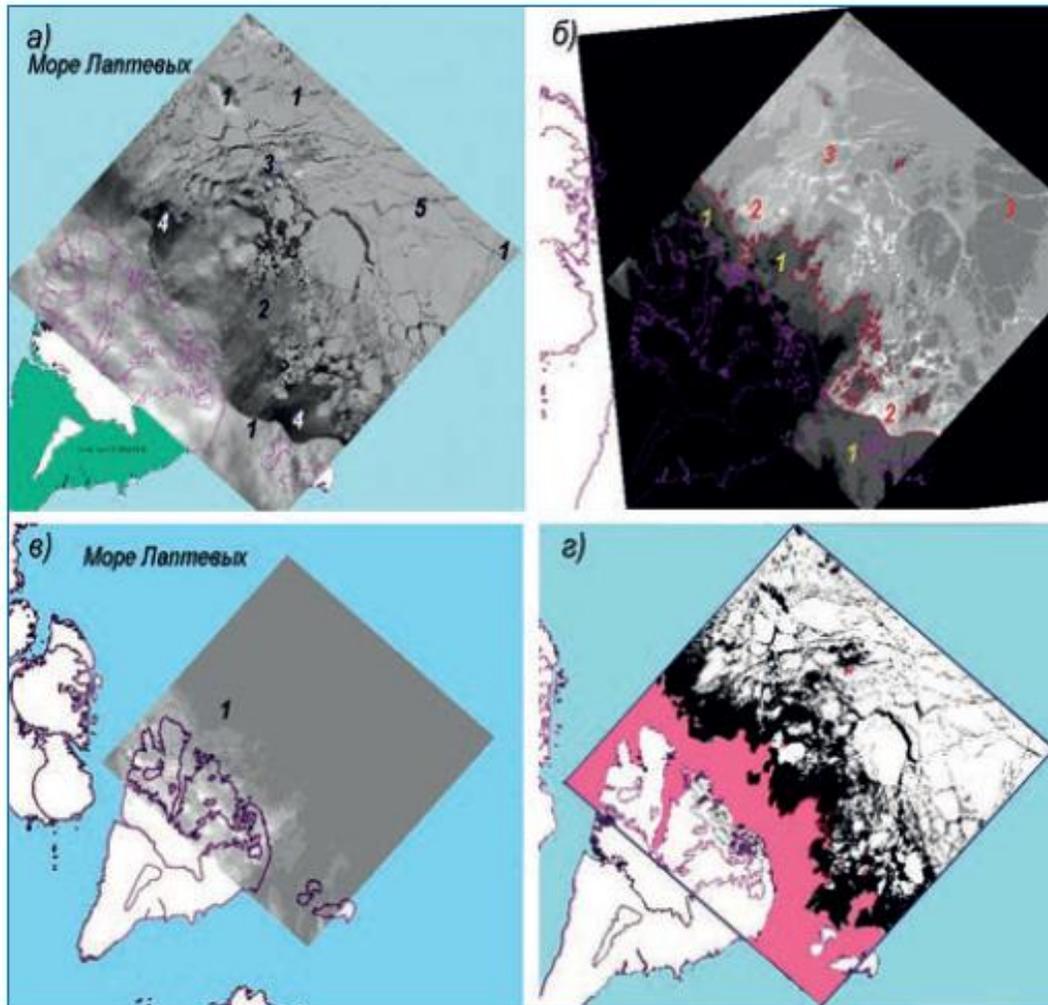


Рис. 1. Нарушения сплошности ледяного покрова, выделенные по снимку с Landsat-8 за 21 апреля 2021 года. Район моря Лаптевых.

а) исходный снимок, панхроматический диапазон: 1 — сплошная облачность; 2 — перистые облака; 3 — тень от облаков; 4 — открытая вода; 5 — разводья; б)

В. Г. Смирнов, И. А. Бычкова, Н. Ю. Захваткина Разработка методов оперативной оценки нарушений сплошности ледяного покрова с использованием спутниковой информации // Российские полярные исследования. — 2022. — № 1(47). — С. 5-7.

В статье представлены промежуточные итоги по результатам разработки автоматизированных методов оценки состояния морского ледяного покрова, на основе снимков ИСЗ видимого и ИК-диапазонов и радиолокационных данных с различной поляризацией.

Опасные ледовые явления

Стамухи

Стамухи – торосистые ледяные образования, сидящие на мели. Могут формироваться зимой в виде одиночных образований, так и в виде групп или скоплений. Формируются в припае и в открытом море на отмелях. Могут дрейфовать.



Осадка кия исследуемых стамух в Печорском море от 4,5 до 16,3 м, в Карском море - до 28 м. Площадь до нескольких сотен кв.км. (Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н., 2006 г.)

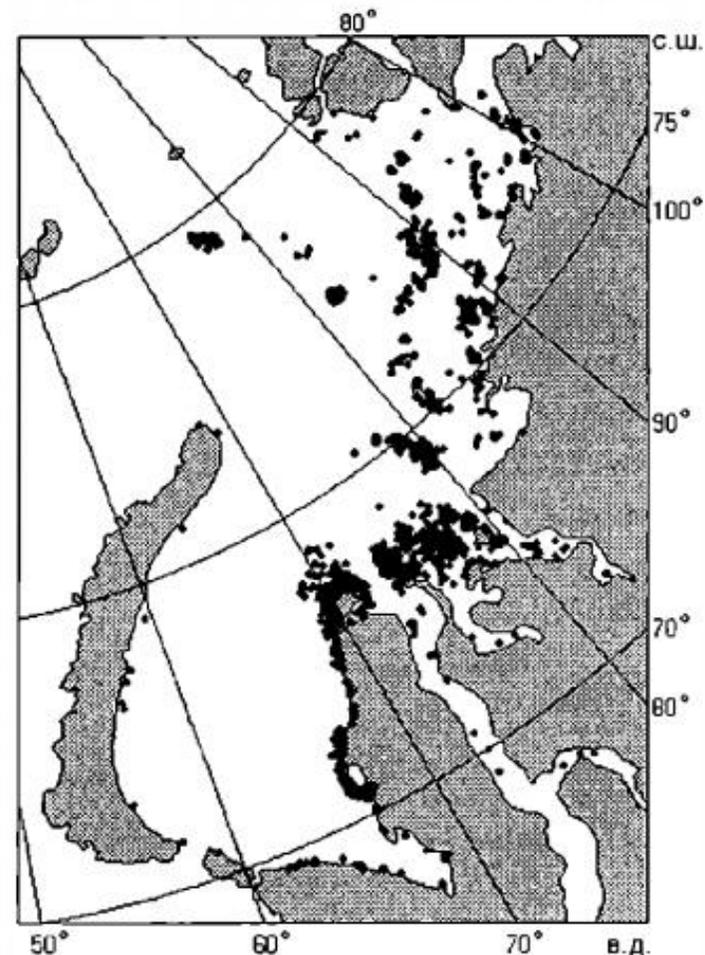
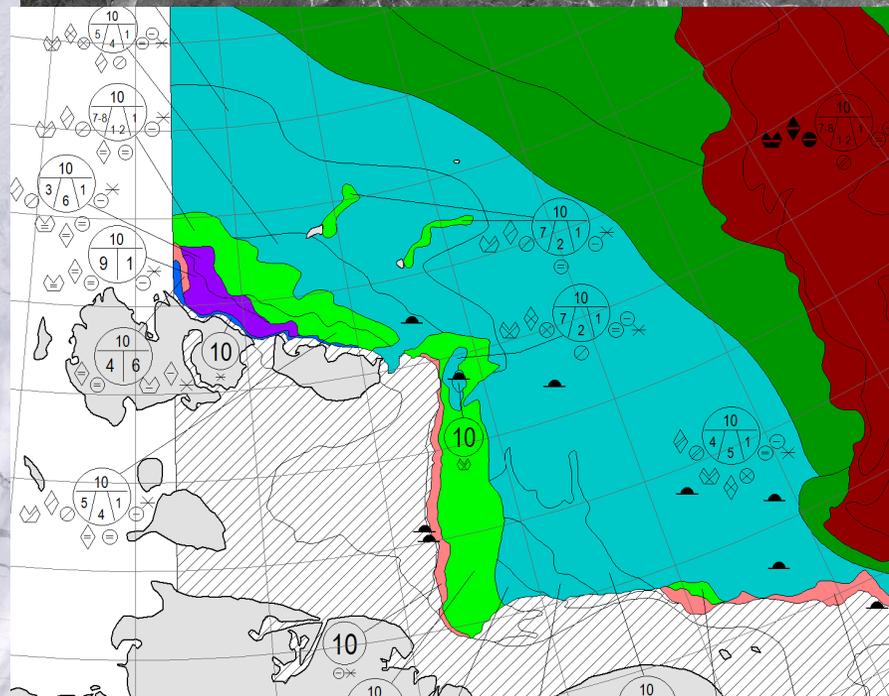
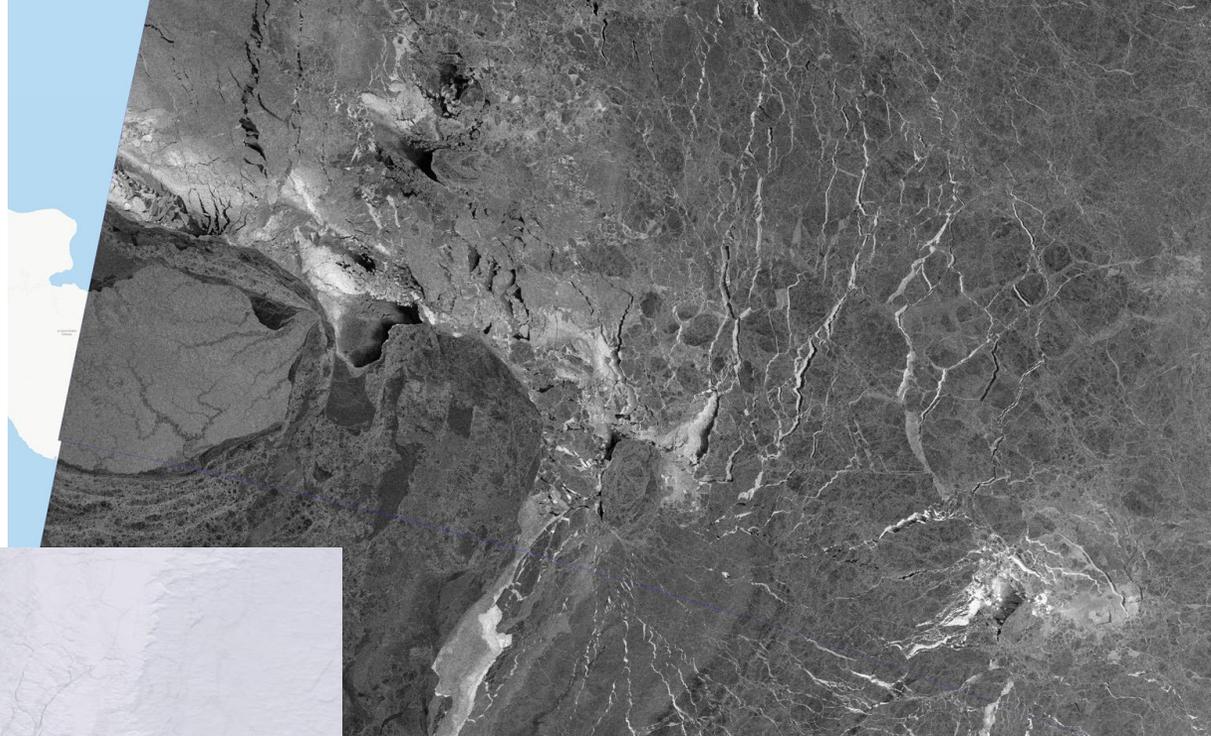


Рис. 1.5.9. Положение стамух в Карском море, 1972–1991 гг.

Опасные ледовые явления Стамухи

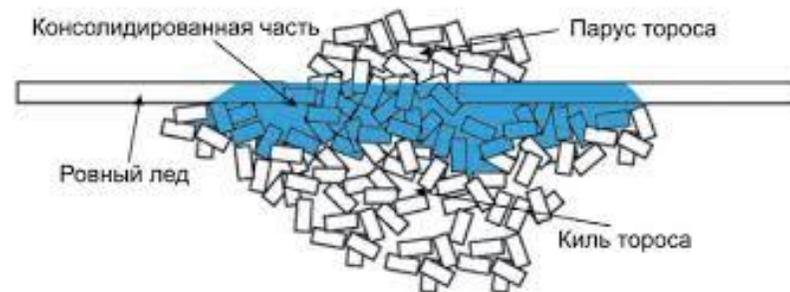
Стамухи на спутниковых снимках -
подозрительные разрежения в
сплоченных льдах, направленные к
глубинам 10-15 метров



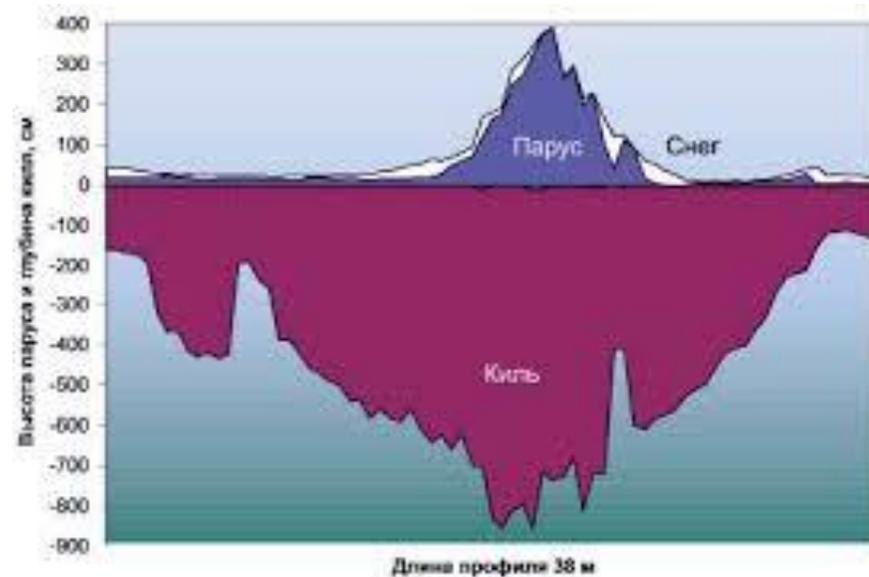
Опасные ледовые явления

Торосы

Особенно сильные сжатия, и, как следствие, гряды торосов возникают при движении льдов с большой скоростью в сторону границы припая и берегов.



Структура тороса
(Наумов М.А., Онищенко Д.А., 2013)

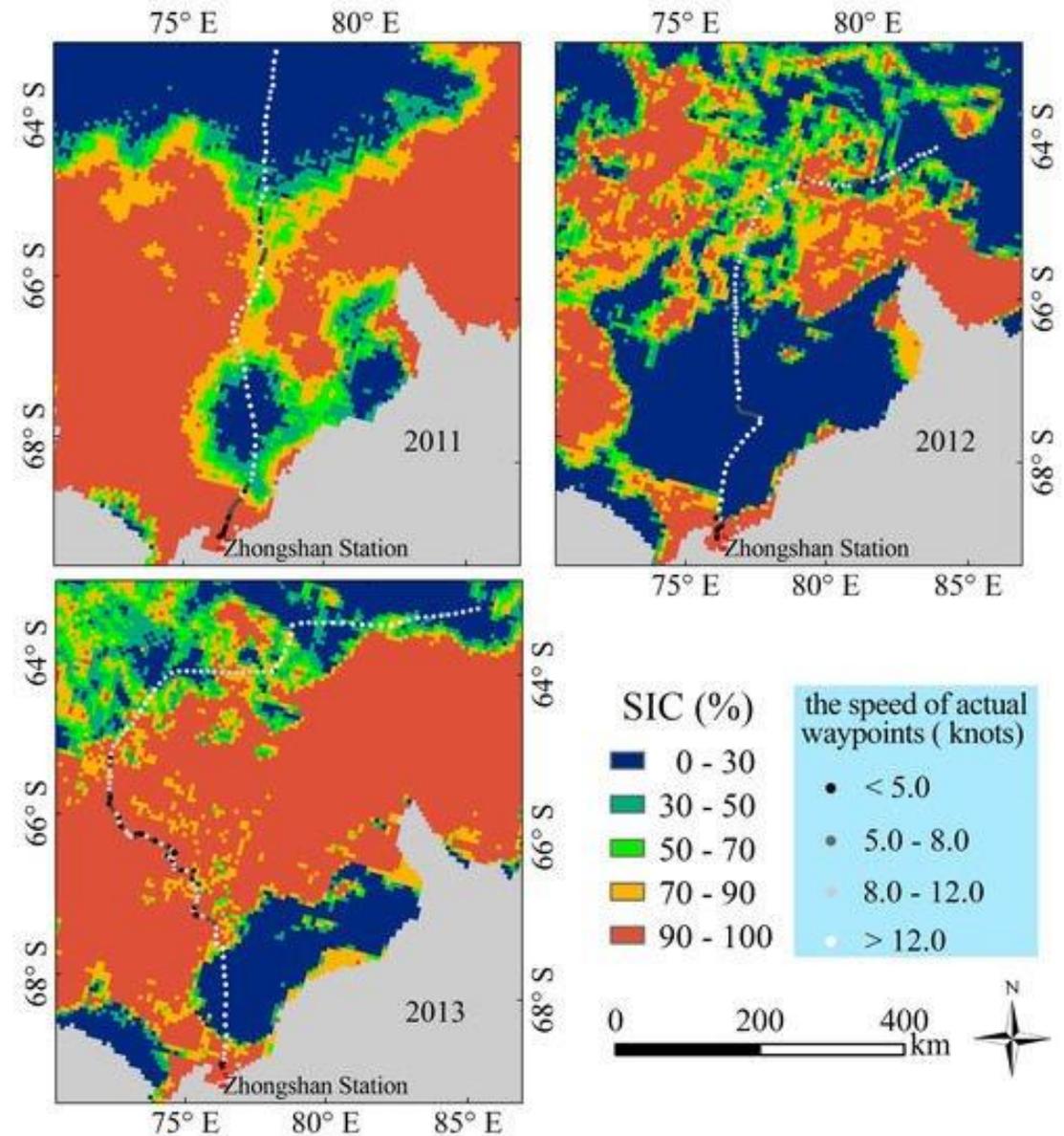


Профиль термобурения тороса многолетнего льда
(Смоляницкий В.М., Писарев С.В., 2013)



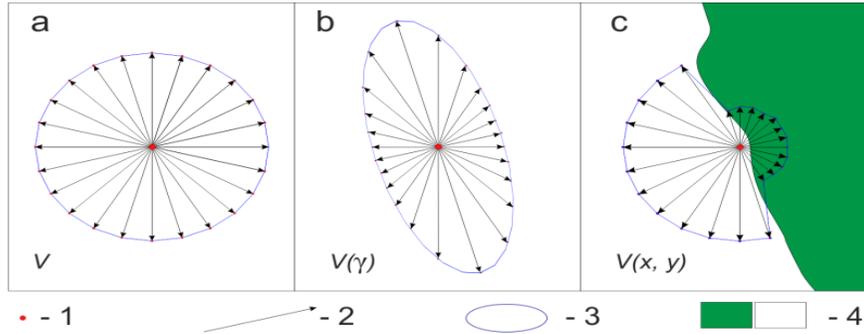
Экспедиция Кара-зима 2015 <https://iz.ru/gallery/8414#>

ВОЗМОЖЕН ЛИ АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ПЛАВАНИЯ?



ЛЕДОВЫЙ АВТОРУТИНГ ААНИИ

Используется волновой метод (метод изохрон).



- 1 – начальная точка,
- 2 - векторы движения судна от начальной точки,
- 3- ребро полигона максимального перемещения судна от начальной точки, 4 - различные ледовые зоны.

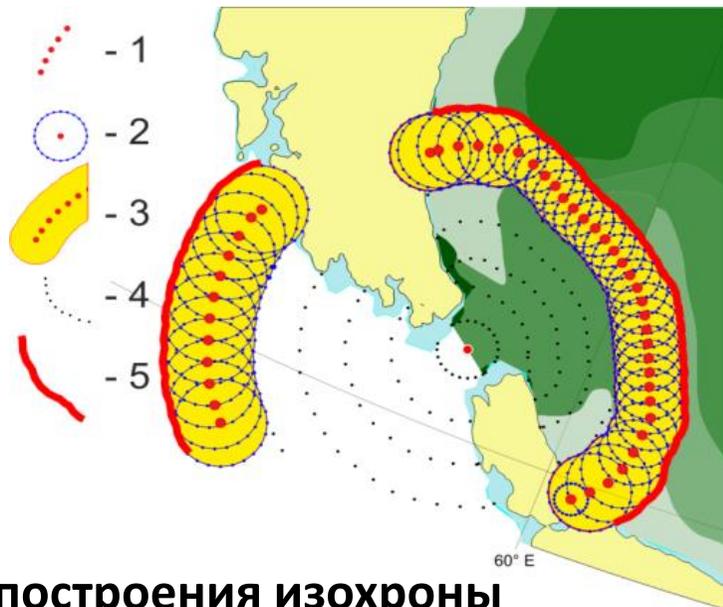
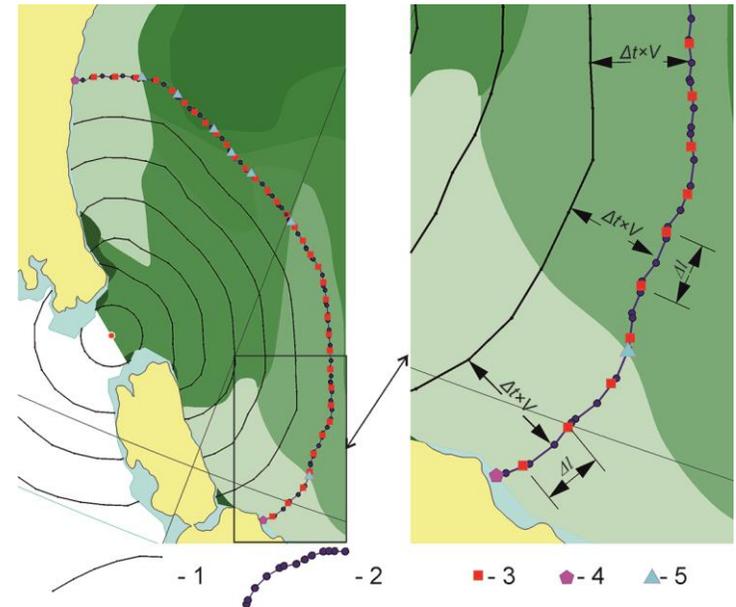


Схема построения изохроны

Полигоны максимального перемещения судна - область возможного на данный момент положения судов, одновременно вышедших из начальной точки.

Изохрона – ребро(грань) полигона максимального перемещения судов.

Расчет линии изохроны происходит следующим образом: по координатам вершин полигона изохроны на предыдущем шаге определяются ледовые зоны, в которых находятся эти вершины, и по характеристикам этой зоны рассчитывается скорость движения судна.



СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ СУДНА ВО ЛЬДАХ (МОДЕЛЬ ФЕДЯКОВА-БУЗУЕВА)

Нахождение оптимального пути, само по себе, является тривиальной математической задачей, в основе которой лежит нетривиальная оценка стоимости элемента пути в зависимости от условий окружающей среды

$$V = f(H_{a,b,c}, C_{a,b,c}, F_{a,b,c}, Rig, Melt, V_{ow}, h_{lim}, N, L, B)$$

где H, C, F толщина, сплоченность и превалирующие горизонтальные размеры трех возрастных градаций льда;

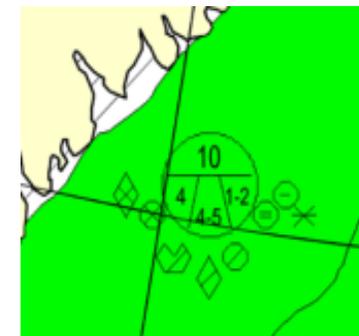
Rig и $Melt$ – торосистость и разрушенность льда.

V_{ow} – техническая скорость движения на чистой воде,

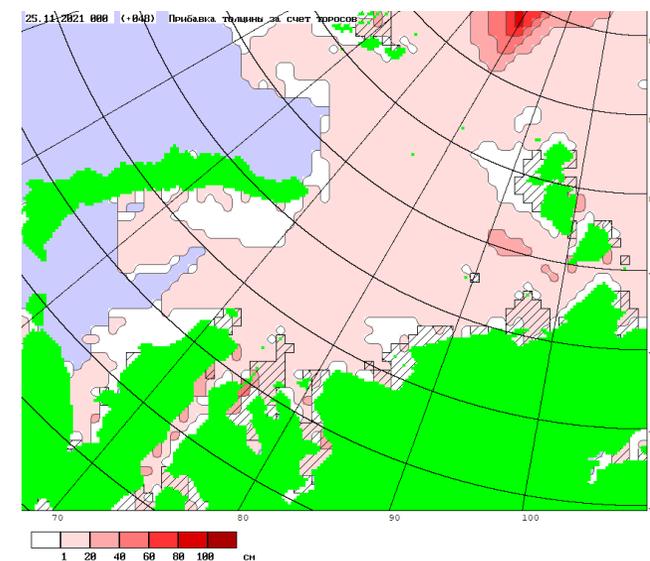
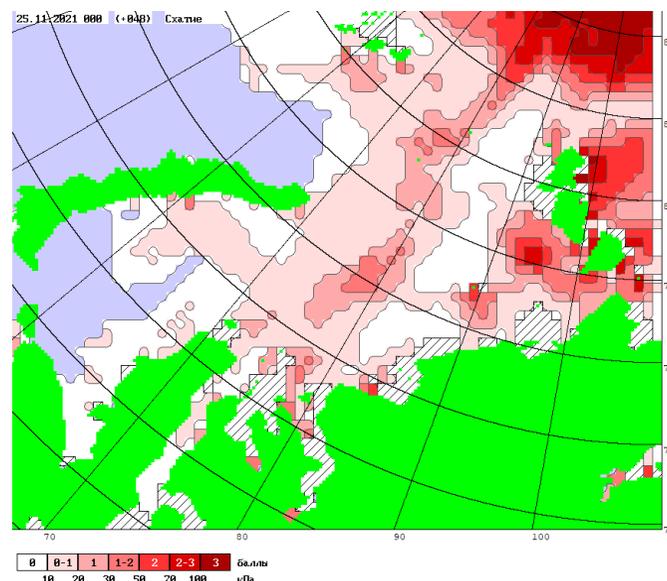
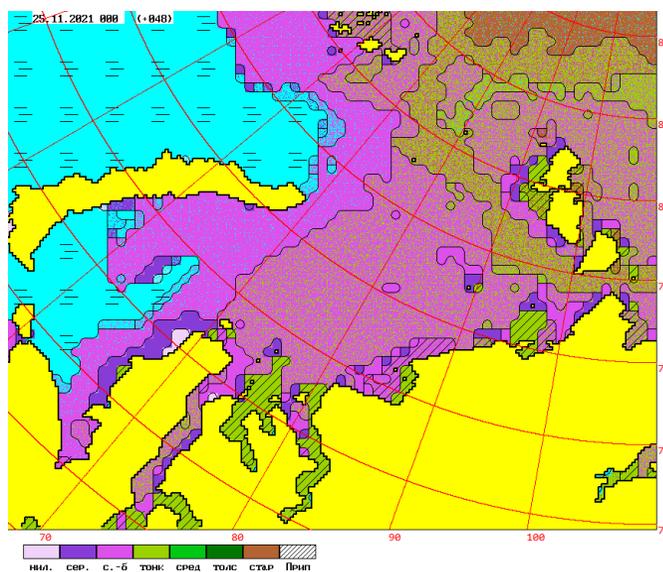
h_{lim} – предельная ледопроездимость судна,

N – мощность силовой установки,

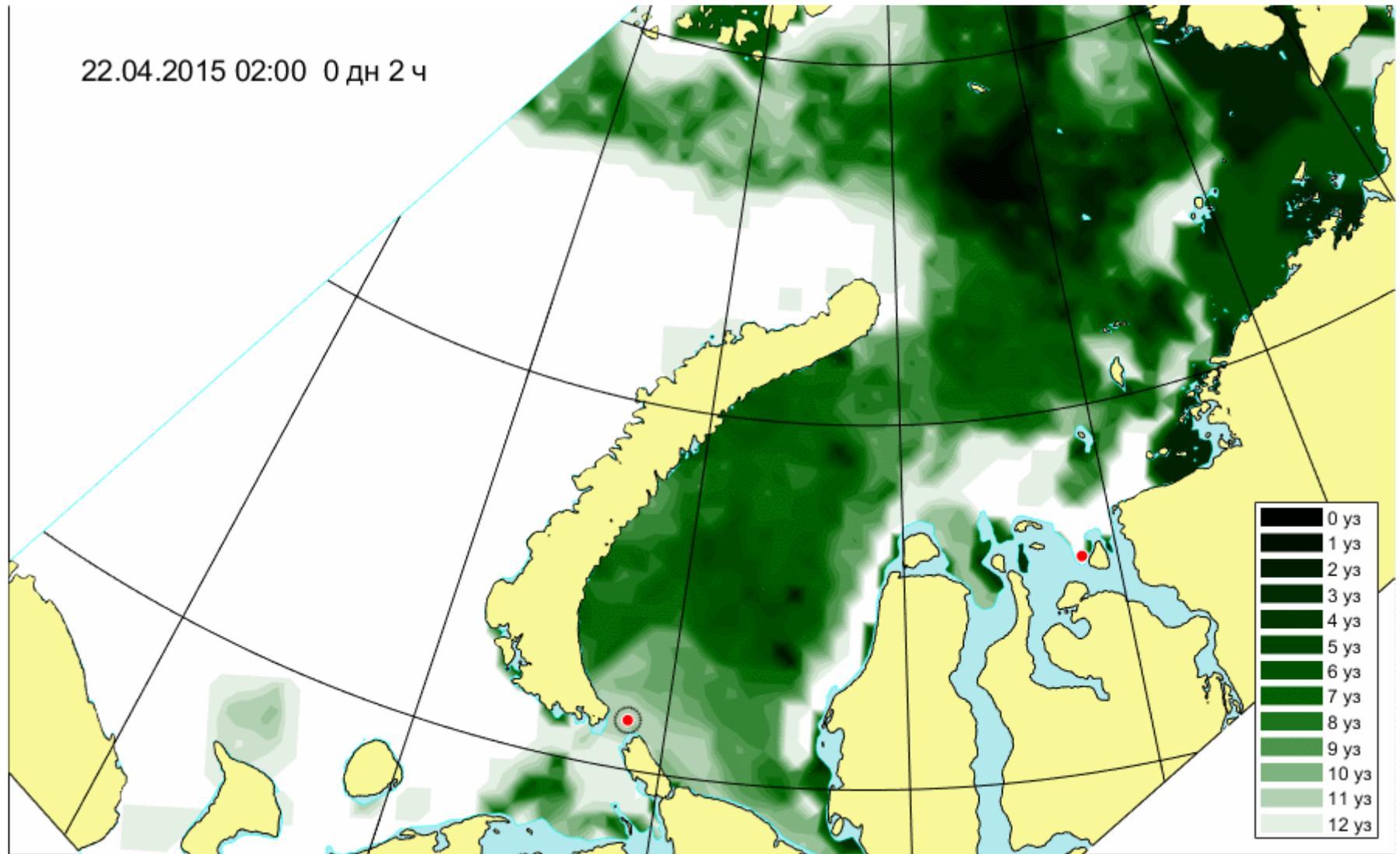
L и B – длина и ширина судна.



ВХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ: КРАТКОСРОЧНЫЕ ЛЕДОВЫЕ ПРОГНОЗЫ



ЛЕДОВЫЙ АВТОРУТИНГ ААНИИ



ЛЕДОВЫЙ АВТОРУТИНГ ААНИИ

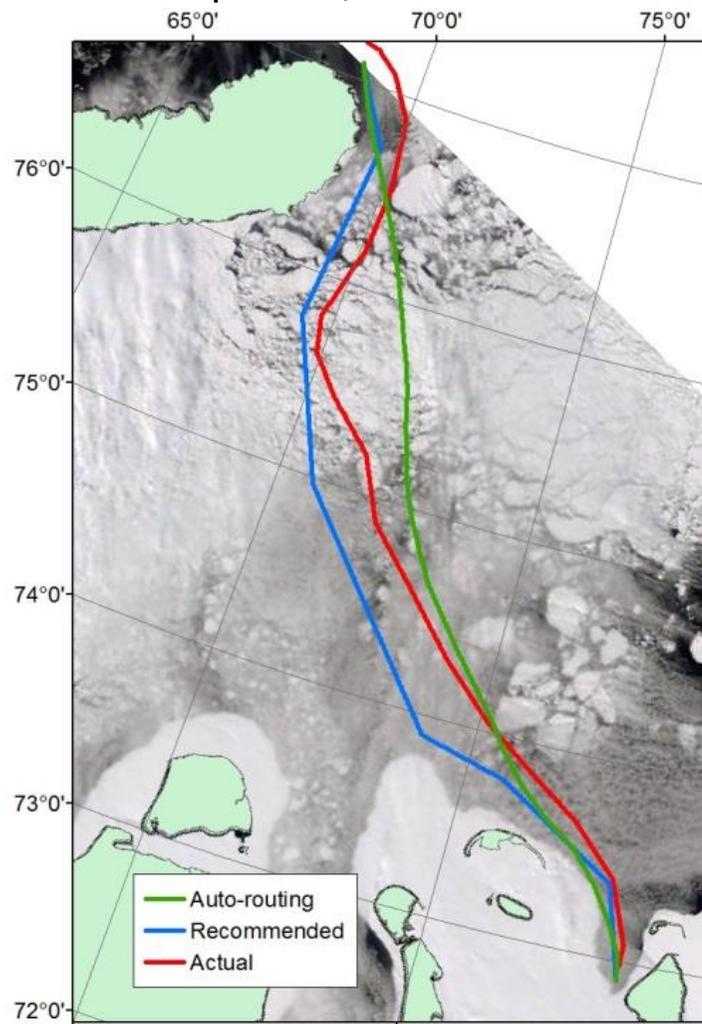
«Енисей», 22-25 апреля 2015 г.



Пример прогона ледового авторутинга ААНИИ по маршрутам плавания судов ледового класса Arc7 в апреле 2015 г.

По модели Федякова-Бузуева прогностические ледовые данные были пересчитаны в скорости движения судна типа «Норильский Никель».

«Заполярный», 29.04-02.05.2015 г.



- ледовый авторутинг ААНИИ
- рекомендованный маршрут
- фактический маршрут

ЭКСПЕРТ

Ежедневный мониторинг гидрометеорологических параметров, глубокое знание режимных особенностей региона, анализ движения судов во льдах по данным АИС и анализ изменения их скорости в зависимости от ледовых условий плавания.

Анализ **текущих и прогностических** океанологических, метеорологических и ледовых данных по спутниковым снимкам и ледовым картам:

1. сплоченность
2. возраст
3. размеры ледяных полей
4. сжатия
5. торосистость
6. конфигурация систем НСЛ (разводий и разрывов).

Определение возможных вариантов маршрутов, автоматический анализ состояния ледяного покрова по каждому выбранному маршруту, расчет скорости движения и общих затрат времени на плавание судна/каравана по каждому варианту плавания.

Выбор оптимального варианта плавания.

АВТОРОУТИНГ

1 Требуется накопление многолетней базы данных и разработка автоматических методов усвоения и анализа данных.

По ледовым картам и расчетным данным:
1. Сплоченность, возраст, размеры ледяных полей.

По расчетным данным:
2 2. Районы сжатий и торосистости.

Необходимы оперативные и прогностические карты:

3. зон нарушения сплошности льда (НСЛ);
4. зон напряженно-деформированного состояния льда (НДСЛ)

3 Автоматически.

4 Экспертная оценка.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛЕДОВОГО РОУТИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Ледовый роутинг

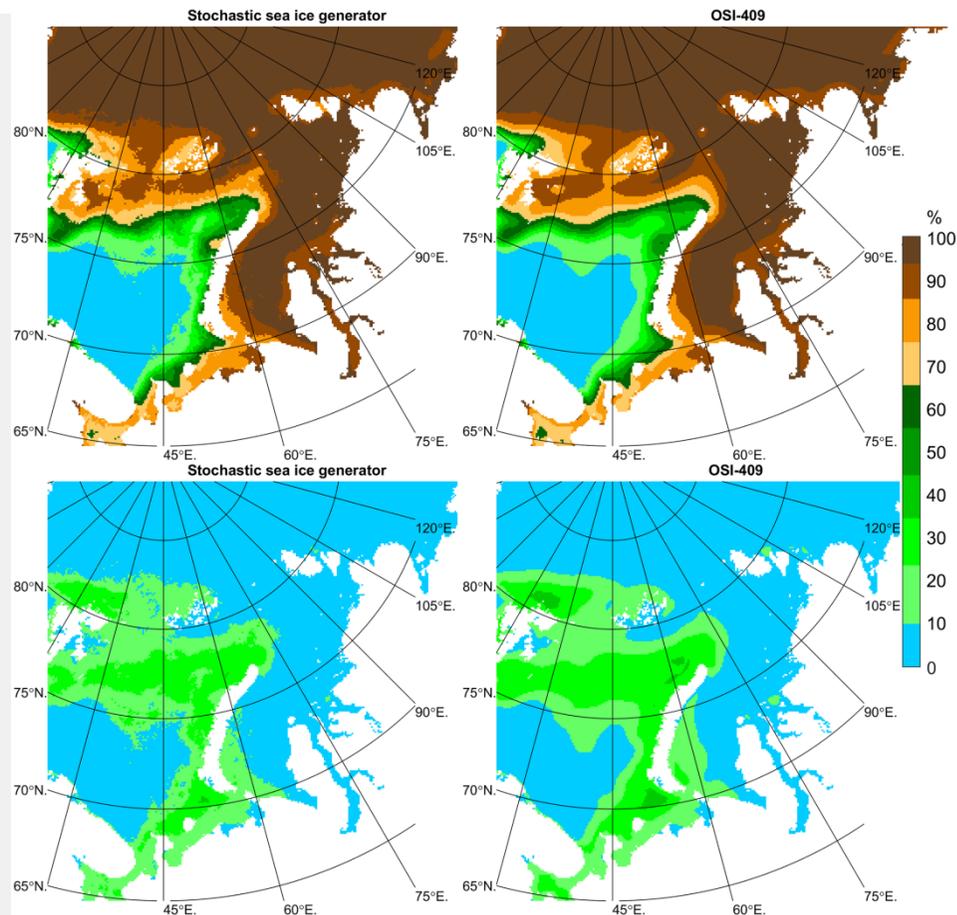
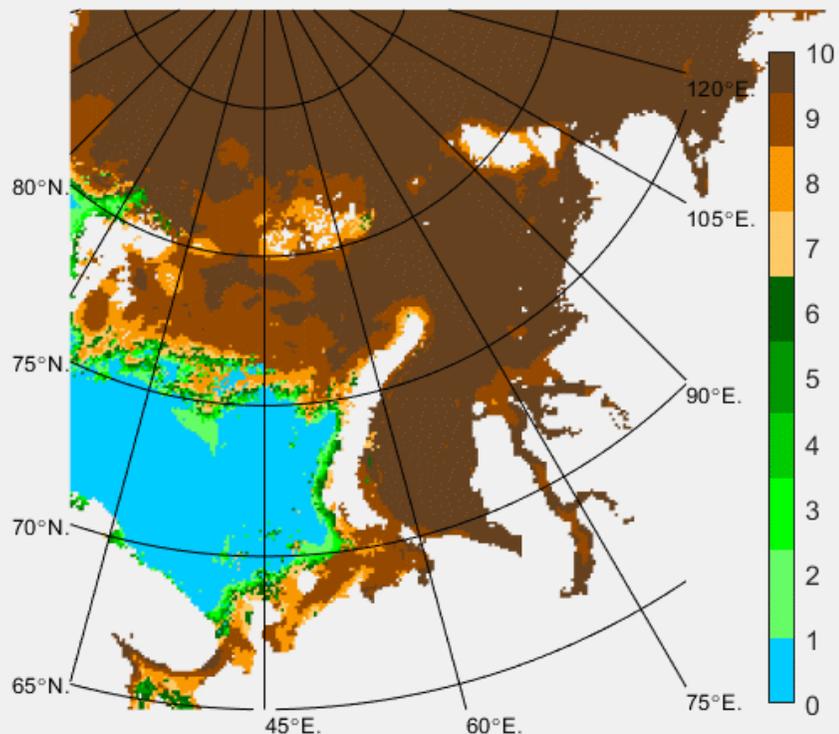
+

Стохастический генератор ледяного покрова

=

Оценка навигационных параметров
методом Монте-Карло

Mar 31 № 1



Среднее и СКО сплоченности в марте по результатам расчета стохастического генератора и данным спутниковых снимков

Пути развития ледового автороутинга:

- 1) Разработка методов автоматизации процессов картирования и прогнозирования нарушений сплошности льда (НСЛ).
- 2) Разработка методов автоматизации процесса картирования и усовершенствования методики прогнозирования зон напряженно-деформированного состояния льда (НДСЛ).
- 3) Расчет взаимосвязи скорости судна с данными по НСЛ и НДСЛ (добавление в модель Федякова-Бузуева).
- 4) Верификация модели на большом числе рейсов для различных регионов и судов различного ледового класса.
- 5) Использование множественного регрессионного анализа для получения эмпирических коэффициентов, связывающих скорость с комплексом ледовых параметров.

Заключение: ледовый автороутинг не рекомендуется применять в Арктике без участия экспертов до тех пор, пока не будет решен вопрос картирования и прогнозирования динамики ледяного покрова.

Путь развития методик выбора оптимального маршрута плавания:

Разработка методов автоматического дешифрирования основных параметров ледяного покрова. Для этого необходимо тесное взаимодействие научных групп различных институтов, специалистов различных специальностей, большое количество натуральных данных из экспедиций и судов.

В настоящее время, пока не выполнено данное условие, нельзя делать ставку на полную автоматизацию выбора оптимального маршрута плавания.