



Скорость движения судна как интегральный показатель ледовых условий плавания

**Виктор Юрьевич Третьяков^{1,2}, Михаил Игоревич Сарафанов³,
Валерий Евгеньевич Федяков², Сергей Викторович Фролов²**



Арктический и Антарктический НИИ

¹ Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² ФГБУ "Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт" (ААНИИ), Санкт-Петербург, Россия

³ ФГБУ "Государственный гидрологический институт" (ГГИ), Санкт-Петербург, Россия



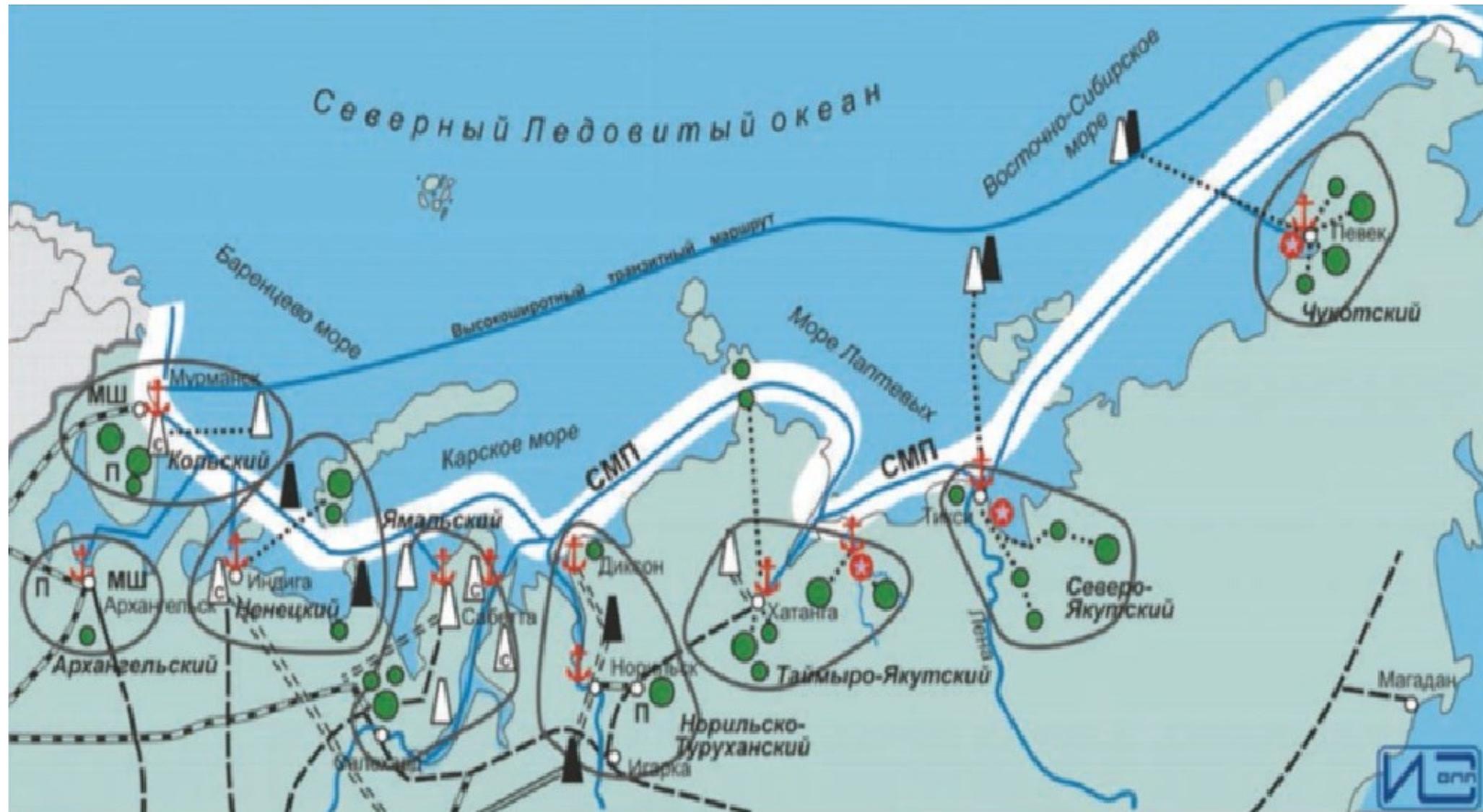
v_yu_tretyakov@mail.ru

В ближайшем будущем ожидается увеличение использования Арктического региона в добыче полезных ископаемых, включая добычу со дна Арктического шельфа, перевозках грузов по трассам Северного Морского пути, включая транзитные перевозки.

Государственные российские программы «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации до 2020 года» с добавлениями вплоть до 2030 года, ”Поддержка национального плана действий по защите морской окружающей среды в Арктике”, “Развитие транспортной инфраструктуры” определяют Арктический регион как «территории опережающего экономического развития». Разумеется, это определение может быть распространено на всю исключительную экономическую зону России в Северном Ледовитом океане. Одной из таких территорий является **Ямал** с заводом по производству сжиженного природного газа в **Сабетте** и многочисленными месторождениями нефти и газа. Другой территорией опережающего экономического развития является **Таймыро-Туруханский** регион с добычей меди, никеля, платины, палладия. Вывоз добытых ресурсов в основном выполняется морем. Опережающее развитие требует улучшения морских транспортных систем Северного морского пути. Арктика является одним из главных субъектов стратегических интересов России. Развитие предполагает **оценку экологической безопасности и условий плавания**, разработку мер по повышению экологической безопасности.



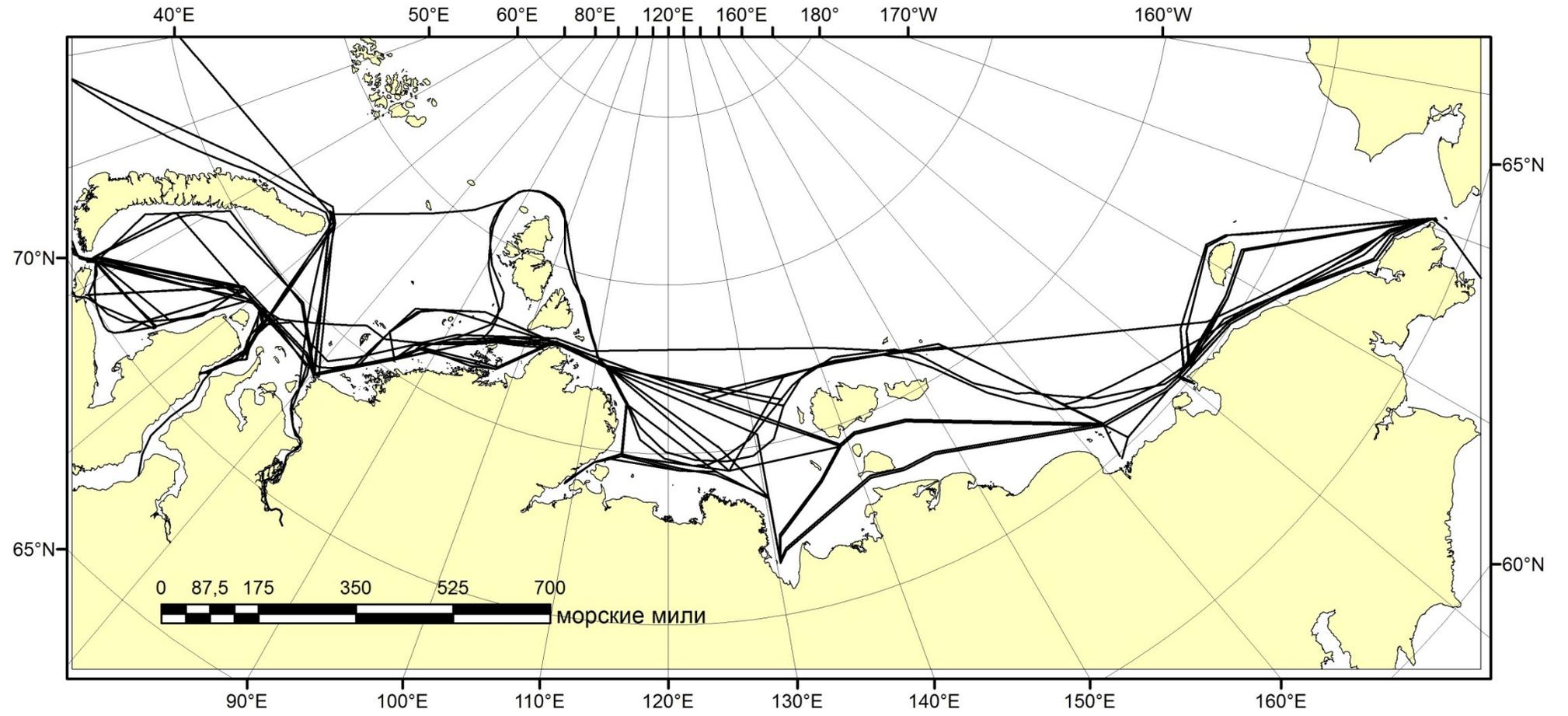
Сабетта



Производственные комплексы Российской Арктики

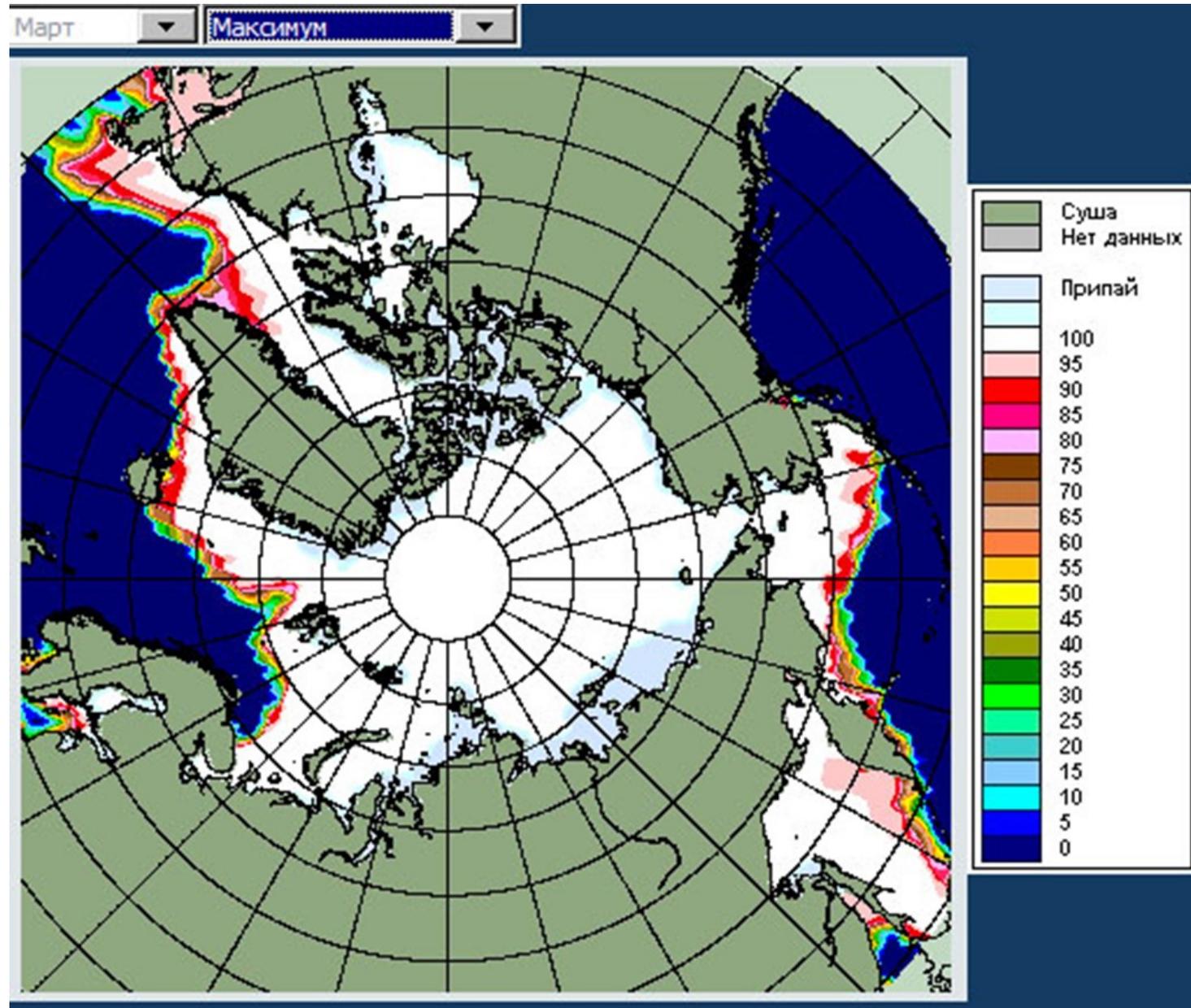
Акватория Северного морского пути



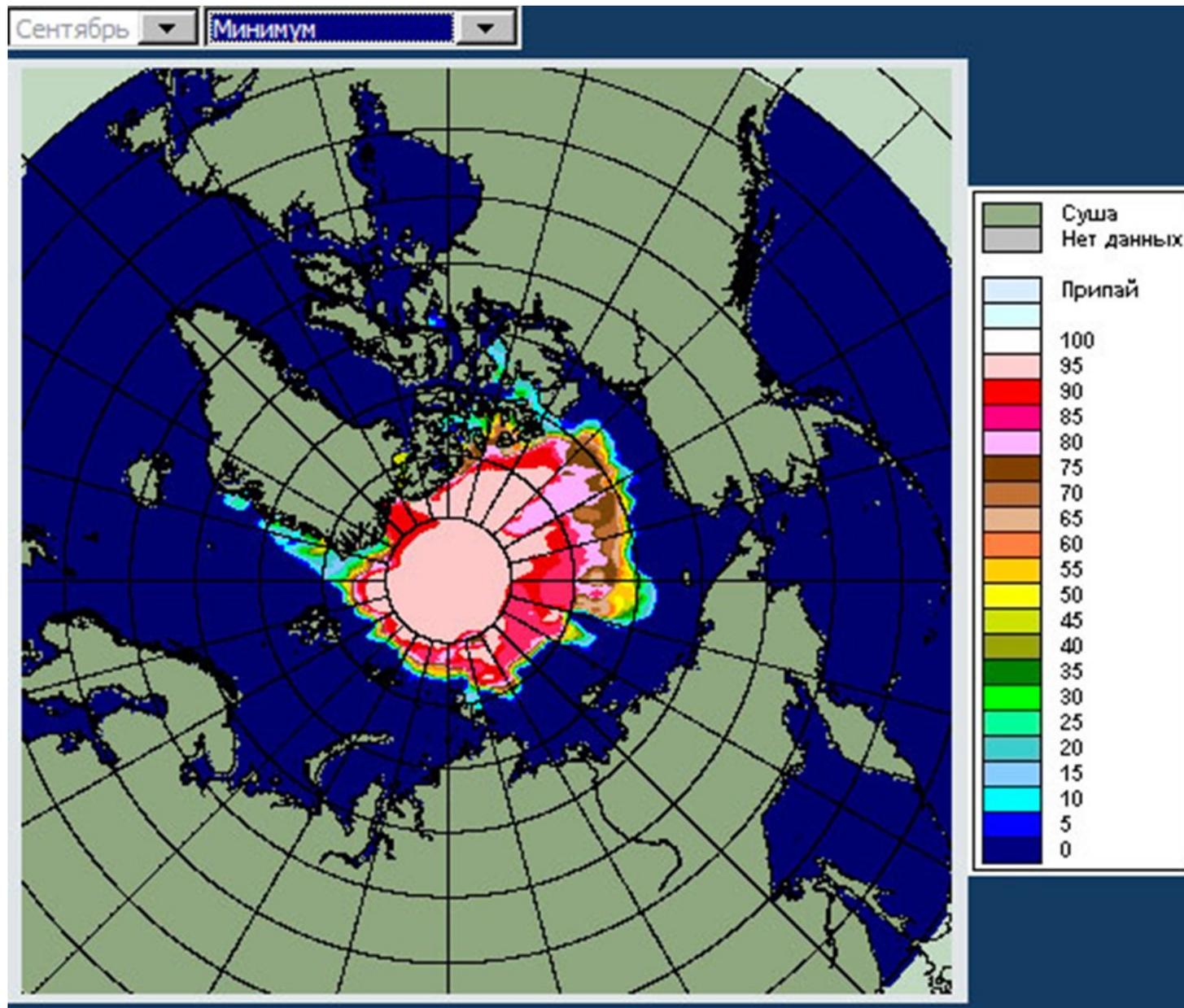


Стандартные трассы Северного Морского пути

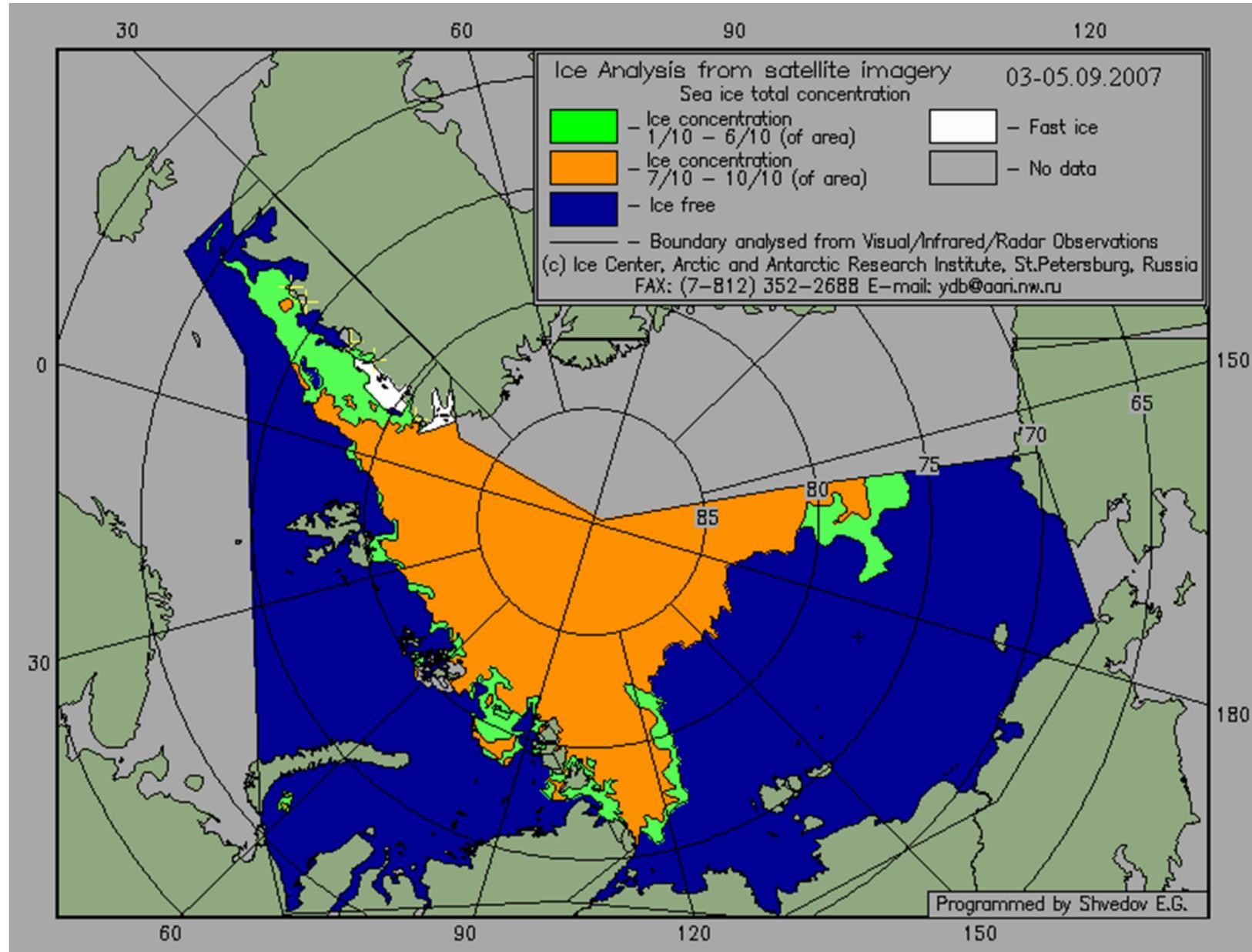
Максимальное распространение морских льдов в марте



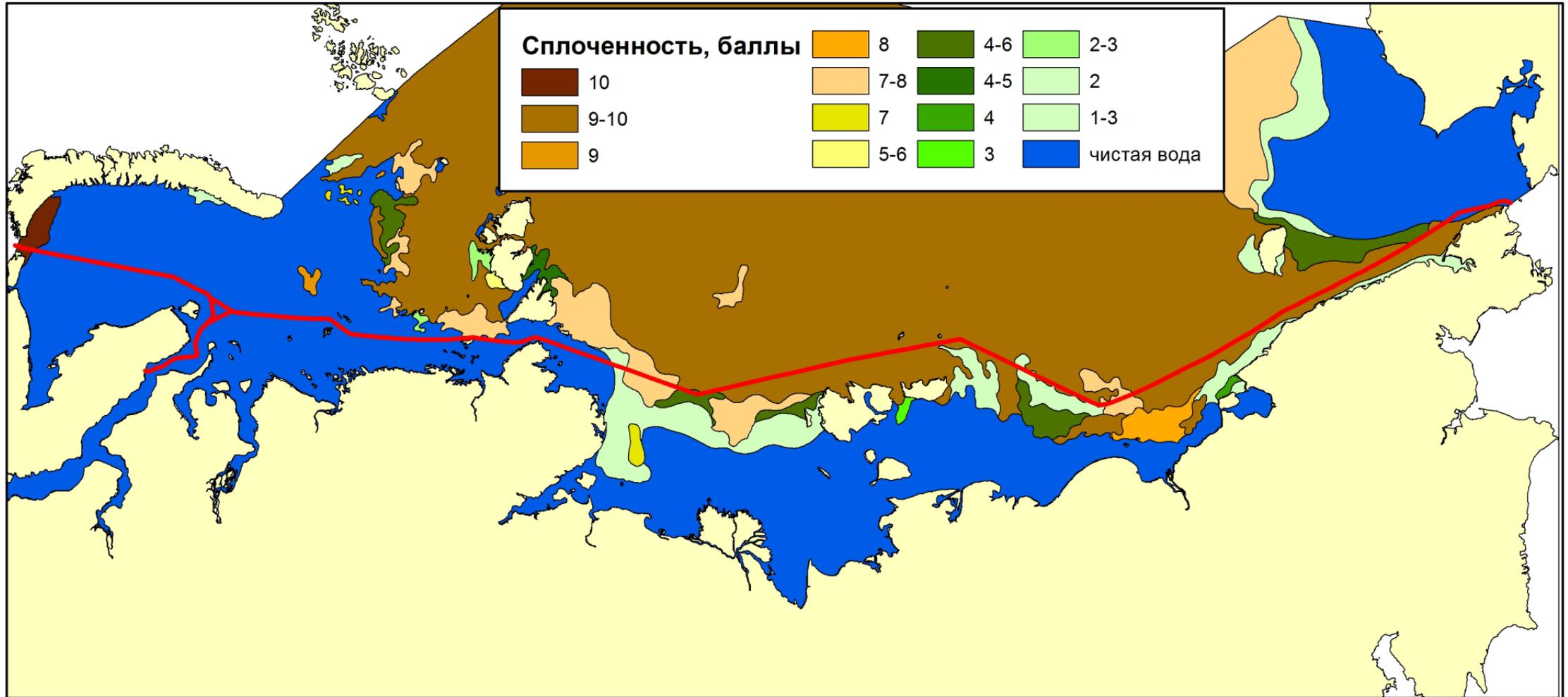
Минимальное распространение морских льдов в сентябре



Минимальное распространение морских льдов в сентябре 2007 года

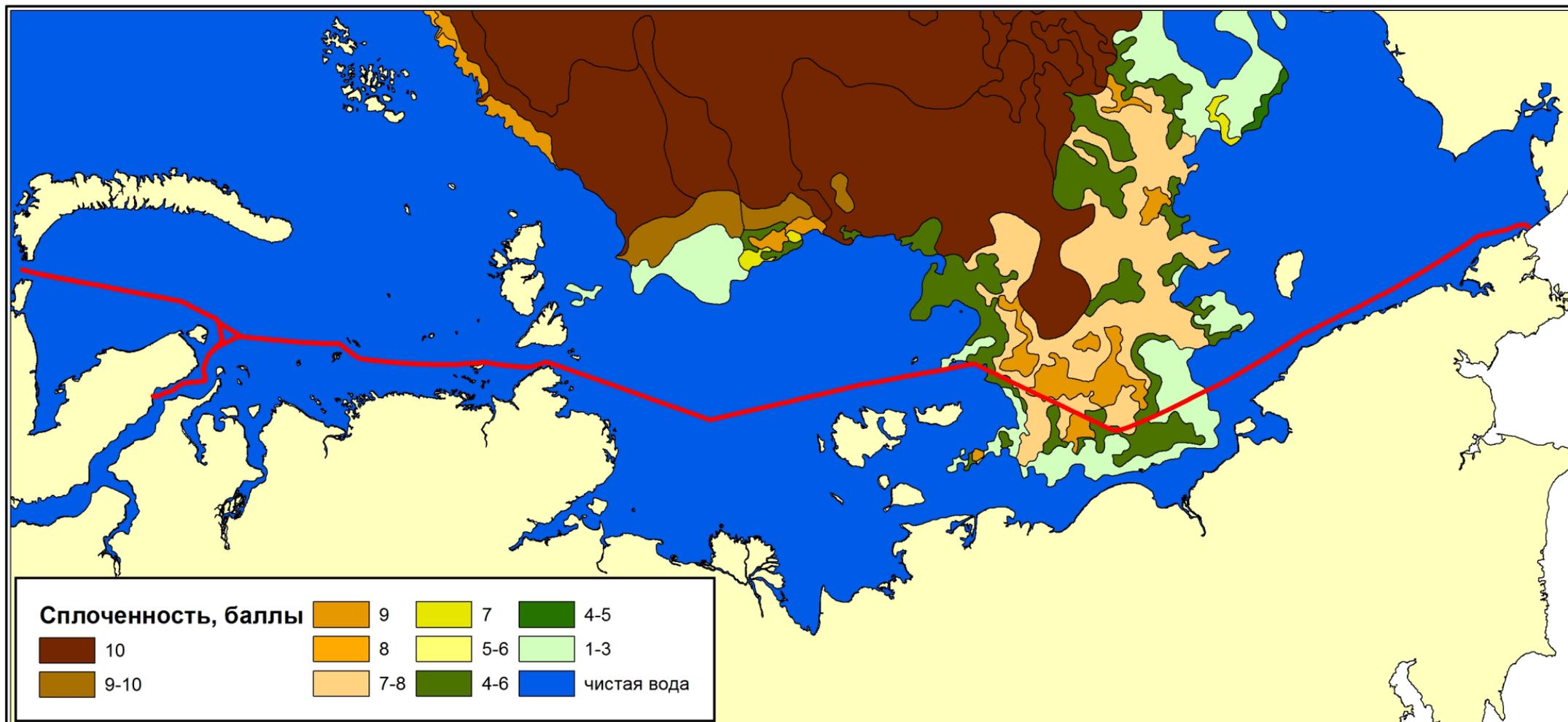


Ледовые условия в первую декаду сентября 1998 года



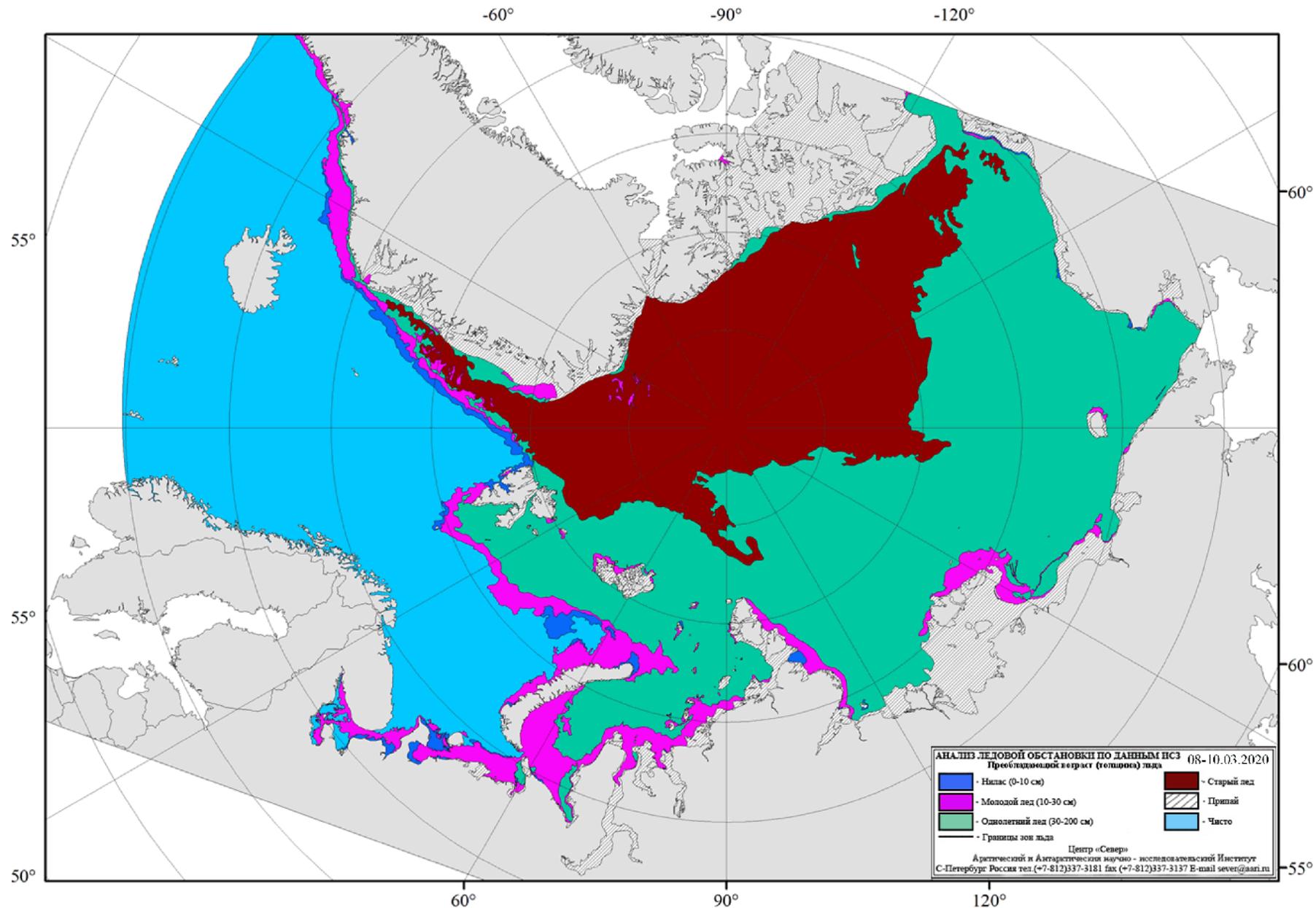
Красные линии – маршруты плаваний современных танкеров-газовозов типа «Ямалмакс» проекта Ямал СПГ

Ледовые условия в первую декаду сентября 2018 года



Красные линии – маршруты плаваний современных танкеров-газовозов типа «Ямалмакс» проекта Ямал СПГ

Обзорная ледовая карта Северного Ледовитого океана на 10.03.2020



Несмотря на наличие изменений ледяного покрова Северного ледовитого океана, не приходится говорить о его скорейшем исчезновении на трассах Северного Морского Пути.

Поэтому необходим мониторинг ледовых условий плаваний по стандартным маршрутам Северного Морского пути. **Средняя скорость плавания** по всему стандартному маршруту и **суммарные временные затраты** плавания могут использоваться как объективные **показатели степени трудности плавания**, вызванной ледовыми условиями. Эти показатели могут рассчитываться с помощью эмпирико-статистической модели. Разумеется, при этом необходимо выполнять численные эксперименты для одного и того же судна.

В Арктическом и антарктическом НИИ (ААНИИ) разработана **эмпирико-статистическая модель** плавания судов во льдах.

Параметрами этой модели служат следующие характеристики ледяного покрова: протяжённости участков маршрута плавания с одинаковыми наборами характеристик ледяного покрова в морских милях; число возрастных градаций ледяного покрова — не более 4-х в пределах однородного участка маршрута; частные концентрации ледяного покрова по возрастным категориям; формы льда (размеры льдин) по возрастным категориям, по одной форме на категорию; толщина льда по возрастным категориям; средняя торосистость льда на участке маршрута; средняя степень разрушенности льда на участке маршрута.

Параметры модели записываются в текстовой файл. В каждой строке записываются характеристики одного однородного участка маршрута.

В Арктическом и антарктическом НИИ разработана методика использования Архива векторных ледовых карт ААНИИ для подготовки исходных данных для модели. Обработка исходных шейпфайлов ледовых карт выполняется в ArcGIS с помощью специально разработанных компьютерных программ на языке Python. Обработка включает в себя:

- Перепроецирование** исходных слоёв ледовой информации из географической системы координат в декартову;
- Удаление** пустых полей в атрибутивных таблицах перепроецированных слоёв ледовой информации;
- Объединение** перепроецированных слоёв ледовой информации по разным морям;
- Оверлейную операцию пересечения** объединённого слоя ледовой информации и слоя буферной зоны общей шириной 20 км вокруг стандартного маршрута плаваний (10 км в обе стороны от линии маршрута) с созданием слоя участков однородных ледовых зон в пределах буферной зоны;
- Удаление** всех возможных пространственных дубликатов в слое результата пересечения;
- Объединение** пространственных объектов в слое ледовых зон в пределах буферной зоны, имеющих одинаковыми значения всех характеристик ледяного покрова;
- Расчёт** площадей пространственных объектов слоя ледовых зон в пределах буферной зоны;
- Расчёт** отношений площадей пространственных объектов этого слоя к общей площади буферной зоны;

Расчёт произведений протяжённости маршрута на доли площадей пространственных объектов от общей площади буферной зоны. Результаты представляют собой средние значения суммарных протяжённостей участков маршрута плавания во льдах определённого типа;

Расчёты частных концентраций льдов по возрастным градациям;

Определение форм льда (размеров льдин) по возрастным градациям;

Добавление в таблицу атрибутов слоя текстового поля и его заполнение последовательностями из не более чем 4-х значений частных концентраций возрастных градаций льда. Преобразованные из числовых величин в текстовые значения частные концентрации подразделяются символами пробелов. В случае большего числа возрастных градаций записываются частные концентрации льдов 3-х самых возрастных градаций, начиная с самой возрастной, т.е. льда максимальной толщины. Частные концентрации остальных возрастных градаций льда объединяются;

Формирование списков кодов не более чем 4-х форм льда: по одному на каждую возрастную градацию льда. При этом выполняется перекодировка с помощью разработанной на языке Python программы, т.к. коды форм льда в текстовом файле исходных данных для эмпирико-статистической модели расчётов скорости движения судов во льдах не совпадают с кодами форм льда в атрибутивных таблицах векторных слоёв ледовых карт. В случае наличия нескольких форм льда у одной возрастной градации берётся форма с наибольшими размерами льдин. В случае присутствия полей и обломков полей записывается специальный символ. Для ниласов и начальных льдов в качестве формы льдов берутся обломки полей и крупнобитый лёд.

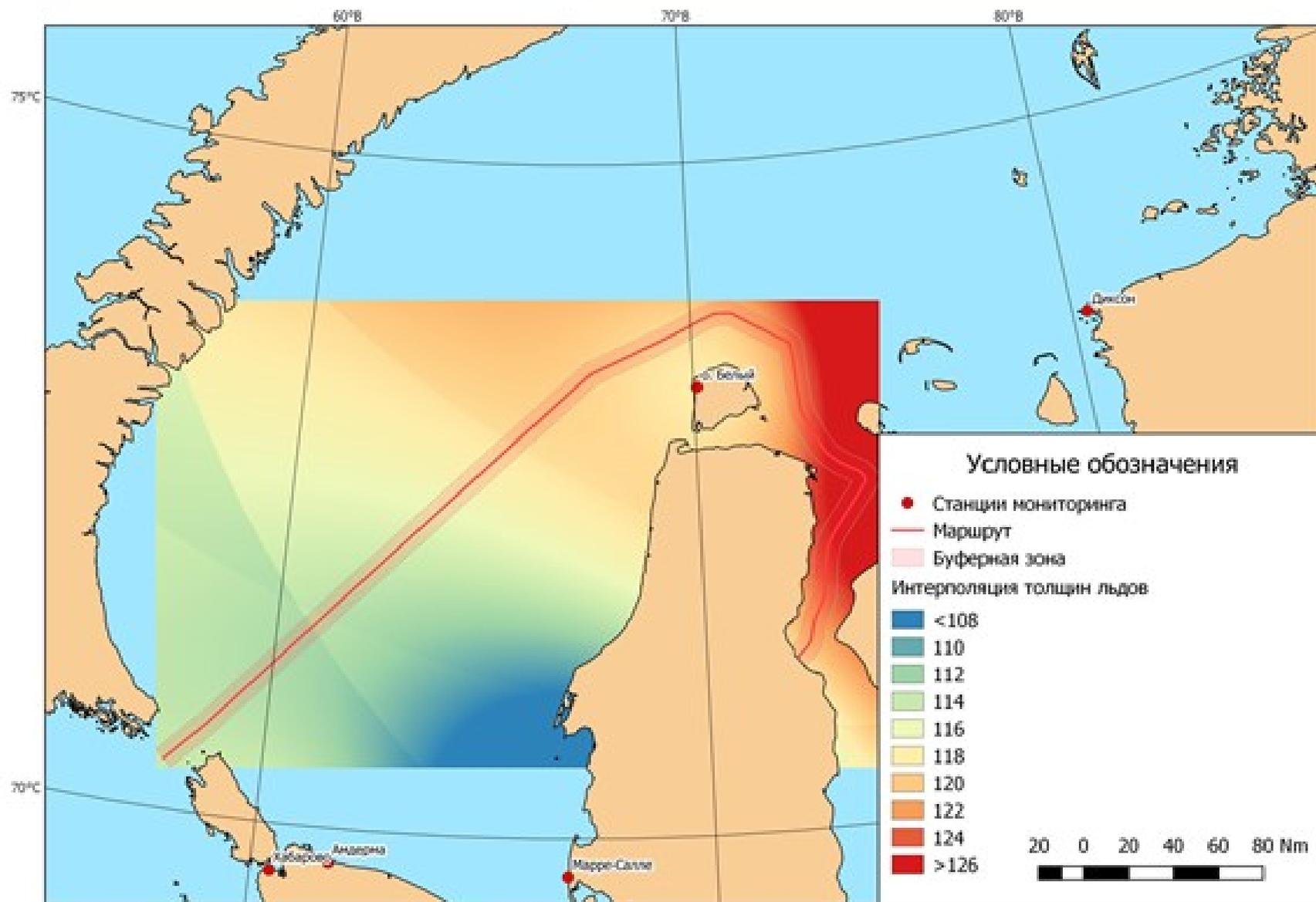
Создание и заполнение строкового поля последовательностей символов не более чем 4-х форм льда по возрастным градациям, начиная с категории льдов максимальной толщины. В случае наличия более чем 4-х возрастных категорий льдов в последовательность кодов форм льда записываются коды 3-х самых возрастных категорий, а из форм льдов остальных возрастных категорий выбирается форма с максимальными размерами льдин;

Определение толщины льда в сантиметрах по возрастным градациям льдов. Для градаций, не являющихся самыми возрастными в данной ледовой зоне берётся середина диапазона толщины, например, для тонких однолетних льдов это $50 \text{ см} (30 + (70-30) / 2)$. Предполагается равномерное распределение толщины льдов всех возрастных градаций. Для возрастной градации льдов с максимальной толщиной в данной ледовой зоне определяется максимальная возможная толщина льда в предположении роста льда с самого начала осеннего ледообразования. Для определения этой величины выполняется интерполяция значений толщины припая по данным её мониторинга на гидрометеорологических станциях. При этом в случае суровой зимы нарастание толщины дрейфующих льдов запаздывает по сравнению с толщиной припая на 2 декады, в случае умеренной – на 3 декады, а во время мягкой зимы – на 4 декады. Определение типа зимы выполняется по суммам градусо-дней мороза после устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C по данным станций Гидрометслужбы (ГМС). Ввиду незначительного числа станций мониторинга интерполяция выполняется методом IDW только в пределах буферной зоны маршрута плаваний.

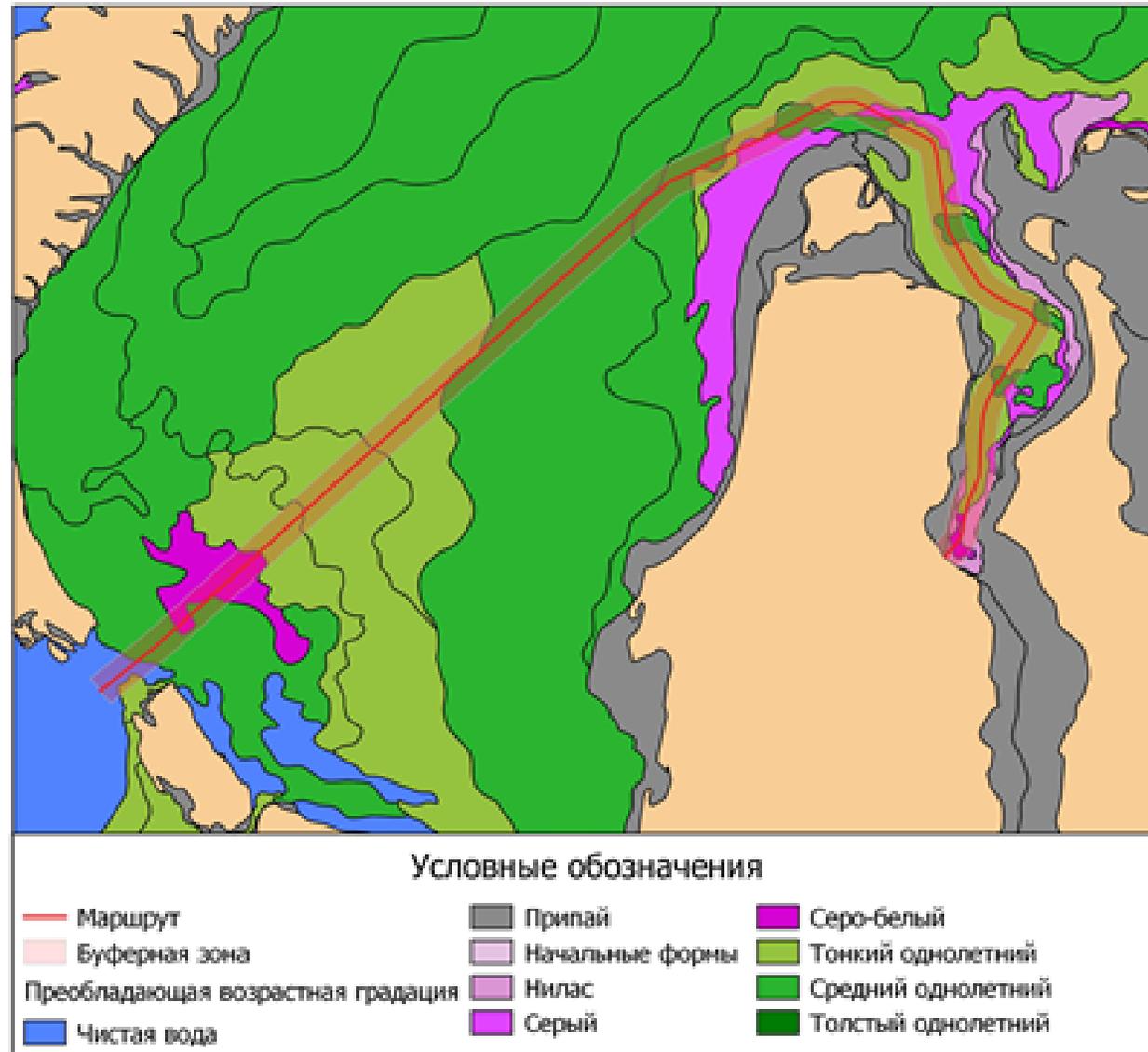
Схема станций мониторинга толщины льда в Карском море в апреле 2019 года



Результат интерполяции толщины льда по данным первой декады апреля 2019 года



Ледовая обстановка в юго-западной части Карского моря в первую декаду мая 2019 года, маршрут плаваний «Сабетта – Карские Ворота» и буферная зона вокруг него



Если часть буферной зоны находится в припае, то интерполяция выполняется дважды: для определения максимальной толщины участков припая и дрейфующих льдов.

В первом случае интерполяция выполняется по данным мониторинга толщины льда, относящимся к той же декаде, что и декада дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Во втором случае в качестве исходных данных используются толщины припая на станциях мониторинга, измеренные ранее на время запаздывания, зависящее от степени суровости зимы. При интерполяциях используются маски: в первом случае это участки припая внутри буферной зоны, во втором – участки дрейфующих льдов. Затем выполняется **зональная статистика** слоя (слоёв) результата интерполяции по пространственным объектам слоя ледовых зон внутри буферной зоны с определением максимального и среднего значения толщины льда в каждой ледовой зоне. Это параметры льда, который образовался в начале льдообразования и нарастал в этой зоне. Разумеется, такой подход не учитывает возможный дрейф льда, но предполагается равная вероятность приноса в эту зону льдов как с большей, так и с меньшей толщиной. Такой подход позволяет учитывать **динамику толщины льда** в течение осенне-зимнего периода.

В качестве значения толщины льда самой возрастной градации берётся середина диапазона нижнего значения данной градации и максимальной толщины льда по результатам интерполяции. Если верхняя граница диапазона толщины самой возрастной градации в ледовой зоне меньше, чем максимальная толщина льда по результатам интерполяции, то в качестве толщины льда берётся середина диапазона толщины льда этой возрастной градации;

Создание и заполнение строкового поля последовательности значений толщины льда по возрастным градациям. В случае наличия более 4-х возрастных категорий льдов толщины льдов 3-х самых возрастных градаций определяются описанным выше способом. Льды остальных возрастных категорий объединяются, их средняя толщина рассчитывается по серединам соответствующих диапазонов с учётом частных концентраций этих категорий;

Создание и заполнение строкового поля данных для импорта в модель расчёта скорости движения судна во льдах и времени прохождения участков маршрута. Отдельные обозначения разделяются символом пробела. Данные, относящиеся к каждому типу льдов в пределах буферной зоны маршрута, записываются в отдельную запись таблицы атрибутов. Данные включают себя следующую последовательность: протяжённость участка маршрута в морских милях, число возрастных градаций льдов, частные концентрации льда по градациям, начиная со льдов максимальной толщины, коды форм льда по градациям, толщины льда в сантиметрах по градациям, торосистость льда, степень его разрушенности. Торосистость задаётся одинаковой для всего маршрута на основании осреднения результатов многолетних исследований.

Разрушенность льда отлична от нуля только в летние месяцы;

Завершающей стадией обработки данных в среде ArcGIS является **Экспорт значений** строкового поля данных в отдельный текстовый файл.

Структура текстового файла с данными для эмпирико-статистической модели

```
23.2 4 1.667 3.333 4.0 1.0 2 4 4 4 95 50 23 8 1 0 6666
8.8 4 2.333 4.667 2.0 1.0 2 4 4 4 134 95 50 15 1 0 6666
66.0 4 7.5 1.5 0.333 0.667 3 4 4 4 146 95 23 8 1 0 6666
168.7 4 9.0 0.5 0.167 0.333 3 4 4 4 138 95 23 8 1 0 6666
46.1 4 1.5 3.0 3.0 2.0 2 4 4 4 134 95 50 15 1 0 6666
0.8 1 10.0 0 171 1 0 6666
166.1 1 10.0 0 172 1 0 6666
36.8 0 6666
7777
```

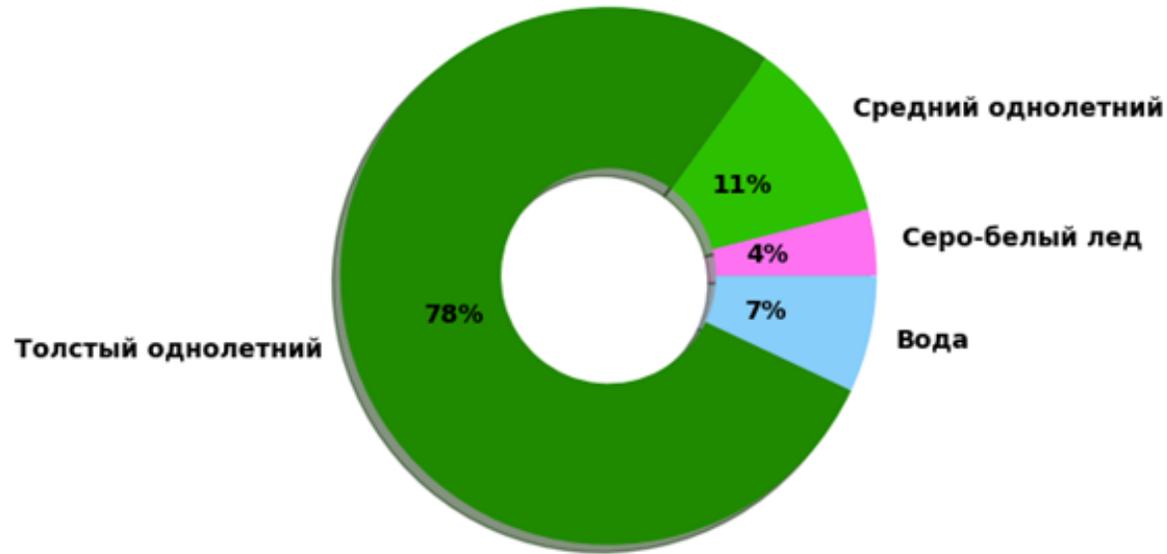
Следующим шагом исследования является выполнение расчётов на эмпирико-статистической модели движения судов во льдах.

Результаты

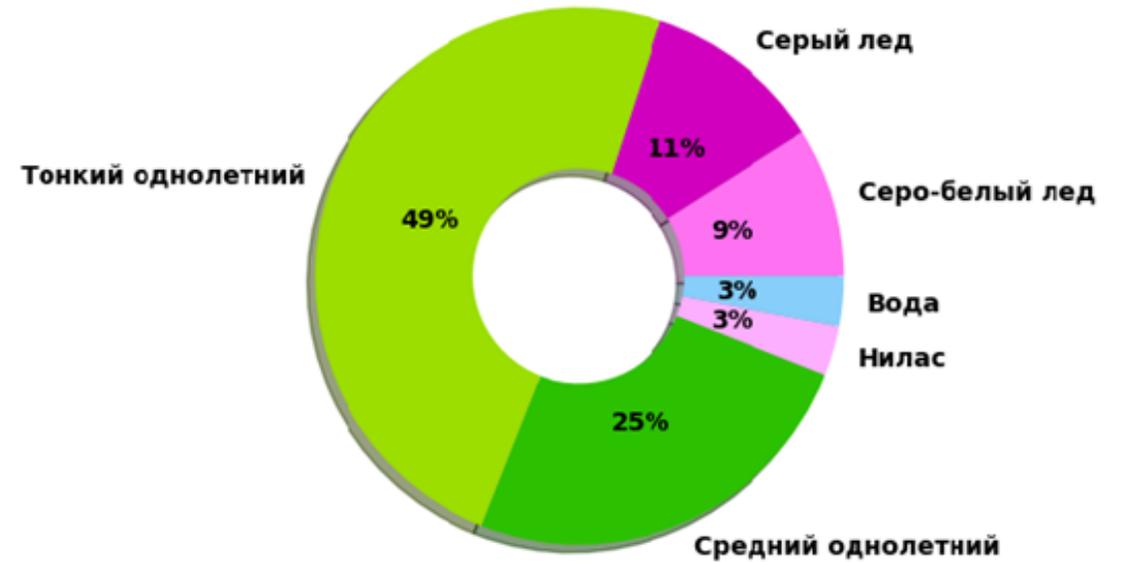
Ледовые карты из архива ААНИИ могут служить объективным источником данных для исследований межгодовой динамики ледовой ситуации и ледовых условий плавания в Северном Ледовитом океане и замерзающих морях. Эмпирико-статистическая модель может использоваться в качестве инструмента для расчётов наиболее объективных показателей ледовых условий плавания: **средней скорости плавания** судна по всему стандартному маршруту и **суммарного времени** этого плавания.

Сравнение результатов численных экспериментов с моделью с имитацией плаваний атомного ледокола «Арктика» по маршруту «порт Сабетта – Карские Ворота» в первые декады мая 1998 и 2019 гг. показало существенное улучшение условий плавания. Так, средняя скорость плавания по результатам моделирования условий 1998 года составляет 6.9 узлов (морских миль в час), а эта же характеристика при имитации условий 2019 года равна 14.9 узла. Также есть значительное уменьшение суммарной величины затрат времени на прохождение маршрута: с 74.5 часов в 1998 году до 34.8 часов в 2019 году. Добавление в качестве дополнительного условия сжатия судна дрейфующими льдами не изменяет этого соотношения между значениями скоростей и затрат времени. Так, в этом случае при сжатии силой в 1 балл по российской трёхбалльной шкале средняя скорость в условиях 1998 года равна 6.7 узлов, а при условиях 2019 года – 14.5 узлов. Суммарные затраты времени плавания снижаются с 77.7 часов в 1998 году до 35.6 часов в 2019 году.

Это можно объяснить обнаруженным существенным изменением пространственного распределения льдов разных возрастных категорий в буферной зоне маршрута плаваний с 1998 по 2019 гг.



Распределение льдов различных возрастных категорий в буферной зоне маршрута в первую декаду мая 1998 года



Распределение льдов различных возрастных категорий в буферной зоне маршрута в первую декаду мая 2019 года

Очевидно исчезновение толстых однолетних льдов!



Тонкий однолетний лёд



Однолетний лёд средней толщины



Толстый однолетний лёд

Исследование выявило существенные возможности эмпирико-статистической модели для исследований климатических изменений. Средняя скорость плаваний по маршрутам Северного морского пути и суммарные затраты времени на эти плавания могут использоваться в качестве обобщающих показателей климатических изменений в Северном Ледовитом океане и замерзающих морях. Разумеется, эта модель не учитывает все факторы, которые влияют на ледовое плавание. Например, она не принимает во внимание трещины, разводья, полыньи в ледяном покрове. Тем не менее числовые ряды нормализованных относительных значений скорости и затрат времени могут исследоваться для проверки их разнородности с помощью разнообразных критериев однородности.

Это исследование выполнено в рамках государственной бюджетной темы ЦНТП 5.1.2. «Развитие существующих и разработка новых методов и технологий долгосрочного (месячного и сезонного) прогнозирования элементов ледово-гидрологического режима арктических морей, низовьев и устьевых областей рек в условиях климатических изменений».

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!