



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанологии ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

**«ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ ПО
ТРАССЕ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ В КАРСКОМ МОРЕ И
МОРЕ ЛАПТЕВЫХ ПО МНОГОЗОНАЛЬНЫМ СПУТНИКОВЫМ
ДАНЫМ»**

Исполнитель: Ананьева Анна Андреевна, студентка группы ПО-М18-1-8

Научный руководитель: д.г.н., профессор, Аверкиев Александр Сергеевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

(ученая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт-Петербург

2020

Содержание

Введение	3
1 Физико–географическое описание Карского моря и моря Лаптевых	5
1.1 Географическое положение Карского моря	5
1.2 Климат Карского моря	6
1.3 Характеристика ледяного покрова Карского моря	8
1.4 Географическое описание моря Лаптевых	15
1.5 Климат моря Лаптевых	16
1.6 Характеристика ледяного покрова моря Лаптевых	17
2 Методы исследования и обработки исходных данных	22
2.1 Спутниковые системы, используемые в работе	22
2.2 Описание методов обработки информации	26
3 Анализ основных судоходных путей по трассе Северного морского пути в исследуемых морях	31
3.1 Опасные ледовые явления и ледяные образования	31
3.2 Технологии составления навигационных рекомендаций с использованием спутниковой информации	39
4 Исследование возможных путей для судоходства в Карском море и море Лаптевых по подготовленным картам ледовой обстановки	50
Список используемых источников	67

Введение

Актуальность для судоходства. В настоящее время, одной из интересующих зон для обеспечения судоходства является Арктический регион. В период изменения климата данный район подвергается существенному притоку тепла со стороны Атлантического океана, в период современного изменения это влияние усиливается. Полученный эффект проявляется в изменении взаимодействия океана с атмосферой, что в итоге приводит к труднопредсказуемым последствиям. В весенне–летний период, который исследуется в работе, происходит освобождение ото льда морской поверхности, что сопровождается отдельными процессами в ледяных полях, которые следует тщательно отслеживать при прогнозе мореплавания. Подобные прогнозы важны не только со стороны безопасности, но и с экономической точки зрения, так как при неправильном составлении маршрута существуют препятствия, которые без ледокольной проводки невозможно преодолеть судам не ледового класса.

Уменьшение количества льда в летнюю навигацию дает большую возможность для взаимодействия морской поверхности с холодными воздушными массами, которые вызывают изменения в морском и ледовом балансе. Подобное перераспределение влияет не только на одно море, но и на соседние акватории, так как между ними существует ледообмен.

Объектом исследования являются моря Арктики – Карское море и море Лаптевых. Данные моря являются соседними, и через них проходит часть Северного морского пути, где происходит постоянное судоходство между местными портами, так и транспортный транзит через весь Арктический регион.

Предметом исследования являются изменения ледовых характеристик в летний период при таянии и освобождении открытых участков морской поверхности.

Цель работы: изучение состояния ледовых процессов в Арктическом регионе в летний навигационный период по трассе Северного морского пути с дальнейшим построением карт судоходных путей в Карском море и море Лаптевых при использовании данных дистанционного зондирования.

Задачи:

1. Произвести анализ исходных данных и спутниковых систем, которые используются для достижения цели работы.
2. Рассмотреть методы картирования и преобразования спутниковых данных.
3. Произвести анализ основных судоходных путей по трассе Северного морского пути в исследуемых морях.
4. Предоставить информацию о возможных районах прохождения судов в Карском море и море Лаптевых по подготовленным картам.

1 Физико–географическое описание Карского моря и моря Лаптевых

1.1 Географическое положение Карского моря

Карское море расположено в западной части Арктического региона, восточнее Новой Землей (рис. 1). Его контуры ограничены на юге сушей и условными линиями на севере. Общее очертание моря характеризуется протяженностью с юго–запада на северо–восток [1].

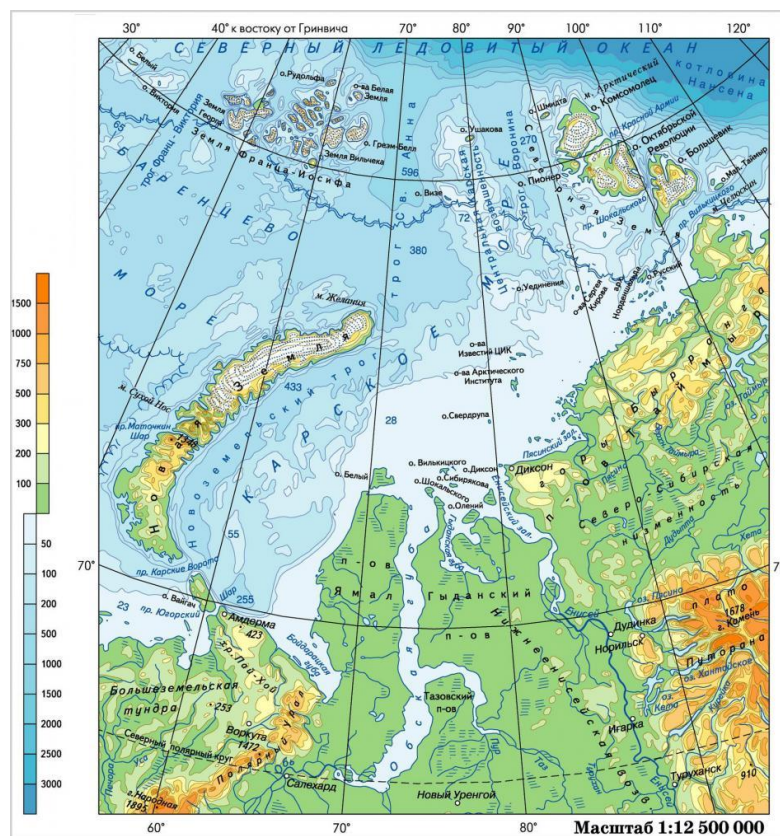


Рисунок 1. Карское море, географическое положение.

Карское море в достаточно широко открыто к Северному Ледовитому океану и в большей части лежит на материковой отмели, поэтому оно относится к типу материковых окраинных морей. Площадь равняется 883 тыс. км², объем – 98 тыс. км³, средняя глубина составляет 111 м, а наибольшая глубина 600 м.

Побережье Карского моря, разнообразное по своим внешним формам и строению, относится к разным морфологическим типам берегов в разных

районах. Море обрамлено преимущественно абразивными берегами, но также встречаются аккумулятивные и обледенелые. Восточные берега Новой Земли крутые и холмистые. Материковое побережье местами низменное и пологое, местами обрывистое. В основном, невысокие берега встречаются вблизи Северной Земли.

Дно Карского моря имеет очень неровный рельеф. Преобладающие глубины до 100 м. Южная и восточная части, прилегающие к материку, мелководны. Здесь морское дно пересекают многочисленные небольшие впадины, разделенные порогами разной высоты. Достаточно ровное дно можно отметить в центральных районах.

Узкая полоса глубин 100–200 м, которая идет от прибрежного мелководья на север, образует Центральную Карскую возвышенность, простирающуюся на север до материкового склона. На западе и северо–западе моря находятся наибольшие глубины. Вдоль побережья Новой Земли протягивается Новоземельская впадина, где отмечаются глубины более 500 м, севернее расположен желоб Святой Анны, который выходит за пределы моря в океан. Между Центральной Карской возвышенностью и Северной Землей, дно моря прорезано желобом Воронина глубиной более 200 м. Такой сложный рельеф дна является одной из отличительных особенностей природных условий Карского моря.

1.2 Климат Карского моря

Расположение Карского моря в высоких широтах Арктики и непосредственная связь с Северным Ледовитым океаном характеризуется полярным морским климатом. Относительная близость Атлантического океана немного смягчает морской климат, но Новая Земля служит барьером для теплых потоков атлантического воздуха и воды, поэтому Карское море более сурово в климатическом отношении, чем соседнее арктическое Баренцево море. Несколько большая протяженность Карского моря с юго–

запада на северо–восток создает заметные различия в климатических показателях в разных его регионах во все сезоны.

Взаимодействие основных центров атмосферного воздействия, а так же их расположение, интенсивность, во многом определяют состояние погоды и величины метеорологических элементов в течение года.

В теплое время года Сибирский максимум разрушается, а впадина низкого давления исчезает. Смещение полярного максимума происходит к северу. В связи с этим весной дуют неустойчивые по направлению ветры, со скоростями, которые не превышают 5–6 м/с. Действие циклонической активности ослабевает. Весеннее потепление наступает довольно быстро, но не приводит к значительному повышению температуры воздуха. Средняя температура в мае составляет около -7° на западе и около -9° на востоке моря.

Формирующаяся летом над морем локальная область повышенного давления приводит к преобладанию северных ветров со скоростями 4–5 м/с. В июле температура воздуха в среднем равна $5-6^{\circ}$ в западной части моря и $1-2^{\circ}$ на востоке и северо–востоке. В отдельных районах материкового побережья температура воздуха может повышаться до $+18$ и даже $+20^{\circ}$. Лето выходит короткое и холодное с пасмурной дождливой погодой. Сильное зимнее охлаждение и слабый летний прогрев, неустойчивая погода в холодный сезон и относительно спокойное состояние атмосферы летом – характерные черты климата Карского моря. Можно отметить, что все же нужно учитывать фактор циклонических образований в исследуемом районе в летний период. Это обусловлено вторжением холодных воздушных масс на теплую морскую поверхность. В весенний период при разрушении льда появляются участки свободной водной поверхности. Действие циклонов увеличивает количество дрейфующих льдов и зон, где появляются торосы, стамухи и другие образования, усложняющие навигацию в арктических морях. Формирование циклонов севернее и их перемещение с северными или

северо–западными ветрами может способствовать образованию более интенсивных явлений на юге моря, что наблюдалось в летний период [2].

1.3 Характеристика ледяного покрова Карского моря

Карское море большую часть года покрыто сплошным ледяным покровом. В юго–западной части моря лед наблюдается в течение 7–8 месяцев, с ноября по июнь–июль. Северо–восточная часть моря в летний период не очищается полностью ото льда [3].

Так как данное исследование включает в себя обеспечение ледового плавания исключительно в летний период, то следует рассмотреть характеристики ледяного покрова в период его разрушения до полного освобождения акватории Карского моря.

Таяние и очищение ото льда. В среднем таяние ледяного покрова в юго–западной части Карского моря начинается в конце мая. В результате воздействия тепловых и динамических процессов в начале июня около 10 % акваторий юго–западной части моря освобождается ото льда.

Таяние льда и очищение северо–восточной части моря в течение всего летнего сезона происходит медленнее, чем в юго–западной части моря, и из–за этого район полностью ото льда не очищается (табл.1).

Таблица 1. Площади районов Карского моря, освобождающиеся ото льда в период таяния ледяного покрова, %.

Район моря	Июнь			Июль			Август			Сентябрь		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Юго–запад	8	11	12	22	38	48	80	91	94	100	100	100
Северо– восток	4	6	7	9	11	12	18	23	36	53	52	54

Скорость очищения юго–западной части моря ото льда увеличивается в июле, когда в процессе таяния ледяного покрова и воздействия на него

динамических процессов происходит взлом припая и превращение его в дрейфующие льды различных размеров.

Взлом припая. Припай начинает разрушаться раньше всего в Амдерминском районе (рис. 2), где он в 80 % случаев окончательно разрушается в течение июня. В основном, в первой половине июля взламывается припай вдоль Ямальского побережья и в Обь–Енисейском районе (табл.2).

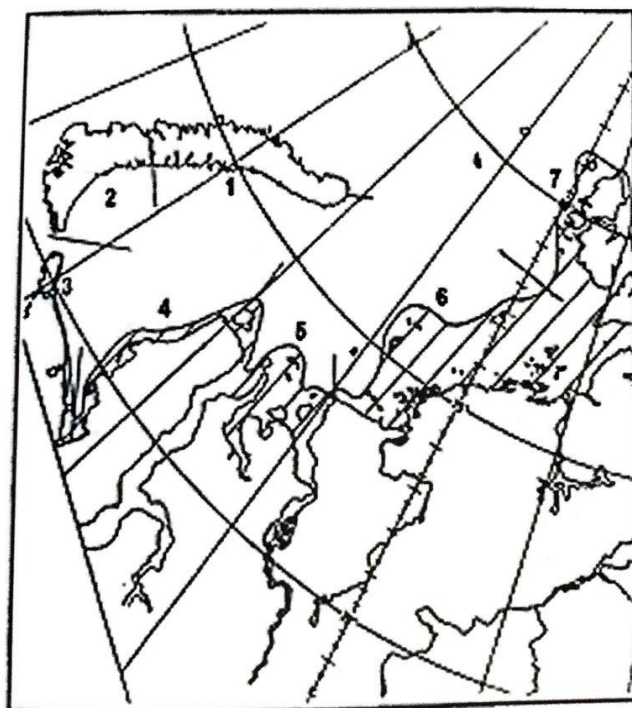


Рисунок 2. Районы образования заприпайных полыней в Карском море:

1– Северная Новоземельская; 2 – Южная Новоземельская; 3 – Амдерминская; 4 – Ямальская; 5 – Обь–Енисейская; 6 – Центральная Карская; 7 – Западная Североземельская.

Многолетний размах сроков окончательного разрушения припая в Амдерминском и Ямальском районах составляет около одного месяца, в Обь–Енисейском районе – две декады (табл. 2).

В северо–восточной части моря взлом припая в среднем начинается в начале июня со стороны кромки припая. Основная площадь припая взламывается в течение июля, и к концу месяца припай сохранятся только в

узкой прибрежной зоне между шхерами Минина и южной частью архипелага Норденшельда и в проливах Североземельского архипелага.

Таблица 2. Сроки окончательного разрушения припая в районах юго–западной части Карского моря.

Сроки	Районы		
	Амдерминский	Ямальский	Обь–Енисейский
Средние	23.06	6.07	17.07
Ранние	8.06	18.06	8.07
Поздние	5.07	14.07	27.07

Многолетний размах сроков окончательного взлома припая в северо–восточной части моря составляет один месяц (табл. 3). Таким образом, если припай в море формировался в течение 7–8 месяцев, то его окончательное разрушение происходит за 2 месяца.

Освобождение морей ото льда в настоящее время из–за климатических особенностей начинает происходить достаточно раньше и с отдельными зонами, где процесс происходит интенсивнее. Можно сделать вывод, что сроки разрушения припайных льдов тоже смещаются на более ранний период (июнь).

Таблица 3. Сроки окончательного разрушения припая в северо–восточной части Карского моря.

Сроки	Дата
Средние	30.07
Ранние	15.07
Поздние	14.08

Распределение льда в период таяния. К концу июля под влиянием тепловых и динамических процессов половина юго–западной части моря очищается ото льда, и чаще всего в районе остаются только редкие и разреженные льды (табл. 1). В конце августа – начале сентября в 80 % случаев этот район полностью освобождается ото льда (рис. 3).

Очищение юго–западной части моря чаще начинается от полуострова Ямал и распространяется в западном направлении. Начальным очагом очищения является Ямальская заприпайная полынья [4].

Таяние льда в северо–восточной части моря происходит медленнее, и к концу периода таяния (в сентябре), в среднем около половины района остается занятой остаточными льдами (рис. 3). В среднем, когда происходит вытаивание сплоченных льдов, увеличивается площадь редких и разряженных льдов, и в конце сентября их площади в северо–восточной части моря примерно равны.

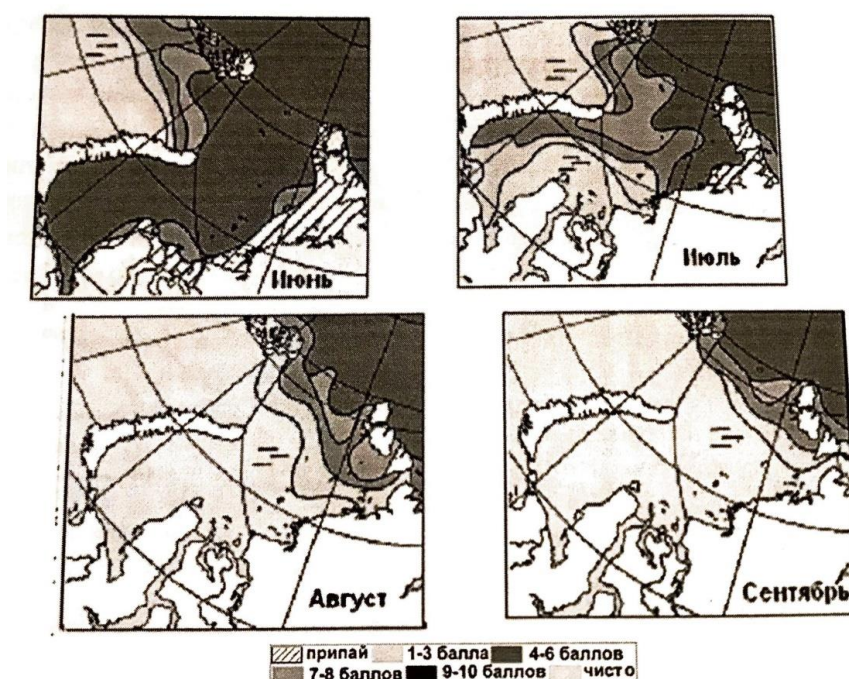


Рисунок 3. Распределение льда в Карском море в июне-сентябре (с вероятностью 50 %) [4].

На рис. 4 можно увидеть, по положению кромок льда, что очищение моря наиболее интенсивно происходит в июле и августе. В среднем, к концу августа ото льда очищается около 60 % акватории моря, в основном, это происходит за счет юго–западной части Карского моря. В сентябре процессы таяния замедляются. В течение сентября вследствие таяния и дрейфа льда очищаются 10–15 % моря (табл. 4). В северных районах моря в этом время уже начинается ледообразование.

Таблица 4. Площади Карского моря, освобождающиеся ото льда в период таяния ледяного покрова, % [4].

Июнь			Июль			Август			Сентябрь		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
6	8	9	14	22	26	43	50	59	72	71	73

При средних условиях таяния к концу летнего периода вытасивают все возрастные виды льда, кроме однолетнего толстого, толщина которого может уменьшиться до 20–40 см. Таяние льдов в очень сплоченном ледяном покрове (9–10 баллов) происходит замедленное, и в конце сентября их толщина в северо–восточной части моря составляет около 100 см.

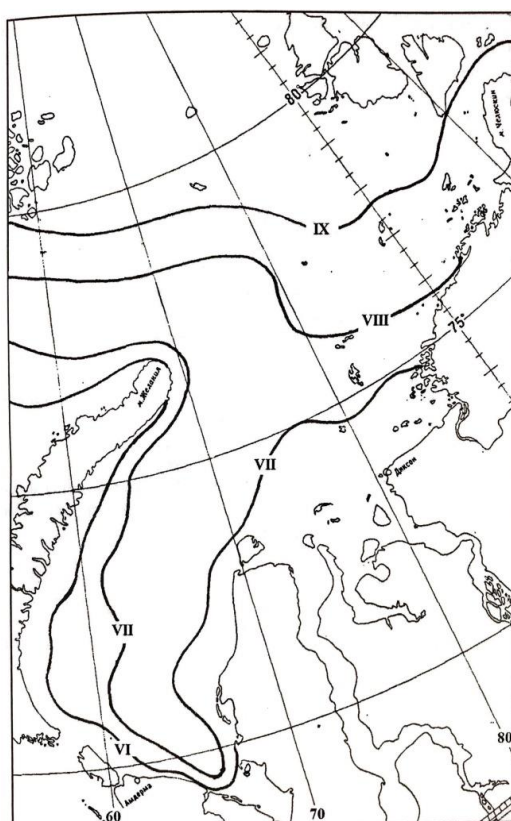


Рисунок 4. Положение кромки льда в Карском море в конце июня – сентябре [4].

Ледяные массивы. В период таяния сплоченные (7–10 баллов) льды моря локализуются в ледяные массивы. В юго–западной части моря это Новоземельский массив, в северо–восточной части – Североземельский и Северный Карский массивы.

Новоземельский ледяной массив состоит из однолетних и молодых льдов, где образуются полыньи. В период очищения моря он может занимать центральное, западное или восточное положение. Наиболее часто наблюдается западное положение массива, когда он прижат к Новой Земле и блокирует пролив Карские ворота. В середине июля массив занимает около 50 % площади юго-западной части Карского моря, в августе льды массива интенсивно вытаивают и в конце месяца в 80 % случаев он исчезает.

Североземельский ледяной массив формируется из местных припайных льдов и располагается на судоходной трассе между островом Диксон и проливом Вилькицкого.

Карский Северный ледяной массив является отрогом океанического ледяного массива и занимает северо-западные районы моря. В основном он состоит из однолетних льдов, и только в северной его части могут наблюдаться двухлетние и многолетние льды.

Разделение сплоченных льдов северо-восточной части моря на два массива в большинстве лет происходит в середине августа. Карский Северный массив разрушается медленнее остальных ледяных массивов моря, и до 40 % его площади не вытаивают в летний период. Североземельский массив большую часть летнего периода блокирует западные подходы к Североземельскому архипелагу и к проливу Вилькицкого, и в среднем до 20–25 % массива сохраняются до начала ледообразования.

Стамухи. Вследствие нажимного дрейфа льда в припайной зоне, движения льда и навалов на припай на глубинах до 20 м образуются стамухи. Наблюдаемые максимальные значения геометрии стамух следующие: высота надводной части 10–15 м, глубина киля 20–25 м.

Айсберги. В Карском море существуют основные районы распространения айсбергов, которые прилегают к основным группам островов – Земле Франца-Иосифа, Новой Земле, Северной Земле и острову Ушакова [5,6]. По современным оценкам, айсберговый сток архипелагов Земля Франца-Иосифа и Новая Земля составляет порядка 4 и 1 км³/год

соответственно. На Северной Земле самым крупным выводным ледником является ледник Арктического института (длина 43,2 км, площадь 390 км²), спускающийся в Карское море с западного склона ледникового щита Академии наук. [7]

При анализе внутригодовой изменчивости вероятности появления айсбергов на акватории моря, авторы сделали вывод о том, что в ноябре – январе айсберги на акватории практически не встречаются. С февраля по май они располагаются преимущественно с северной части акватории. Максимальные значения вероятности появления айсбергов в центральной части моря приходятся на период с июля по сентябрь.

Считается, что айсберги, которые образуются от ледников Новой Земли, не распространяются далеко в Карское море. В основном это касается заливов, куда выходят продуцирующие айсберги ледники, и подходов к заливам [8].

Подавляющее большинство зафиксированных айсбергов представляют собой обломки и куски айсбергов (около 83 % наблюдений). Около 10 % случаев приходится на столбообразные айсберги, примерно 5 % – на разрушающиеся айсберги.

Средние размеры айсбергов на акватории Карского моря составляют: длина 63 м, высота 9 м. Максимальная длина может превышать 150 м, а высота достигать 30 м [7]. Иллюстрацию распределения айсбергов в исследуемом море можно увидеть на рис.5 [9].

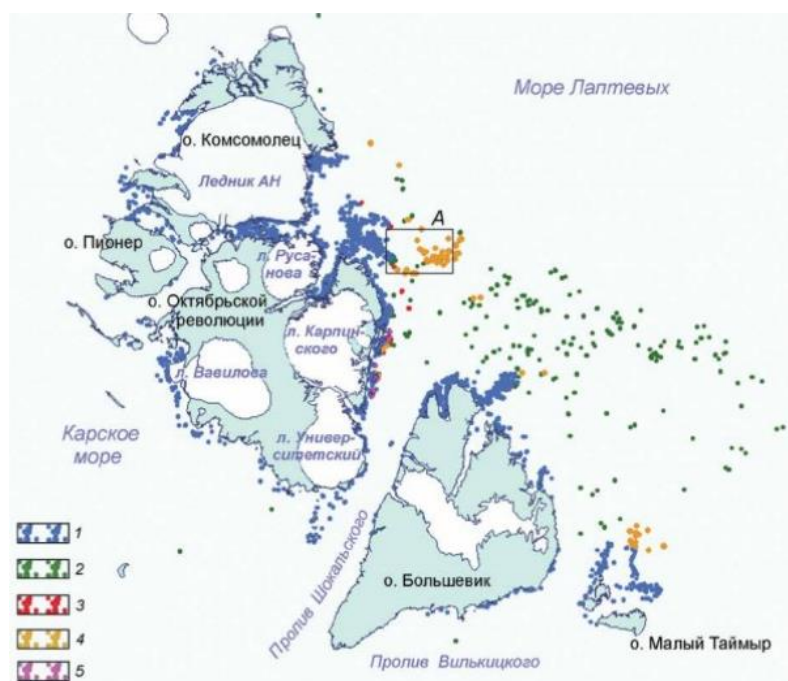


Рисунок 5. Айсберги, обнаруженные у Северной Земли в марте–апреле 2017 г. по спутниковым снимкам Landsat–8 и находящиеся: 1 – в припае; 2 – в дрейфующем льду; 3 – на открытой воде; 4 – на грунте среди дрейфующих льдов; 5 – на грунте среди открытой воды.

1.4 Географическое описание моря Лаптевых

Море Лаптевых в своей северной части свободно сообщается с океаном, поэтому его относят к типу континентальных окраинных морей (рис. 6). Западная граница проходит по восточным берегам островов архипелага Северная Земля от мыса Арктического, затем через пролив Красной Армии на восточном берегу острова Октябрьской Революции до мыса Анучина, через пролив Шокальского до мыса Песчаный на острове Большевик и вдоль его восточного берега до мыса Вайгач. Восточная граница проходит вдоль пролива Вилькицкого, и далее вдоль материкового побережья до вершины Хатангского залива [10]. Среднее значение глубины составляет 533 м, самое глубокое место 3385 м, площадь моря – 662 тыс. км². Дно моря Лаптевых похоже на равнину, к северу отмечается большой

контраст глубин. Море целиком занимает шельф, немного материкового склона и часть ложа океана. Большая часть моря (около 54 %) мелководна, глубина составляет менее 50 м. В южной части моря глубины не превышают 25 м [11].

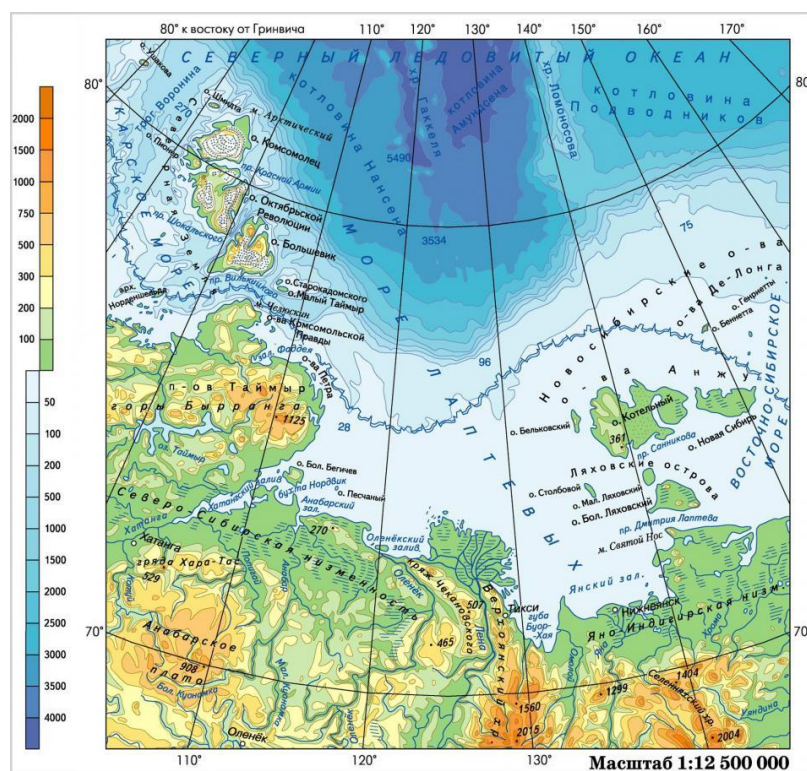


Рисунок 6. Море Лаптевых, географическое положение.

1.5 Климат моря Лаптевых

Поскольку море Лаптевых удалено от Атлантического и Тихого океанов, а континент и льды Арктики расположены рядом, его климат можно отнести к континентальному с четко выраженными морскими особенностями. Осенью и зимой море находится под влиянием высокого атмосферного давления, преобладают ветры южного и юго-западного направления, они достаточно неустойчивы и могут усиливаться до штормовых. К концу зимы скорость ветра уменьшается и наступает затишье. В теплый период часто дуют северные ветры и летом можно отметить циклоническую активность [12]. Поэтому в летний период постоянно

пасмурная и дождливая погода. С конца августа начинает формироваться Сибирский максимум, что означает прибытие осени.

1.6 Характеристика ледяного покрова моря Лаптевых

Море Лаптевых является одним из самых суровых арктических морей, морозные зимы вызывают значительное развитие морского льда, который покрывает полностью акваторию моря почти весь год (с октября по июнь).

Заприпайные полыньи. Такие полыньи в Арктике систематически образуются в зимний период между неподвижным припаем и сплочённым дрейфующим льдом. Они представляют собой достаточно большие пространства чистой воды и молодых льдов различной толщины размерами от нескольких сотен метров до сотен километров [13]. Их принято называть по месту образования: 1 – Восточная Североземельская, 2 – Северо-восточная Таймырская, 3 – Восточная Таймырская, 4 – Анабаро–Ленская, 5 –

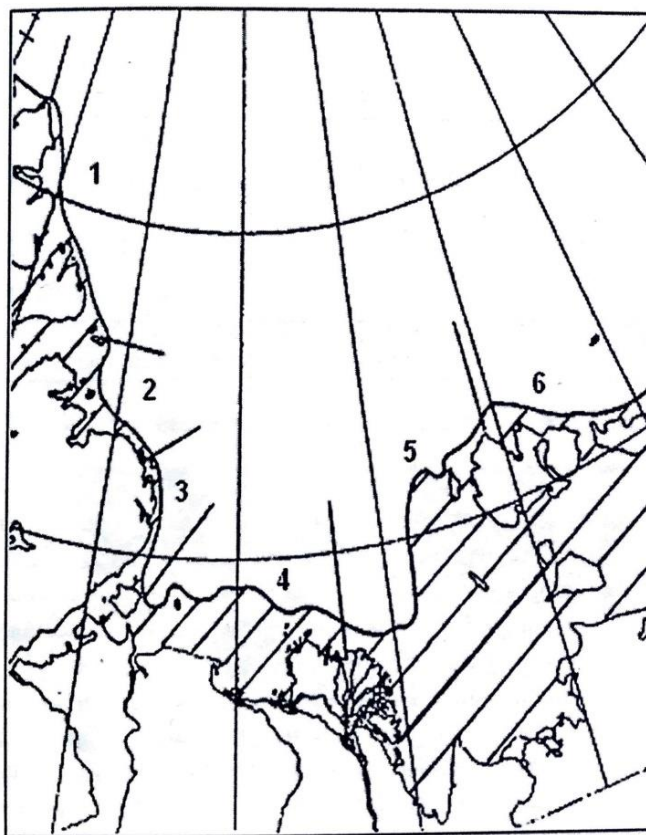


Рисунок 7. Положение заприпайных полыней моря Лаптевых [14].

Западная Новосибирская (рис. 7).

Северная Новосибирская полынья, которая большую часть зимнего сезона стационарна, находится севернее Новосибирских островов, где проходит часть трассы СМП. Анализ данных дистанционного зондирования показывает, что полыньи являются благоприятными для сквозного прохода за припаем протяженностью 2000 км [14].

Площадь полыней зависит от сезонной перестройки атмосферной циркуляции над морем. Полыньи входят в процесс ледопродуктивности моря. За счет них в период таяния льда происходит аккумуляция тепла, и они являются очагами очищения моря ото льда.

Таяние и очищение моря ото льда. Таяние ледяного покрова начинается в южных районах моря и в среднем приходится на 5–10 июня. К этому времени прекращается ледообразование в полыньях. К концу июня около 10 % моря свободно ото льда. В течение всего летнего периода освобождается больше 80 % района моря Лаптевых от ледяных полей (табл. 5). Скорость очищения моря ото льда увеличивается в июле после окончательного взлома припая и превращение его в дрейфующие льды различных размеров.

Таблица 5. Площади районов моря Лаптевых, освобождающихся ото льда в период таяния ледяного покрова, % [4].

Район моря	Июнь			Июль			Август			Сентябрь		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Запад моря	6	9	11	13	16	23	32	41	46	49	50	48
Восток моря	7	10	12	16	21	31	47	64	74	79	83	84

Начало взлома припая приходится на конец июня, в среднем. Окончательное разрушение происходит к концу июля, и реже в начале августа (табл. 6).

Стоит отметить, что в настоящее время в связи с климатическими и погодными изменениями, условия могут отличаться. Освобождение морей

ото льда начинает происходить ранее июня и более интенсивно в отдельных районах. Из этого следует, что сроки разрушения припайных льдов тоже смещаются на более ранний период (конец июня – начало июля).

Таблица 6. Сроки окончательного разрушения припая в море Лаптевых [4].

Сроки	Районы	
	Запад моря	Восток моря
Средние	21.07	18.07
Ранние	4.07	29.06
Поздние	16.08	25.08

Ледяные массивы. В период таяния и разрушения ледяного покрова сплоченные 7–10 бальные льды локализуются в два ледяных массива Янский и Таймырский (рис. 8).

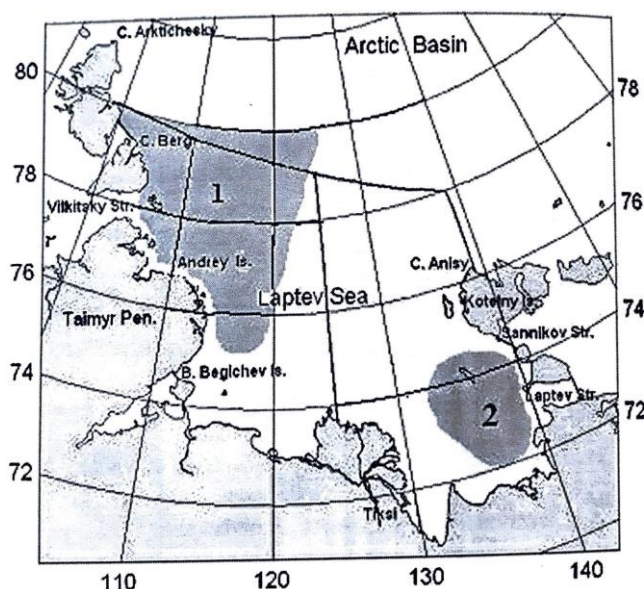


Рисунок 8. Схема расположения ледяных массивов в море Лаптевых

1 – Таймырский, 2 – Янский [4].

Янский массив формируется льдами взломанного припая, он располагается вблизи пролива Санникова и Дмитрия Лаптева. В отдельные годы данный ледяной массив блокирует проливы с западной части, что препятствует судоходству [12].

Таймырский массив является большим по масштабу в море Лаптевых (занимает около 60 % западной части), поэтому часто блокирует пролив Вилькицкого с восточной стороны и затрудняет плавание.

Стамухи. В летний период в мелководных районах, где отмечаются глубины 10 м и меньше или на банках в открытых частях моря наблюдаются стамухи. Они представляют собой остатки ледяных полей, которые подвергаются сильному торошению и осевшие на грунт. Их осадка может быть от 1,6 до 22 м.

Айсберги. Их обломки встречаются в море не только вблизи мощных ледников у островов Северная Земля. Дрейфуя с Восточно–Таймырским течением, они проникают в восточный вход в пролив Вилькицкого, а иногда значительно южнее, к островам Комсомольской Правды.

Выводы:

Исходя из проведенного анализа исследуемых морей, можно сделать вывод, что Карское море имеет более мягкий климат из-за соседства с Атлантическим океаном. Ледовые характеристики предрасполагают к практически полному очищению моря в летний период, а значит, к снижению рисков опасного прохождения судов во льдах.

Море Лаптевых можно отнести к суровому по климатическим характеристикам, оно имеет свои особенности в распределении льда, так как находится на континентальном шельфе, где преобладают мелководные районы. При грамотном изучении и прогнозе таяния припая, существует возможность благоприятного судоходства в районах заприпайных полыней раньше, чем будет открыта навигация по всему морю. Так же нужно отслеживать ледяные массивы на западе и востоке моря, которые существенно препятствуют прохождению судов через проливы.

В настоящее время в связи с климатическими и погодными изменениями, условия могут отличаться. Освобождение морей ото льда начинает происходить ранее летних месяцев и более интенсивно в отдельных

районах. Из этого следует, что сроки разрушения припайных льдов тоже смещаются на более ранний период. Июнь – для Карского моря, конец июня – начало июля – для моря Лаптевых.

2 Методы исследования и обработки исходных данных

2.1 Спутниковые системы, используемые в работе

Существует множество способов для определения ледовых характеристик, например, это сбор натурных данных во время экспедиций или аэрофотосъемка. Так как исследуемый Арктический регион является достаточно труднодоступным с суровыми метеорологическими показателями, то существует возможность использовать данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Информацию можно получать в оперативном режиме без потери данных, так как съемка проводится в различных диапазонах при использовании приборов на борту спутниковой системы. Для получения информации на больших территориях морской поверхности можно использовать спутники с низким пространственным разрешением 1–5 км, так как это описывает более общую обстановку. Для уточнения используются спутники с высоким разрешением до 10 м. Поэтому следует использовать несколько спутниковых систем для комплексного анализа.

Общая характеристика микроволнового радиометра AMSR–2.

AMSR–2 представляет собой микроволновый сканирующий радиометр, установленный на спутнике GCOM–W, предназначенный для спутникового мониторинга Земли, а именно съемки в микроволновом диапазоне от 6.925 до 89 ГГц.

Радиометр производит наблюдение за поверхностью, гидросферой и атмосферой. Мощность микроволнового излучения определяется характеристиками объекта, которые включают в себя: состояние поверхности, ее температура и влажность. Радиометр позволяет получить данные о состоянии ледового покрова на морской поверхности.

Можно отметить, данный прибор предоставляет информацию с пространственным разрешением до 5 км, чего недостаточно для детального анализа, но из-за съемки в микроволновом диапазоне, характеристики льда легко выделяются в полярную ночь и при облачности.

В настоящее время данные спутников MODIS–Aqua и AMSR2–GCOM–W1 дополняют данные наблюдений за концентрацией морского льда (SIC): данные имеют высокое пространственное разрешение (1 км), но доступны только в безоблачных условиях. Объединение осуществляется следующим образом: выбирается «бокс» размером 5х5 км, примерно соответствующий одному пассивному следу микроволнового излучения. Поскольку оба спутника входят в спутниковую группировку, временной лаг между наблюдениями составляет порядка минут. Для каждого пролета тепловые инфракрасные и пассивные характеристики СВЧ SIC рассчитываются отдельно. После того рассчитывается среднесуточное значение. Эта процедура дает пространственно–непрерывный продукт концентрации морского льда при пространственном разрешении 1 км, что в 5 раз лучше, чем при пассивных микроволновых наблюдениях AMSR2 [15].

Общая характеристика спутников Aqua/Terra Modis.

Terra собирает данные о биогеохимических и энергетических системах Земли с помощью пяти датчиков, которые наблюдают за атмосферой, поверхностью суши, океанами, снегом и льдом, а также энергетическим бюджетом. Каждый датчик имеет уникальные особенности, которые позволяют ученым решать широкий спектр научных задач. Пять бортовых датчиков Terra:

- ASTER (Усовершенствованный космический термоэмиссионный и отражательный радиометр);
- CESER (Облачная система и система излучения энергии Земли);
- MISR (Многоугловой визуализационный спектрометрический радиометр);
- MODIS (Спектрометрический радиометр умеренного разрешения);

- МОРITТ (Измерения загрязнения в тропосфере).

Поскольку все пять приборов находятся на одном спутнике, производя одновременные наблюдения, предоставляется возможность сравнивать различные аспекты характеристик Земли во времени.

Aqua несет шесть приборов, подобные Terra, на околополярной низкой околоземной орбите. Каждый из них имеет уникальные характеристики и возможности, и все вместе служат для формирования мощного пакета для наблюдения Земли.

В данном исследовании используется спутниковая информация с прибора MODIS, который является ключевым инструментом на борту спутников Terra и Aqua. Орбита Terra вокруг Земли синхронизирована так, что он проходит с севера на юг через экватор в утро, в то время как Аква проходит с юга на север над экватором после полудня. Terra MODIS и Aqua MODIS просматривают всю земную поверхность каждые 1 до 2 дня, получая данные внутри 36 спектральных полос (табл. 7) или группы длин волн [16].

Таблица 7. Характеристики каналов прибора MODIS.

Режим съемки	Гиперспектральный					
Спектральные каналы	1–2	3–7	8–19	20–25	26	27–36
Спектральный диапазон, мкм	0,62–0,88	0,46–2,16	0,41–0,97	3,66–4,55	1,36–1,39	0,54–14,39
Пространственное разрешение (в надире), метры	250		500		1000	
Радиометрическое разрешение, бит на пиксель	12					
Ширина полосы съемки, км	2330					

Оперативность получения информации и достаточно хорошее пространственное разрешение до 250 м позволяет достаточно быстро и детально рассмотреть интересующие процессы в Арктическом регионе, но в

зимний период из-за полярной ночи информация недоступна в видимом диапазоне съемки.

Общая характеристика спутника Sentinel-1a, b.

Sentinel-1 оснащен радаром с синтезированной апертурой (SAR), что позволяет получать снимки в любое время года и независимо от облачности или погодных условий (рис. 9). Аппаратура C-SAR поддерживает деятельность в двойной поляризации (HH+HV, VV+VH) снабженной через одну цепь (переключение к H или V) и две параллельных цепи получают для поляризации H и V. Данные с двойной поляризацией полезны для классификации наземного покрова и применения в области морского льда.

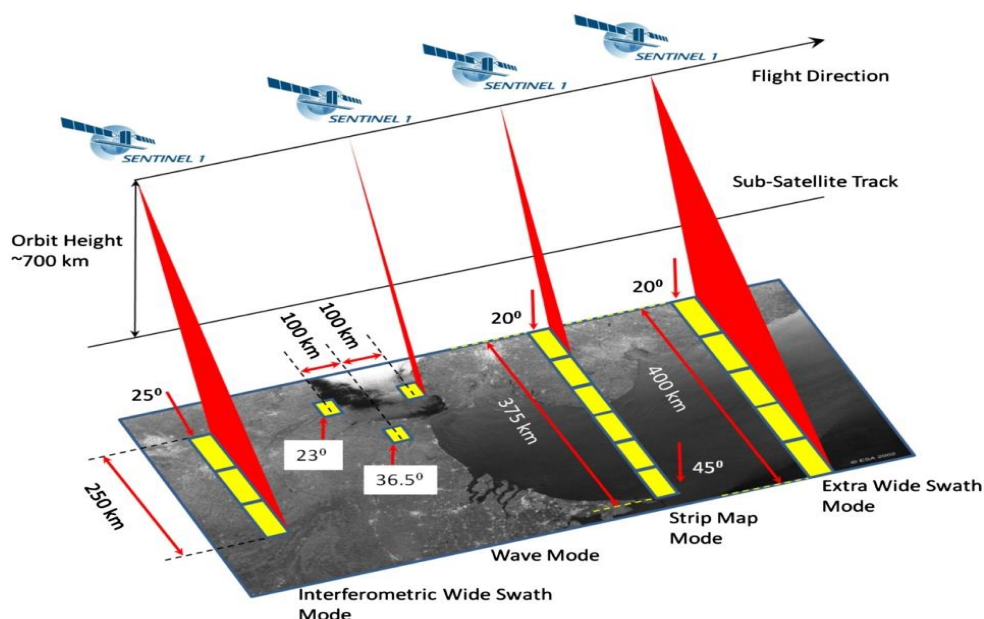


Рисунок 9. Полосы сканирования спутника Sentinel-1.

Прибор Sentinel-1 SAR может получать данные в четырех режимах:

1. Маршрутный режим (SM) – стандартный режим обработки изображения SAR, в котором земная полоса освещается непрерывной последовательностью импульсов, а луч антенны указывает на фиксированный азимут и угол наклона. 80 км полоса сканирования, 5 x 5 м пространственное разрешение.

2. Интерферометрическая широкая полоса (IW) – данные получены в трех сегментах с использованием метода наблюдения местности с прогрессивным сканированием SAR (TOPSAR). 250 км полоса сканирования, 5 x 20 м пространственное разрешение.
3. Сверхширокая полоса (EW) – данные представляются в пяти каналах с использованием метода визуализации TOPSAR. Режим EW обеспечивает очень большое покрытие за счет пространственного разрешения. 400 км полоса сканирования, 20 x 40 м пространственное разрешение.
4. Волновой режим (WV) – данные получают в небольших полосах, расположенных через регулярные интервалы 100 км вдоль трассы. Путем чередования волны приобретают одну волну на близком углу падения ряда, пока следующая волна приобретается на дальнем углу падения ряда. WV–режим работы Sentinel–1 над открытым океаном. 20 x 20 км сканирование, 5 x 5 м пространственное разрешение.

Для предварительного просмотра применяют цветовой синтез, при котором, как правило, в качестве изображения для третьего канала используют различные виды комбинаций двух имеющихся изображений (HH и HV поляризаций). Часто используется вариант третьего канала для цветового синтеза в виде отношения двух изображений (HH/HV), которое позволяет подчеркнуть различия отражённых сигналов в двух поляризациях и является дополнительным признаком при выявлении объектов подстилающей поверхности [17].

2.2 Описание методов обработки информации

Для практического применения данных дистанционного зондирования использовались пакеты программного обеспечения, такие как Rapopty, SNAP и UNESCO Bilko. Данные ПО предназначены для дальнейшей обработки спутниковой информации, чтобы получить оценки о ледовой обстановке в период летней навигации на трассе Северного морского пути (СМП), а именно в море Лаптевых и Карском море.

Panoply. Данное программное обеспечение это инструмент графической визуализации, который способен создавать двумерные графики географически привязанных данных. Данное программное обеспечение можно использовать для создания карт, используя данные дистанционного зондирования в формате netCDF, а именно выделения на них ледовых объектов [18].

Так же Panoply можно использовать для:

- построения массивов долготы–широты в виде глобальных или региональных карт;
- построения зональных средних кривых данных долготы–широты;
- построения вертикальных массивов широт–участков;
- построения массивов времени и широты, т.е. диаграммы Ховмеллера;
- объединения двух наборов данных путем их дифференцирования, суммирования или усреднения;
- использования диапазонов из 40 цветных таблиц и более 75 картографических проекций;
- сохранения графиков в различных форматах файлов и экспорта анимации в виде видео AVI или MOV.

Помимо формата netCDF, Panoply может распознавать HDF (иерархический формат данных) и GRIB (сетчатый двоичный формат) форматы файлов [19].

SNAP. Архитектура SNAP используется для обработки и анализа данных наблюдения Земли благодаря следующим технологическим инновациям: расширяемость, портативность, модульная платформа, общая абстракция данных наблюдения, плиточное управление памятью и платформа обработки графиков.

Основные характеристики:

- общая архитектура для всех наборов инструментов;

- быстрый дисплей изображения и навигация даже изображений гига–пиксела;
- структура графической обработки (GPF): для создания пользовательских цепочек обработки;
- расширенное управление слоями позволяет добавлять и манипулировать новыми наложениями, такими как изображения других каналов, изображения с серверов WMS или шейп–файлов ESRI;
- большая область интереса определения для статистики и различных участков;
- простое определение и наложение битовой маски;
- гибкая арифметика полосы с использованием произвольных математических выражений;
- точная репроекция и орторектификация к общим картографическим проекциям;
- геокодирование и ректификация с использованием наземных контрольных точек;
- автоматическая загрузка радиолокационной топографической миссии шаттла (SRTM DEM NASA) и выбор участка;
- библиотека продуктов для эффективного сканирования и каталогизации больших архивов;
- поддержка многопоточных и многоядерных процессоров;
- интегрированная визуализация мирового ветра [20].

В данном программном обеспечении были рассмотрены прикладные задачи по преобразованию данных спутниковой системы Sentinel–1, оснащенной радаром с синтезированной апертурой (SAR), что дает возможность получать информацию независимо от времени года и погодных условий.

В руководстве представлена инструкция по интерферометрической обработке с помощью интерферометрических широкополосных аппаратов Sentinel–1.

Интерферометрический радар с синтезированной апертурой использует разность фаз между двумя сложными радарами SAR–наблюдения, сделанные с немного отличающихся позиций датчиков и извлекающие информацию о земной поверхности.

Сигнал SAR содержит информацию об амплитуде и фазе. Амплитуда – это сила радара отклик и фаза – это доля одного полного цикла синусоидальной волны (одна длина волны SAR). То фаза SAR–изображения определяется в первую очередь расстоянием между спутниковой антенной и наземная цель.

Комбинируя фазу этих двух изображений после корегистрации, можно получить интерферограмму, которая будет иметь вид: фаза сильно коррелирует с подстилающей поверхности. В случае дифференциальной интерферометрии – это вклад топографической фазы снимается с помощью цифровой модели поверхности. Остальные вариации в интерферограмме можно отнести к поверхностным изменениям, которые произошли между двумя приемами изображения, а также нежелательные атмосферные эффекты [21].

UNESCO Bilko. Это программа, которая так же предназначена для обработки данных дистанционного зондирования. Программа включает в себя функции обработки и анализа изображений в различных графических форматах [22].

Возможности программы:

- поддержка известных форматов изображений, которые используются в сфере дистанционного зондирования;
- поддержка чтения сжатых форматов изображений
- автоматическая геокоррекция данных Earth Explorer;
- анимация, выделение точек, линий и полигонов, построение разрезов и гистограмм;
- работа с многоканальными данными;
- использование формул;

- отображение пиксельной информации, создание композитных изображений, создание и использование цветовых палитр.

В данной программе можно создавать композитные изображения для изучения каких-либо характеристик водной поверхности, это позволяет выбрать интересующие каналы, чтобы получить всестороннюю информацию от объектов.

Выводы:

При рассмотрении спутниковых систем можно выделить отдельные плюсы и минусы в каждой, где-то это низкое пространственное разрешение или недостаточность пролетов над исследуемым местом, или вовсе недоступность информации в видимом диапазоне из-за облачности. Так как спутниковые данные можно получить в разном формате, что было отмечено при рассмотрении источников, то каждое программное обеспечение можно тоже использовать для определенных задач – это построение карт, обработки изображения или составления сложных композитных образцов. В совокупности использования всех систем появляется возможность тщательного исследования района судоходства и предоставления оперативного прогноза ледовой обстановки.

3 Анализ основных судоходных путей по трассе Северного морского пути в исследуемых морях

3.1 Опасные ледовые явления и ледяные образования

Виды опасных и неблагоприятных ледовых явлений.

Для того чтобы иметь представление в каких масштабах существует опасность плавания в Арктических морях, нужно понимать, что конкретно может повлиять на передвижение судов, используя эту информацию для дальнейшего прогнозирования.

Опасное гидрометеорологическое явление (ОЯ) – это такое явление или комплекс гидрометеорологических величин, которые по своему значению, интенсивности или продолжительности представляют угрозу безопасности людей, а также могут нанести значительный ущерб объектам экономики и населению.

Неблагоприятное гидрометеорологическое явление (НГЯ) – явление, которое оказывает значительное влияние, затруднение или препятствует деятельности отдельных предприятий и отрасли экономики [23].

Наличие морского льда вызывает серьезную опасность при проведении всех видов работ в дрейфующих льдах и на припае. Состояние ледового покрова определяет степень безопасности и эффективности судоходства, морских операций, функционирования гидротехнических сооружений.

В общем случае величина воздействия ледяного покрова на объекты определяется количеством, сплоченностью и толщиной воздействующих льдов, параметрами скорости их движения, а также прочностью льда.

Ледовые воздействия не могут быть опасными и безопасными, они опасны только в той мере, в какой они воздействуют на конкретные объекты и влияют на выполнение определенных видов их работы. Они могут оказывать пассивное воздействие или активное воздействие на промышленные объекты, представляющие опасность для людей,

транспортных средств, гидротехнических сооружений, окружающей среды и работ.

Существует две категории потенциальных угроз производственной деятельности, обусловленных воздействием ледяного покрова:

- опасные ледовые явления (ОЛЯ) активных воздействий дрейфующих морских льдов, которые формируются динамическими факторами, возникают внезапно, действуют в ограниченном районе и в ограниченный период времени;
- неблагоприятные ледовые условия (НЛЮ) пассивных влияний дрейфующих льдов и припая определяются самим наличием ледяного покрова и состоянием, которое в основном формируется тепловыми факторами, возникают постепенно, существуют в обширном районе в течение продолжительного периода времени.

Негативное влияние ледовой обстановки и опасных ледовых явлений напрямую определяет уровень безопасности и обслуживания судоходных и транспортных операций, экономическую эффективность, качество морских мелководных платформ, трубопроводов и терминальной деятельности танкеров, непрерывную закупку топлива. Особое значение имеет разнообразное воздействие морского льда на безопасность и эффективность строительства гидротехнических сооружений. Каждый объект имеет свою специфику, в связи с чем, они по-разному реагируют на различные воздействия льда.

Успех в ледовом плавании во многом зависит, прежде всего, от толщины и сплоченности дрейфующих льдов, предельных параметров, которые соответствуют типу и ледовому классу судов [23].

Большое количество времени можно потратить на то, чтобы судно могло справиться с грядями торосов. Поэтому торосы на дрейфующих льдах снижают экономическую эффективность грузовых перевозок примерно пропорционально их концентрации.

В проливах и берегов весьма редко возникает сильный локальный поток льдов («ледовая река»), который может затруднить маневренность судна и создать аварийную ситуацию.

Наиболее существенное снижение эффективности грузовых перевозок связано со сжатием льдов. Как правило, средняя эксплуатационная скорость судна снижается из-за длительных сжатий льдов при следовании по маршруту. При сильных сжатиях происходит большинство повреждений судов, создаются аварийные ситуации и в редких случаях даже гибель судов.

Анализ характерных влияний ледяного покрова замерзающих морей на судоходство и воздействие льдов на инженерные сооружения позволяет выделить опасные ледовые явления (табл. 10.1) и неблагоприятные ледовые условия (табл. 10.2). Данные таблицы постоянно пополняются при появлении новых сооружений.

Таблица 10.1. Перечень опасных ледовых явлений.

Ледовые явления	Потенциальная опасность
Сильные сжатия льдов	Аварийные ситуации, повреждение судов и надводных сооружений.
Интенсивный дрейф льда, включая «ледовую реку»	Аварийная ситуация для судов в связи с потерей маневренности.
Облипание корпуса судна	Снижение скорости движения судов вплоть до полной остановки. Аварийные ситуации.
Обледенение судна, гидро-технического сооружения	Потеря устойчивости судов. Статические напряжения на элементах инженерных конструкций.

Таблица 10.2. Перечень неблагоприятных ледовых условий.

Ледовые явления	Потенциальное воздействие на эффективность
Состояние дрейфующих льдов (большая толщина и др.)	Непосредственное влияние на эксплуатационную скорость движения транспортных судов.
Слабые и средние сжатия льдов	Уменьшение эксплуатационной скорости движения транспортных судов.
Последствия напора льдов, дробления и нагромождения льдов	Блокирование дроблеными льдами подходов к терминалам и проходов судоходных каналов.
Поздние сроки сохранения льдов на акватории	Позднее начало безледокольного плавания, строительных или ремонтных работ. Малая экономическая эффективность работ.
Ранние сроки начала ледообразования	Раннее окончание безледокольного плавания, строительных или ремонтных работ. Малая экономическая эффективность работ.

Для того чтобы минимизировать воздействие на лед, функционирование морской транспортной системы на эксплуатационном этапе необходимо организовать систему специализированного мониторинга и прогнозирования ледовой обстановки. Мониторинг ледового покрова обеспечивает регулярный сбор, обработку, анализ и распространение текущей информации о ледовой обстановке в районе терминала и маршруте движения судна для обеспечения безопасности судоходства и швартовых операций, а также экологической безопасности акватории в этом районе [23].

Ледяные образования (большие по площади многолетние льды, гряды торосов, стамухи, айсберги и др.) могут оказывать опасное и негативное воздействие на различные виды производственной деятельности. Например,

если есть айсберги и их обломки, то существует возможность возникновения аварийной ситуации, когда айсберги сталкиваются с судами, надводными и подводными сооружениями.

В арктических морях плавание судов располагает основными трудностями, которые вызывает ледовый покров, то есть существует необходимость его преодоления. Состояние дрейфующих и припайных льдов описано рядом характеристик ледового покрова, которые наиболее существенно влияют на эффективность и безопасность плавания во льдах.

К числу таких характеристик относятся следующие:

- сплоченность ледяного покрова и его возрастной состав,
- толщина льда,
- формы льда (горизонтальные размеры льдин),
- торосистость ледяного покрова,
- сжатия в ледяном покрове.

Далее их нужно разобрать по отдельности, чтобы понимать, что именно следует использовать для анализа Карского моря и моря Лаптевых. *Сплоченность льда.* В летний период распределение сплоченности льда имеет решающее значение при выборе оптимального варианта плавания. Конкретные значения сплоченности ледяного покрова часто используются в качестве критерия условий ледокольного обеспечения. В зимний период динамики в данной величине практически нет, поэтому ее значения, зафиксированные спутниковыми системами, достаточно хорошо согласуются с данными судовых наблюдений. В весенний, а затем и в летний период происходит увеличение неравномерности распределения ледяного покрова, что приводит к заметному расхождению между значениями сплоченности, зафиксированными спутниками и наблюдаемыми именно на пути плавания судна.

В зимний и весенний сезоны, когда практически вся поверхность арктических морей покрыта льдом, решающее значение имеет количество молодых льдов. По степени влияния на скорость движения судна количество

молодых форм льда в зимне–весенний период аналогично количеству чистой воды между льдами в летний период.

Толщина льда. В зимний период, когда преобладающая сплоченность льда в арктических морях составляет 9–10 и 10 баллов, решающее значение для успеха морской операции имеет распределение толщины льда (возрастная характеристика) на пути движения судна. Толщина льда наряду со сплоченностью является одной из важнейших характеристик ледяного покрова, оказывающей существенное влияние на сопротивление льдов движению судна. В холодный период года важной навигационной характеристикой является также высота снежного покрова. Установлено, что влияние снежного покрова на движение судна проявляется тем сильнее, чем больше толщина льда и меньше скорость движения судна.

Торосистость льда. Наличие торосистых образований – характерная особенность морских льдов. Торосистые образования оказывают существенное влияние на движение судна во льдах, являясь серьезным препятствием для судоходства. Обработка материалов судовых наблюдений, проведенных в зимне–весенний период, показала, что вероятность совпадения торосистости, зафиксированной в пределах горизонтальной видимости и непосредственно по курсу движения, уменьшается с увеличением значения торосистости, что связано с возможностью избирательного движения судна. Значения торосистости в летний период, по данным разных видов наблюдений, близки между собой, что обусловлено таянием и разрушением участков более тонких и ровных льдов.

Как показывают наблюдения, грядовая торосистость характерна для припайных льдов, особенно для их областей, около кромки льда (так называемые барьеры торосов). В дрейфующих льдах арктических морей грядовая торосистость выражена менее ярко. Отмечается неоднородная торосистость (своеобразные «пятна» торосистых образований) без ярко выраженных геометрической формы и образований на морской поверхности.

Сочетание геометрических и площадных параметров торосистых образований дает возможность достаточно точно оценивать их влияние на скорость судна во льдах.

Разрушенность льда. Это такая 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. Раздробленность ледяного покрова. В осенне–зимний и весенний периоды, когда преобладающая сплоченность дрейфующего льда составляет 9–10 баллов, важной навигационной характеристикой является раздробленность льда, которая характеризует интенсивность динамических процессов, происходящих в ледяном покрове [24].

Данные натурных наблюдений свидетельствуют о том, что льдины существенно влияют на скорость движения судов. При других равных условиях минимальные значения скорости наблюдаются при движении в гигантских (больших) ледяных полях, а максимальные – по мелкому и тертому льду. Эти различия обусловлены взаимодействием корпуса судна с льдинами различных горизонтальных размеров.

Сжатия льда. Сжатие льда является одной из основных характеристик, определяющих условия плавания в замерзающих морях, особенно в зимний период. Наиболее существенно они проявляются при плавании во льдах сплоченностью 9–10, 10 баллов и толщиной более 70 см. Сжатия приводят к неблагоприятным условиям плавания, часто оказываются причиной вынужденного дрейфа судов, ледовых повреждений. Несмотря на то, что в Арктических морях преобладают ветровые ледовые сжатия, при

определенных условиях приливные сжатия оказывают значительное влияние на судоходство [25].

Нарушения сплошности ледяного покрова (НСЛ). Нарушения сплошности (разрывы, трещины, каналы) являются характерной особенностью ледяного покрова в зимний период. Они способствуют улучшению условий плавания. Формирование НСЛ начинается осенью, когда сморози льда становятся достаточно устойчивыми, а толщина льдов достигает 40–50 см. Наибольшее развитие и упорядоченность системы НСЛ получают в марте–мае. С началом таяния ледяного покрова происходит распад сморозей, и системы НСЛ нарушаются. Зимние плавания в Западном районе Арктики, а также летние в Арктическом бассейне подтверждают эффективность использования НСЛ при выборе оптимального варианта движения судна во льдах.

Заприпайные зоны молодых льдов. В период устойчивого формирования припая до его разрушения (взлома) выбор наиболее благоприятных вариантов плавания в арктических морях тесно связан с максимальным использованием заприпайных зон чистой воды или молодых (толщиной до 30 см) льдов.

Параметры припайных льдов. В настоящее время припай стал активной средой судоходства. Плавание в припае отличает ряд особенностей: оно связано с прокладкой ледоколами канала в припае, его обновлением и проводкой судов по нему. Установлено, что успешность плавания судов при выполнении этих операций зависит от толщины невзломанного припая на фарватере, степени его торосистости, высоты снега, разрушенности, количества включений остаточных льдов (в арктических морях) [25].

Существенная особенность ледяного покрова – неравномерность распределения его толщины – присуща и для припайных районов. Даже на коротких участках среднеквадратическое отклонение толщины припая может достигать 20 см в основном за счет неравномерного распределения высоты снега и физико–географических особенностей. Кроме того, припай не

является монолитной пластиной льда. Для него характерно наличие стационарных трещин и разломов. Их использование при прокладке канала существенно увеличивает эффективность работы ледокола.

Кроме того, процесс "жизни" припая, трещин и разломов может сопровождаться расхождением по ширине, соизмеримой с шириной корпуса ледокола, что впоследствии приводит к образованию ориентированных вставок, уменьшающих фоновую толщину льда.

3.2 Технологии составления навигационных рекомендаций с использованием спутниковой информации

Основным источником информации о распределении характеристик ледяного покрова в районах судоходства в настоящее время являются данные дистанционного зондирования Земли. Состав параметров ледяного покрова, получаемых посредством этих наблюдений, в основном зависит от способа регистрации и разрешающей способности диагностирующей аппаратуры спутниковой системы. Наибольший объем информации предоставляют спутники высоко разрешения, использующие радиолокаторы с синтезированной апертурой (SAR).

С использованием SAR достаточно хорошо определяются:

- общая сплоченность льда,
- возрастной состав ледяного покрова,
- формы льда (преобладающие горизонтальные размеры льдин),
- некоторые стадии таяния,
- наслоенность и торосистость,
- системы нарушений сплошности ледяного покрова и другие динамически активные зоны.

Однако спутниковые снимки высокого разрешения отличаются высокой стоимостью, и их использование в регулярном оперативном обеспечении судоходства в Арктике в настоящее время носит не

систематический характер. На практике основным источником данных о распределении характеристик ледяного покрова служат снимки со спутника с низким и средним разрешением видимого и инфракрасного диапазонов. Однако данный вид информации позволяет определить ограниченное число ледовых параметров:

- общее распределение ледяного покрова,
- сплоченность льда, зоны преобладания льдов различного возраста,
- положение крупных НСЛ (шириной более 500 м),
- наличие обширных и гигантских ледяных полей сморози льда.

Таким образом, параметры ледяного покрова, необходимые для выбора оптимального варианта плавания судна во льдах, можно условно разделить на две группы: уверенно регистрируемые и регистрируемые с недостаточной точностью (или не регистрируемые вовсе) современными средствами спутникового дистанционного зондирования.

К первой группе относятся:

- общая сплоченность ледяного покрова;
- возрастной состав ледяного покрова;
- формы (горизонтальный размер) ледяного покрова;
- ориентация нарушений сплошности ледяного покрова (разрывов, разводий, каналов, трещин) в зимний период в замерзающих морях и в летний период в Арктическом бассейне.

Ко второй группе относятся:

- толщина ровного льда,
- торосистость ледяного покрова,
- сжатия льдов,
- разрушенность ледяного покрова.

В наиболее полной мере учет влияния характеристик ледяного покрова осуществляется в процессе специализированного гидрометеорологического

обеспечения (СГМО) судоходства во льдах при разработке навигационных рекомендаций. Навигационные рекомендации представляют собой научно обоснованную интерпретацию всей имеющейся полезной гидрометеорологической информации, способствующую принятию судоводителем оптимального решения.

В настоящее время составление навигационных рекомендаций осуществляется в виде следующих процедур:

- выбор оптимального варианта плавания (стратегический выбор пути),
- непосредственный выбор пути движения судна во льдах при движении по оптимальному варианту (тактический выбор пути).

Неравномерное распределение льда на поверхности моря и изменчивость его распределения во времени позволяют выбирать различные варианты навигации в одном и том же районе (рис.11). Выбор оптимального варианта плавания судов во льдах является важнейшим элементом СГМО морских операций на трассе СМП и в замерзающих морях [24].

В ААНИИ сформулирован общий принцип выбора оптимального пути. Он предусматривает, что движение осуществляется по кратчайшему пути через зоны, которые характеризуются следующими особенностями:

- минимальной общей сплоченностью;
- максимальными количеством молодых форм льда (в осенне–зимний) и разрушенностью льда (в весенне–летний период);
- минимальной торосистостью и повышенной раздробленностью льда;
- преобладающей ориентацией нарушений сплошности ледяного покрова (разрывы, трещины, каналы), совпадающей с генеральным курсом движения каравана;

- глубиной, соответствующей требованиям безопасности плавания для данного судна.

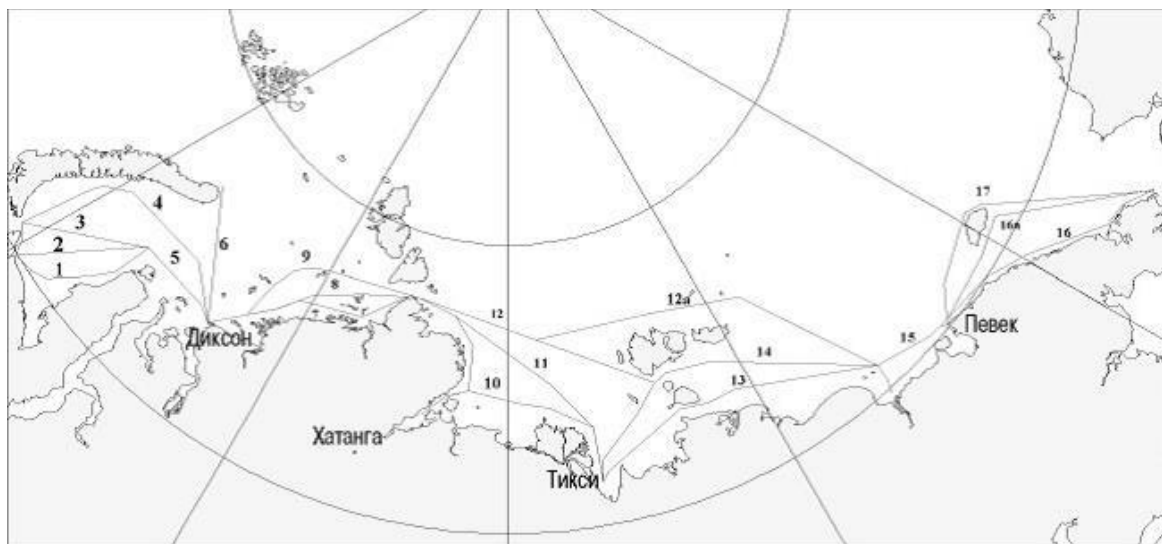


Рисунок 11. Возможные (стандартные) варианты плавания по трассе Северного морского пути в летний период.

Помимо перечисленных показателей, при выборе варианта плавания учитываются метеоусловия (в основном видимость и ветер), а также явления в ледяном покрове, оказывающие существенное влияние на эффективность плавания (сжатия, облипание корпуса и т.д.) [24].

Установлено, что в период формирования ледяного покрова (ноябрь – декабрь) плавание судов осуществляется в молодых льдах обычными навигационными курсами по кратчайшему расстоянию. Решающее влияние на ледовое плавание в этот период оказывают сжатие льда и облипание корпуса судна. На следующем этапе зимне–весенней навигации (январь – май) пути плавания судов ориентируются на зоны формирования заприпайных полыней. В этот период выбор оптимального варианта плавания, в целом, определяется:

- положением кромки дрейфующих льдов,
- степенью развития заприпайных полыней,
- распределением динамически активных зон (сжатий или нарушений сплошности ледяного покрова) в ледяном массиве.

Составление навигационных рекомендаций предполагает предварительное выполнение следующих этапов работы:

- А. Прием снимка ИСЗ, анализ информативности снимка, его обработка, географическая привязка;
- В. Дешифрирование снимка ИСЗ, составление карты фактического распределения ледяного покрова;
- С. Составление прогностической карты распределения ледяного покрова с заданной заблаговременностью.

Основой технологии АРМ «Навигационные рекомендации» служат следующие положения:

- основным источником ледовой информации являются данные дистанционного зондирования с искусственных спутников Земли,
- в качестве программной среды АРМ используется географическая информационная система (ГИС),
- расчет характеристик движения судна осуществляется с учетом прогнозируемого перераспределения ледяного покрова в период проведения морской операции.

Технология выбора оптимального пути плавания во льдах включает в себя следующие процедуры [25]:

- определение (нанесение на прогностическую ледовую карту) возможных вариантов маршрутов плавания судна;
- автоматический анализ состояния ледового покрова по каждому выбранному пользователем маршруту (обеспечение входными ледовыми данными блока моделирования движения судна);
- расчет скорости движения и общих затрат времени на плавание каравана по каждому варианту плавания (с использованием эмпирических или аналитических моделей движения судов во льдах);

- выбор оптимального варианта плавания в соответствии с установленными критериями;
- представление результатов расчетов, характеристик ледовых условий, эксплуатационных и экономических показателей движения судов.

Наряду с информацией о ледовой обстановке, в качестве отдельных слоев заносятся другие необходимые для дальнейшего моделирования данные о природных условиях района плавания (безопасные глубины и др.), которые могут быть использованы в качестве дополнительной информации, используемой в расчетах. Важное положительное свойство описываемой технологии составления навигационных рекомендаций состоит в возможности адаптации вычислительных алгоритмов практически к любой конфигурации морской транспортной системы и любым внешним условиям.

Многолетний опыт плавания в арктических морях определил основные варианты маршрутов, на которых могут формироваться благоприятные для судоходства ледовые условия. Эти маршруты в настоящее время имеют хорошее гидрографическое обеспечение и являются рекомендованными (стандартными) трассами (рис. 12а). Их расположение зависит от сезона, связано с гидрографическими особенностями каждого района, может изменяться в зависимости от типа судов, осуществляющих перевозки. Однако решающим фактором, определяющим маршрут плавания, как по определенным участкам, так и в целом по СМП, являются особенности состояния и распределения ледяного покрова [26].

В официальных документах, регламентирующих судоходство во льдах, четкого определения понятия “наилегчайший путь” не приводится (рис. 12б). Это позволяет каждому потребителю осуществлять выбор наиболее благоприятного варианта движения во льдах, сообразуясь с наличием информации (текущей и прогностической), состоянием судна (судов в караване), другими объективными и субъективными факторами.

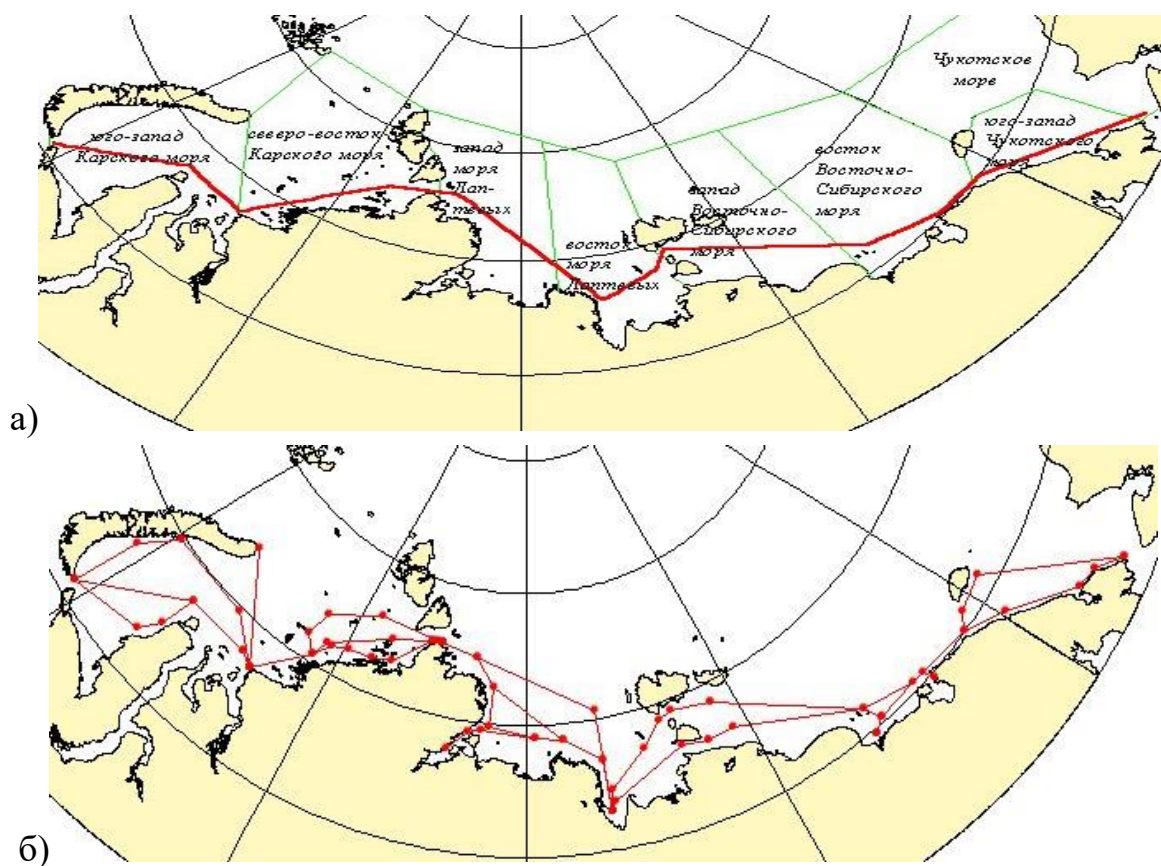


Рисунок 12. а) Схема трассы СМП;

б) Схема примерных вариантов оптимальных трасс плавания.

Для выбора наилегчайшего пути обычно используют следующие критерии [27]:

1. Ограничения по осадке, которые должны предусматривать возможность использования для проводки судов атомных ледоколов типа “Арктика” (с осадкой 11м более).
2. Оптимальное сочетание характеристик состояния ледяного покрова, выработанное опытом ледового плавания и практикой его научно–оперативного обеспечения (минимальная сплоченность, максимальная разрушенность и т. д.).
3. Минимум расчетных затрат времени благодаря движению по кратчайшему расстоянию в легких ледовых условиях в обход зон тяжелого льда.
4. Положение портов (пунктов), между которыми осуществляется плавание, кроме транзитного плавания, которое подразумевает

сквозное плавание от западной до восточной границы трассы СМП без заходов в арктические порты (пункты).

5. Для каждой декады наилегчайший путь отражает особенности распределения льда именно в эту декаду данного месяца и года.

Наиболее благоприятный вариант пути при сквозном плавании по СМП на самом западном его участке (рис. 13а) в июне и июле, чаще всего проходит через проливы Карские Ворота и Югорский Шар, а в сентябре и октябре – вокруг мыса Желания (повторяемость 55–80 %). В августе использование указанных вариантов практически равновероятно. Далее на восток наиболее благоприятный вариант пути проходит по проливу Вилькицкого (повторяемость 95–100 %).

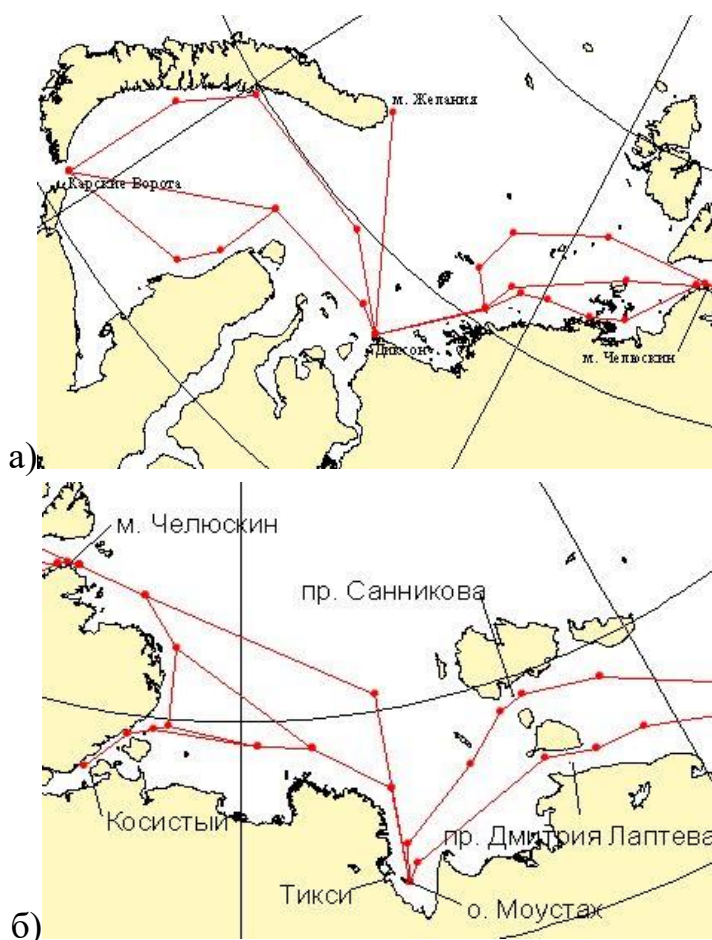


Рисунок 13. Возможные пути плавания.

а) в Карском море; б) в море Лаптевых.

Положение наиболее благоприятного варианта пути в море Лаптевых (рис. 13б) и в районе Новосибирских островов имеет значительные сезонные

изменения. До начала интенсивного разрушения льда Таймырского ледяного массива наиболее благоприятный вариант пути проходит по южной периферии этого массива (повторяемость 55–90 %), а в августе – октябре через массив (повторяемость 65–90 %). В июле использование указанных вариантов практически равновероятно.

Арктические регионы характеризуются самыми сильными и быстрыми климатическими изменениями – в последние десятилетия до 0,8 К/(10 лет) и более для среднегодовой приповерхностной температуры, и до 1 К/(10 лет) и более для среднесезонной [28].

Стремительное отступление арктических морских льдов в последние десятилетия является одним из самых заметных проявления глобального потепления и оказывает серьезное воздействие на развитие арктических морских транспортных систем и разведку шельфа [29]. Спутниковые наблюдения показывают быстрое сокращение ледового покрова Арктики во все сезоны года, причем наиболее сильные изменения происходят летом.

. Современная скорость приповерхностного потепления в Арктике существенно больше глобальной и полушарной скоростей. Наиболее впечатляющие изменения связаны с быстрым уменьшением ледовитости Арктического бассейна, особенно в конце лета – начале осени. Это свидетельствует о возможной перспективе отсутствия морских льдов в Арктическом бассейне в летне–осенние месяцы уже в первой половине XXI в. Изменение режима распространения морских льдов в Арктике имеет большое значение в связи с перспективой развития арктических морских транспортных систем и освоением шельфа [30].

Сильные и быстрые изменения арктического климата требуют всесторонних исследований их причин с оценкой роли естественных и антропогенных факторов. Значительная неопределенность оценок климатических изменений в арктических регионах связана с сильной климатической изменчивостью в высоких широтах. На фоне долгопериодных

тенденций проявляются существенные межгодовые и междесятилетние вариации температурного и ледового режимов.

В связи с ожидаемым увеличением доступности судоходной навигации в окраинных морях Северного Ледовитого океана и повышением перспектив использования арктических транспортных систем в сопоставлении со спутниковыми данными необходимы оценки способности современных климатических моделей адекватно отражать изменения режима морских льдов, в частности, для Северного морского пути (СМП). При этом оценки возможных изменений, разумеется, должны зависеть от возможных сценариев естественных и антропогенных воздействий, требований для максимальной степени покрытия акватории льдом, различных для судов разного ледового класса [31].

Выводы:

При анализе были выявлены главные критерии для оценки ледовых явлений в целях составления маршрутов для судов. Так как в 1 главе рассматривались специфичные ледовые характеристики для исследуемых морей, то следует сопоставить информацию об основных опасных гидрометеорологических явлениях, которые неблагоприятно влияют на судоходство. Состояние описывается рядом характеристик ледового покрова, которые наиболее существенно влияют на эффективность и безопасность плавания во льдах.

Для создания навигационных рекомендаций с использованием данных дистанционного зондирования действительны следующие критерии:

- общая сплоченность ледяного покрова;
- возрастной состав ледяного покрова;
- формы (горизонтальный размер) ледяного покрова;
- ориентация нарушений сплошности ледяного покрова (разрывов, разводий, каналов, трещин) в зимний период в замерзающих морях и в летний период в Арктическом бассейне.

- толщина ровного льда,
- торосистость ледяного покрова,
- сжатия льдов,
- разрушенность ледяного покрова.

Так же были рассмотрены стандартные и оптимальные маршруты по трассе Северного морского пути в целом, и по исследуемым морям отдельно. Данная информация потребуется для оценки состояния льда и выборки возможных маршрутов.

4 Исследование возможных путей для судоходства в Карском море и море Лаптевых по подготовленным картам ледовой обстановки

Исходя из проведенного анализа оптимальных маршрутов по трассе СМП и опасных ледовых явлений, которые отмечаются в отдельных районах исследуемых морей, был выбран их усредненный вариант для дальнейшей работы. Это позволит визуально отметить участки на картах, которые можно использовать для прогнозирования плавания.

В качестве исходных материалов были использованы данные сканирующего радиометра AMSR-2 за летний период 2016–2020 гг. Данная спутниковая система предоставляет информацию о концентрации морского льда на поверхности океана в микроволновом диапазоне, что позволяет осуществлять мониторинг Арктического региона без потери информации. Для исследования локальных объектов были использованы спутниковые изображения видимого диапазона, так как их пространственное разрешение позволяет детальнее произвести оценку. Но, из-за частых неблагоприятных условий в виде облачности над исследуемыми участками, информацию видимого диапазона удастся использовать намного реже.

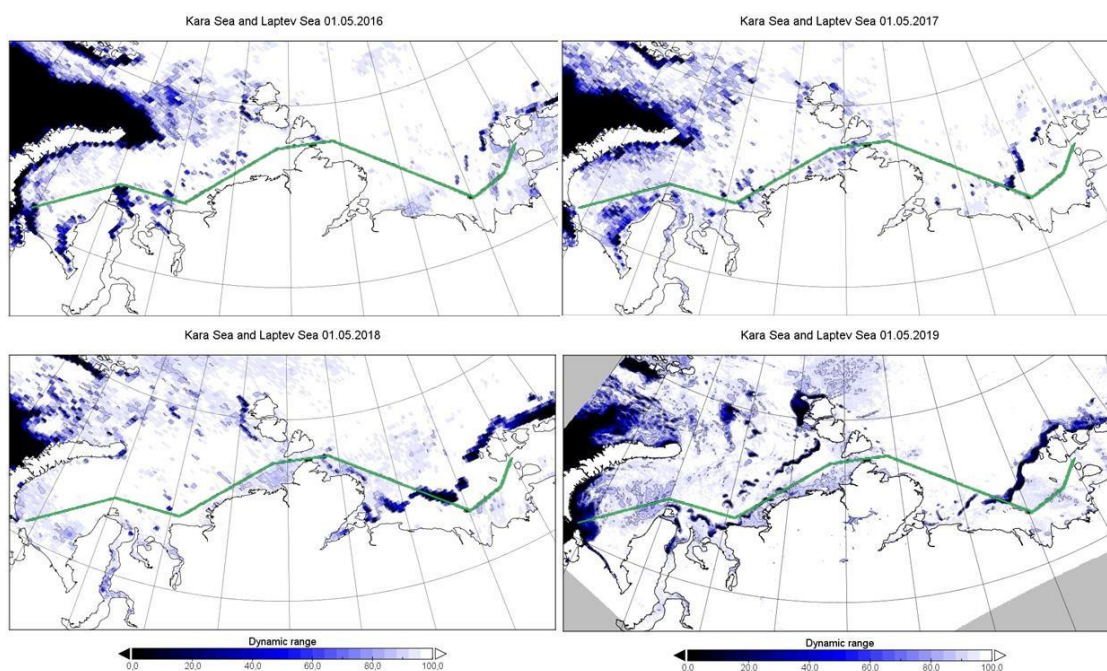


Рисунок 14. Карты сплоченности льда, AMSR-2, май 2016-2019 гг.

Летняя навигация, в среднем, в Карском море начинается с конца июня–начала июля, а в море Лаптевых с начала июля–конца июля. Для сравнения первым месяцем был выбран май (рис. 14), чтобы отследить насколько проявляется динамика в таянии льда. При визуальной оценке ледовой обстановки в исследуемых морях, можно сделать вывод, что до 2019 года в обоих морях преобладает максимальная сплоченность льда, что отмечается преимущественно белым цветом. Данную характеристику можно рассчитать (табл. 11), построив гистограмму яркостных значений пикселей, но, стоит отметить, что из-за низкого пространственного разрешения существует погрешность при расчетах.

Таблица 11. Значения сплоченности льда в мае по спутниковым данным AMSR-2.

Море\Год	2016	2017	2018	2019
Карское море	82 %	83 %	92 %	76 %
Море Лаптевых	96 %	95 %	85 %	87 %

С 2018 года в море Лаптевых открываются достаточно обширные участки открытой воды, которые отмечаются черным цветом (полное отсутствие льда), – заприпайные полыньи, которые свидетельствуют о дальнейшем разрушении льда на данных участках из-за увеличения теплообмена воды с атмосферой. Подобные участки можно использовать для осуществления навигации между ближайшими портами без ледокольной проводки, что с экономической стороны достаточно выгодно. Для этого были посчитаны расстояния от берега (рис. 15), где находятся открытые участки воды около Новосибирских островов, до толстого льда, который отмечается большими значениями по яркости пикселей, а по цвету – практически белым, как припай. За 3 дня произошло увеличение полыньи в 2 раза (с 26 км до 54 км), то есть, происходят процессы таяния льда в данных районах, что можно использовать при прогнозе начала ранней местной навигации.

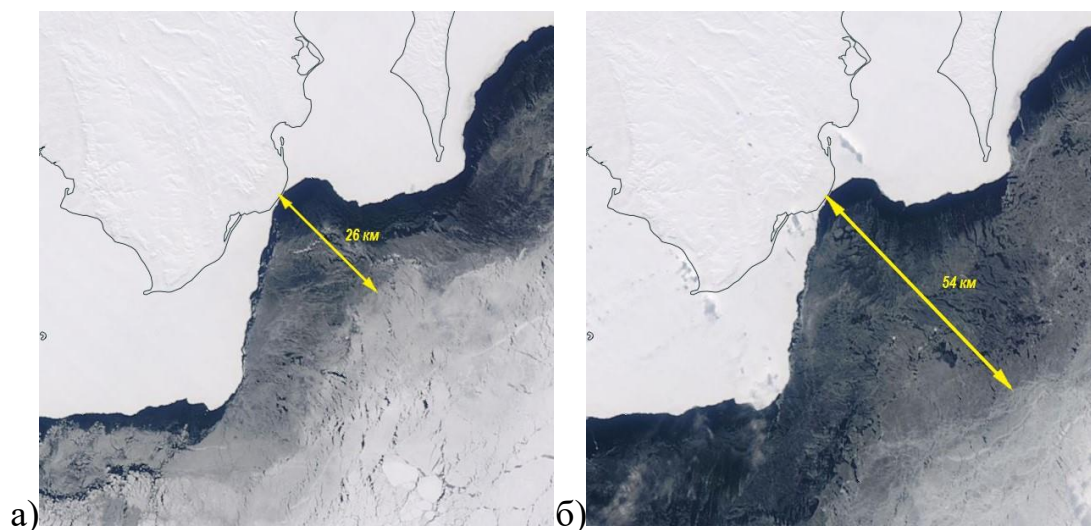


Рисунок 15. Заприпайная полынья в районе Новосибирских островов, Terra/Modis, 2 мая (а), 5 мая (б) 2019 года.

Но, следует учесть, что данный район за Новосибирскими островами является мелководным. Подобные районы являются неустойчивыми под влиянием гидрометеорологических факторов и представляют существенную проблему для передвижения судов вблизи архипелага, в особенности при подходе к северной части острова Бунге и острову Фаддеевский [32,33].

В Карском море ледовая обстановка начинает изменяться существеннее с 2019 года, где так же можно увидеть заприпайные полыньи и цвет

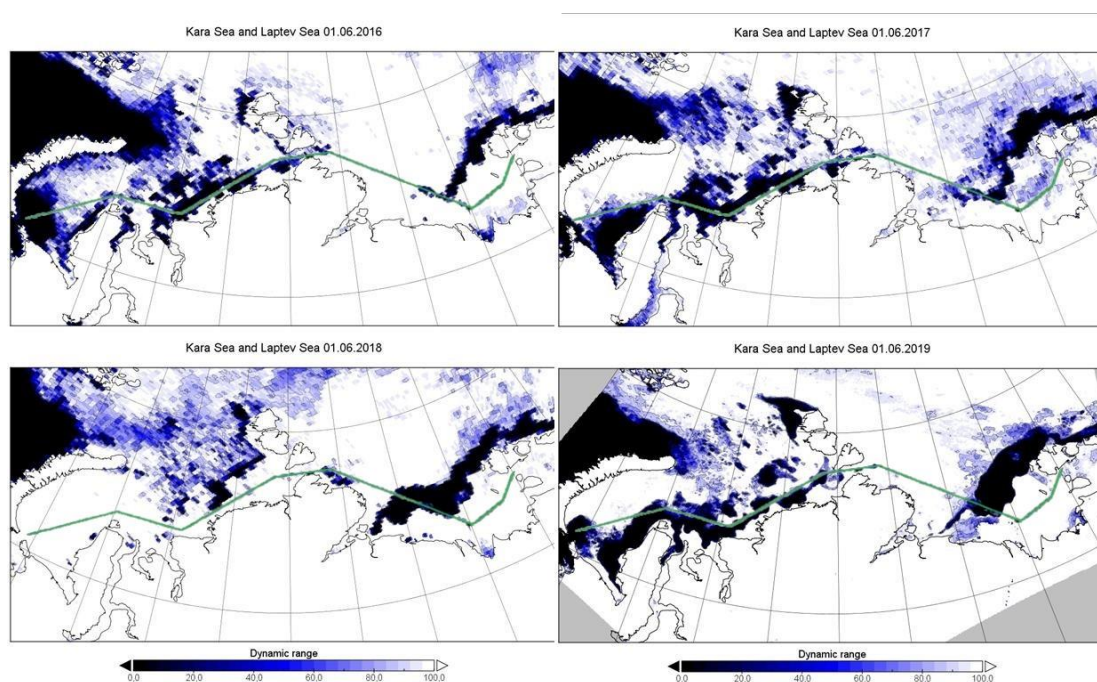


Рисунок 16 Карты сплоченности льда, AMSR-2, июнь 2016-2019 гг.

показаний сплоченности меняется в темную сторону, что говорит о более тонких видах льда или об участках морской воды полностью освобожденных ото льда.

Далее представлены карты сплоченности в самом начале июня (рис. 16). В Карском море значительно меняется обстановка, начинают преобладать открытые участки воды, которые проходят по центральной части и югу моря, кроме 2018 года. То есть, можно сделать вывод, что уже существует возможность передвижения судов по центральной и южной части Карского моря между действующими портами – Диксон и Саббета, используя уточняющие прогнозы метеорологических условий. Так как действие ветровых сил может способствовать, например, проявлению нажимного дрейфа, и дальнейшему осложнению передвижения морского транспорта. Это существенно осложняет навигацию утолщением льда.

В море Лаптевых обстановка практически не меняется, кроме открытия больших участков воды в полыньях. Транзитный проход судов через главные проливы между морями еще не безопасен из-за наличия припайных и дрейфующих льдов.

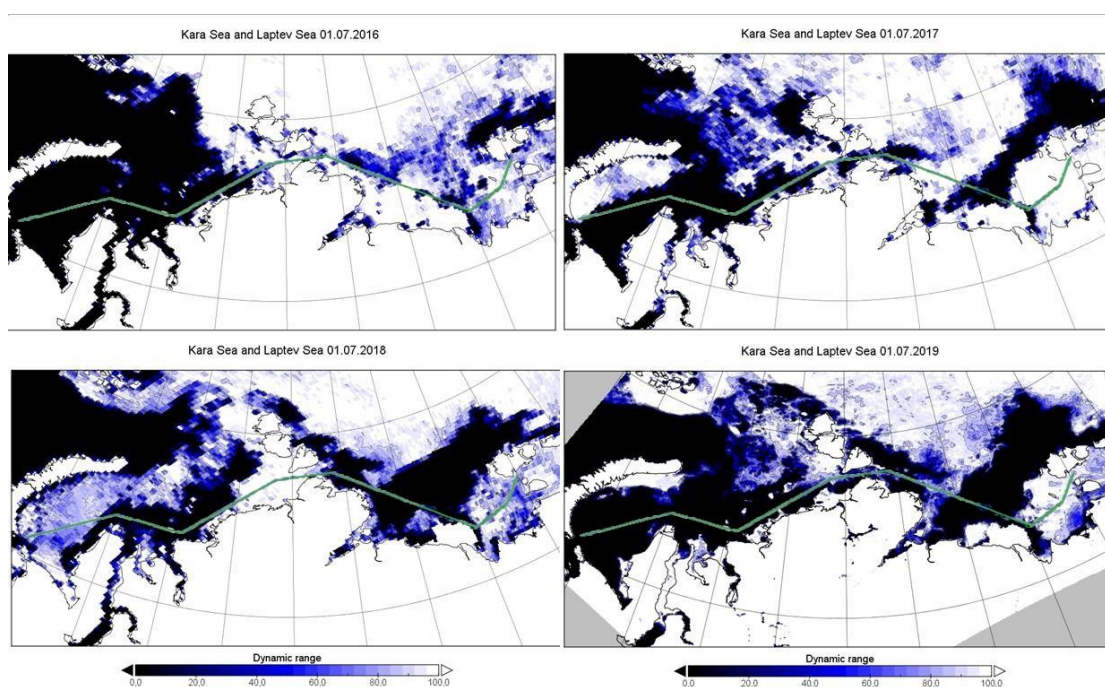


Рисунок 17. Карты сплоченности льда, AMSR-2, июль 2016-2019 гг.

В начале июля (рис. 17) в 2016 можно увидеть, что Карское море практически полностью освобождено ото льда, кроме района Северной Земли. Но в море Лаптевых абсолютно наоборот, практически вся акватория покрыта льдом разной сплоченности. При постепенном освобождении ото льда главных проливов – пролив Вилькицкого и Санникова, существует опасность заполнения их битым льдом в так называемые «ледовые реки». Для этого следует использовать снимки с более высоким разрешением, чтобы отследить площадь ледяных полей и их дрейф (рис. 18).

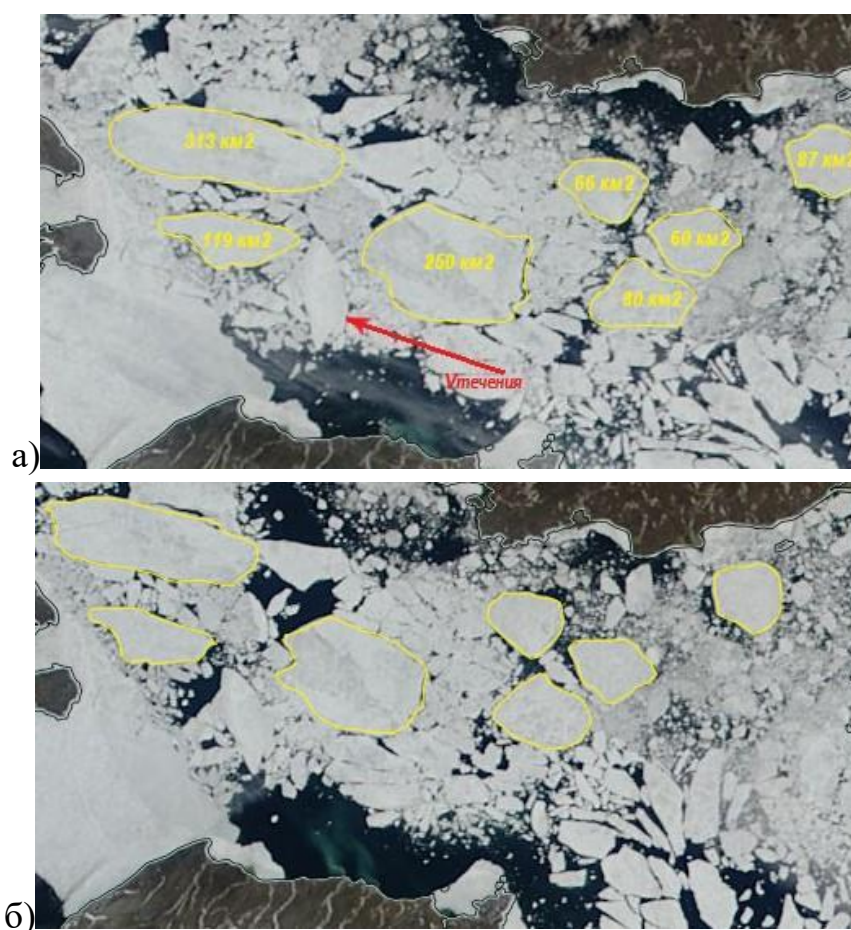


Рисунок 18. Дрейф ледяных полей в проливе Вилькицкого, Terra/Modis,
(а) 9, (б) 10 июля 2018 года.

На рис. 18 отмечены большие по площадной характеристике льдины и их перемещение за одни сутки из Карского моря в море Лаптевых через пролив Вилькицкого. Можно увидеть, что они постепенно разрушаются, из-за контакта между собой, на мелкие поля, создавая большую сплоченность. В данном случае, преимущественно, дрейф осуществляется за счет скорости

течения в проливе. Было выявлено, что за сутки практически все льдины переместились примерно на 15 км, то есть, их средняя скорость перемещения составляет 0,17 м/с.

В данном случае следует осуществлять контроль за положением плавучих льдов с учетом прогноза характеристик ветра для определения скорости и направления дрейфа льдов в районе планируемых перевозок [34].

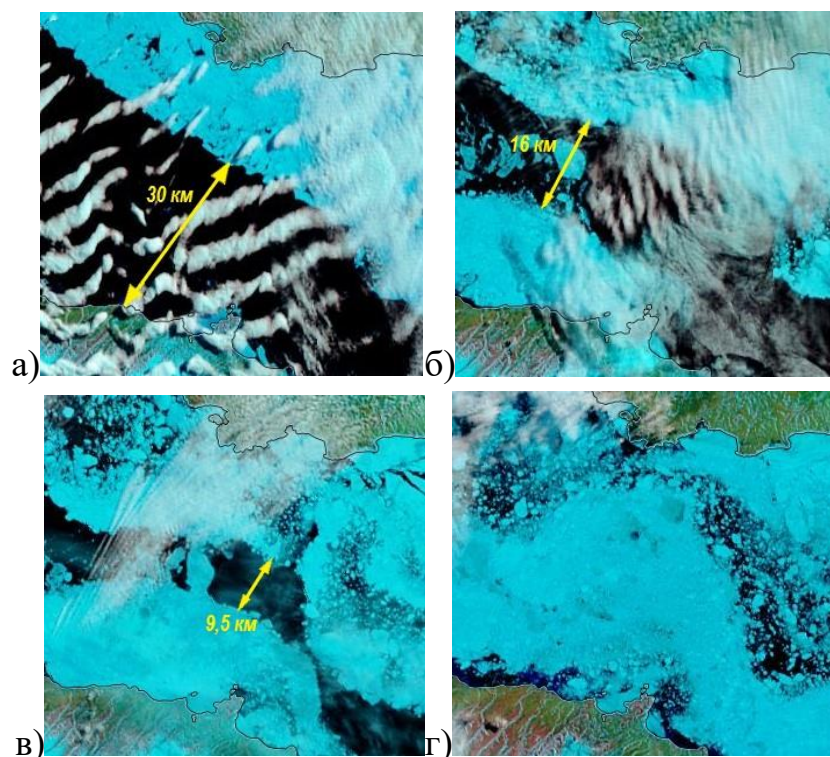


Рисунок 19. Сжатие ледяных полей в проливе Вилькицкого, Terra/Modis, каналы 7-2-1, а) 7, б) 9, в) 10 и г) 13 июля 2016 года.

На рис. 19 показан случай, когда при действии сильных по скорости ветров произошло сжатие льда в проливе Вилькицкого. В данном случае используется комбинация каналов 7–2–1 спутниковой системы Terra/Modis. Так как в период, когда есть снежный покров и лед (голубой) сложнее отличить облачные структуры (белый). Зона, где произошло сжатие льдов, сократилась за 4 дня с открытого участка шириной 30 км до полностью сплоченного льда. Это объясняется тем, что над северной частью моря Лаптевых образовался полярный циклон, который существовал 2 дня, и его обрушение произошло в восточной части моря. Зона пролива оказалась в

зоне сгущения изобар низкого атмосферного давления на приземных метеорологических картах (рис. 20), где отмечаются максимальные скорости приводного ветра (до 10 м/с). Исходя из этого, можно сделать вывод об опасности данного явления, так как сроки его существования практически невозможно спрогнозировать.

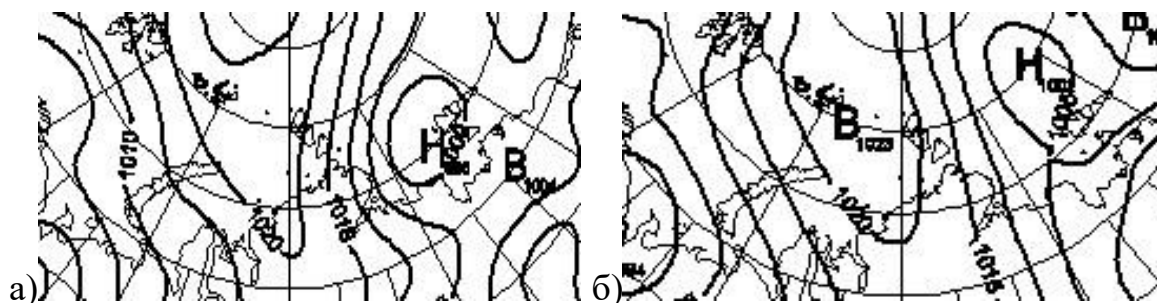


Рисунок 20. Приземные метеорологические карты ААНИИ, 11-12 июля 2016.

Участки Карского моря и моря Лаптевых, которые находятся вблизи архипелага ледников Северной Земли, где при таянии образуются айсберги, являются наиболее трудными для судоходства в летнюю навигацию [35].

Происходящее изменения в климате оказывает влияние на возникновение трещин в шельфовых ледниках, где образуются айсберговые обломки и куски. Несмотря на таяние ледников, существует угроза дрейфа других уже существующих айсбергов в районах ледника, сталкиваясь с его оконечностями с дальнейшим разделением его на меньшие по размеру айсберги. Описанные опасные явления можно отследить, используя спутниковую информацию высокого разрешения для определения толщины айсберга, чтобы оценить его дрейф под действием течений на пути прохождения судов. Необходимо учитывать погрешность при расчетах из-за пространственного разрешения спутниковых систем, и показатели наклона Солнца при съемке, так как полярные районы имеют определенную специфику с продолжительным временем нахождения Солнца над и ниже линии горизонта.

Для упрощения расчетов стоит воспользоваться данными дистанционного спутникового зондирования при съемке в надир, что значительно упрощает задачу при исследовании полярных широт. При

использовании информации о высоте Солнца в момент съемки, и рассчитав длину тени от айсберга на поверхности более тонкого прилегающего льда, появляется возможность получить значения надводной части айсберга:

$$h_i = nrtg\alpha ,$$

где n – количество пикселей длины тени, r – пространственное разрешение спутника, α – угол наклона Солнца в момент съемки [36].

Результаты детального анализа спутниковых данных показали, что в июле до 2019 года существовала не простая ледовая обстановка. При осуществлении транзитной навигации между морями необходимы дополнения в виде оперативных данных по метеорологическому прогнозу и ледовых карт Северного Ледовитого океана.

В августе (рис. 21) до 2018 года в море Лаптевых можно увидеть наличие районов с высокой сплоченностью льда, где должно проводиться интенсивное судоходство. Но, начиная с 2018 года, море освобождается от ледяного покрова, кроме пролива между морями. Карское море к этому времени уже полностью очищается.

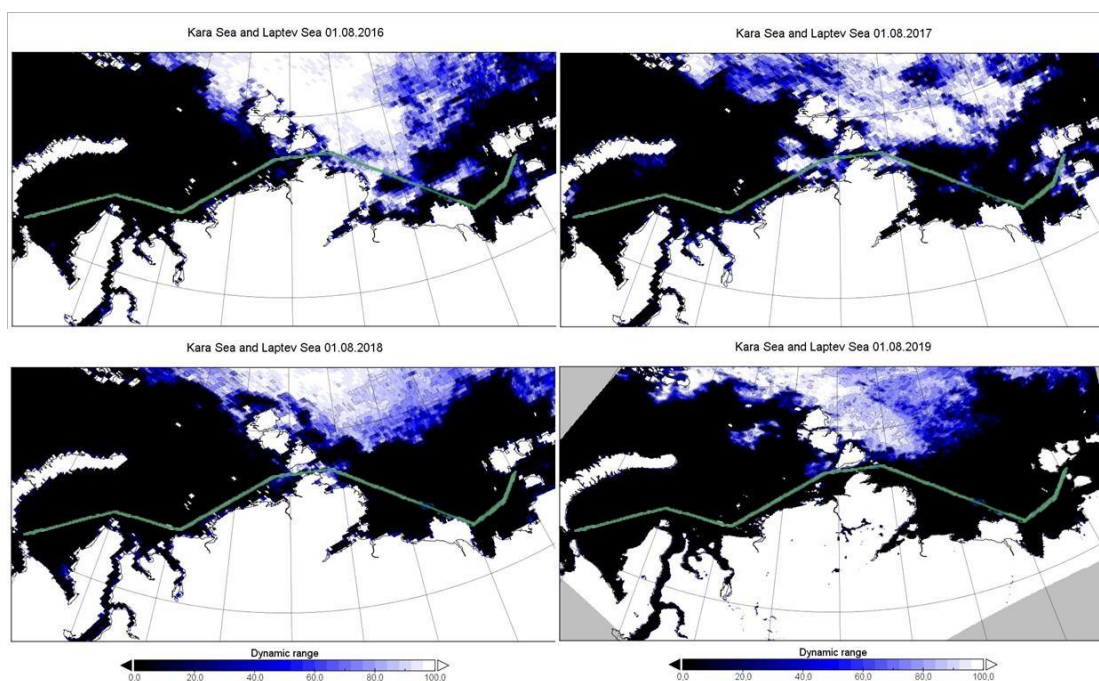


Рисунок 21. Карты сплоченности льда, AMSR-2, август 2016-2019 гг.

В сентябре (рис. 22) происходит практически полное очищение ото льда морей, кроме северных районов, где не осуществляется судоходство. Но, можно отметить, что при затоках холодных воздушных масс с севера на относительно теплую поверхность Карского моря, существует возможность возникновения мезомасштабных полярных циклонов. Подобные явления достаточно редко встречаются в летний период [2]. Они сопровождаются большим количеством осадков и высокими скоростями ветра, что приводит к потере остойчивости судна или его обледенению. Так же были выявлены подобные явления не только в районе исследования, но и в соседних морях, так как при анализе спутниковых данных получилось выявить перемещение циклона, который зародился севернее, на границе кромки льда, и перемещался в течение двух суток в юго–западном направлении вдоль Новой Земли. Далее направление ветра сменилось, и заполнение циклона произошло в южной части Карского моря, пройдя через Карские ворота, где осуществляется интенсивное судоходство [2].

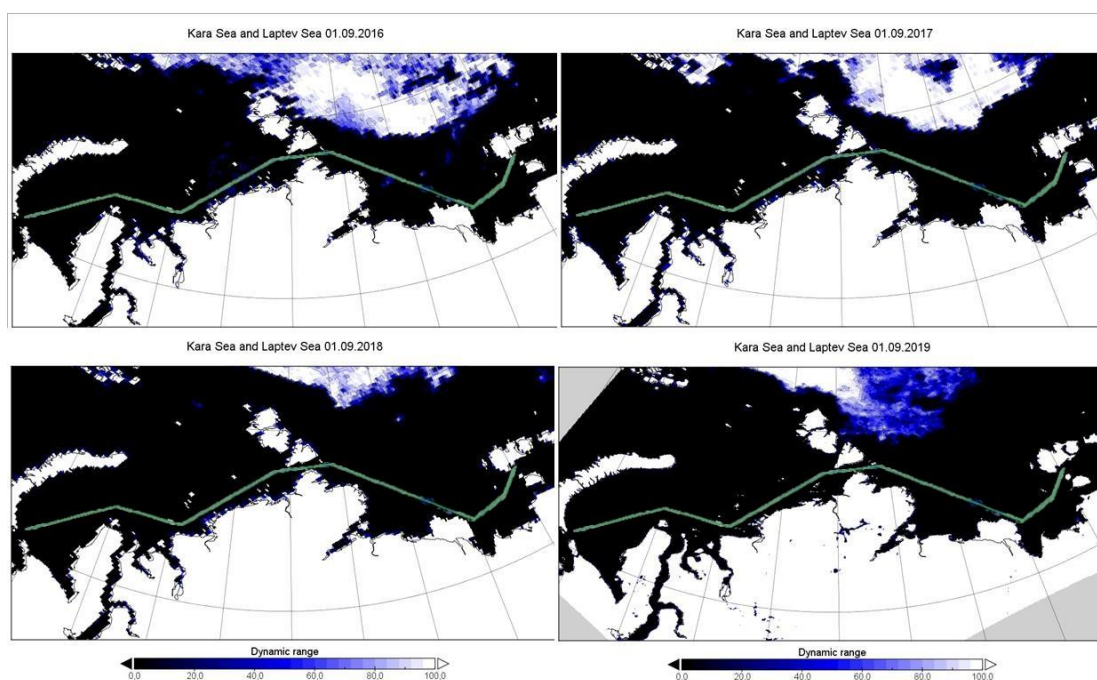


Рисунок 22. Карты сплоченности льда, AMSR-2, сентябрь 2016-2019 гг.

Для дополнительной оценки ледовой обстановки был рассмотрен период октябрь–ноябрь. Практически до конца октября открытые участки водной поверхности сохраняются. С начала ноября (рис. 23) море Лаптевых

покрывается слоем толстого льда, где уже не безопасно производить плавание без ледокольной проводки. В Карском море в 2016 и 2018 годах была практически полностью открытая акватория с отдельными участками молодого льда в центральной части и районах Северной Земли. В 2017 и 2019 годах можно увидеть достаточно сложные для судоходства условия в виде существенного роста льда практически по всей акватории, кроме южной части.

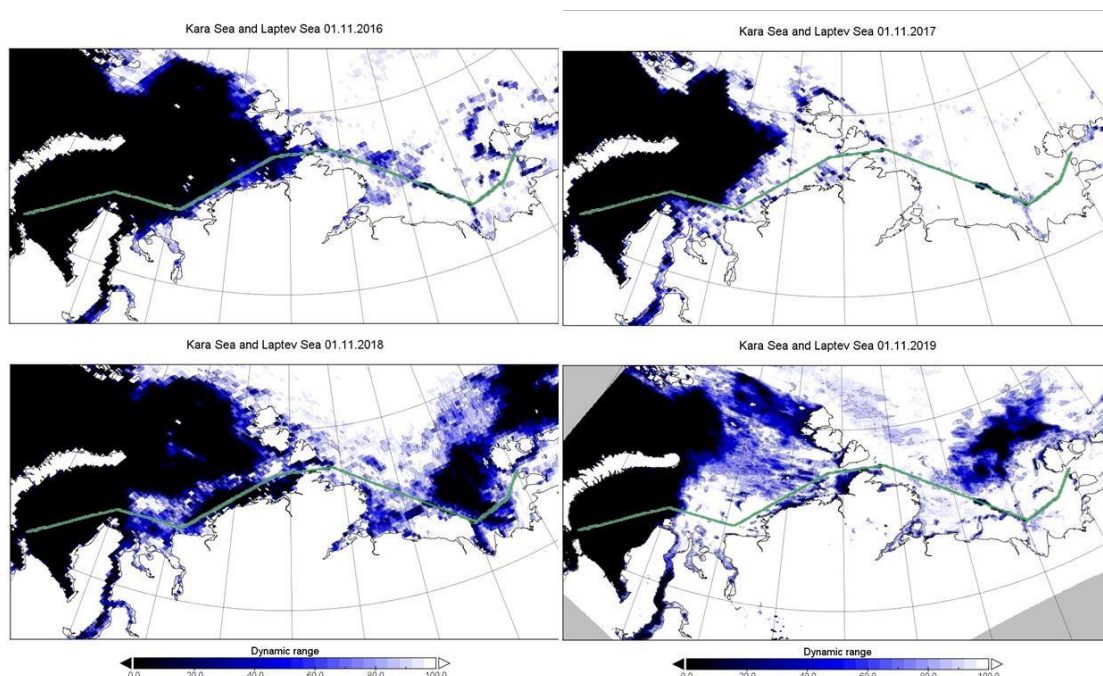


Рисунок 23. Карты сплоченности льда, AMSR-2, ноябрь 2016-2019 гг.

Исходя из проведенного анализа спутниковых данных, была построена карта с рекомендациями, в какой месяц и в каком районе исследуемых морей существует благоприятная обстановка для прохождения морского транспорта без ледокольной проводки (рис.24).

На карте каждый месяц суммируется по районам с предыдущим, начиная с мая, что открывает большие участки для передвижения судов. Можно увидеть закрашенный район пролива Вилькицкого (окрашен в голубой цвет), который полностью освобождается ото льда только к сентябрю. При использовании оперативных данных ледовой обстановки существует возможность прохождения судов, начиная с августа.

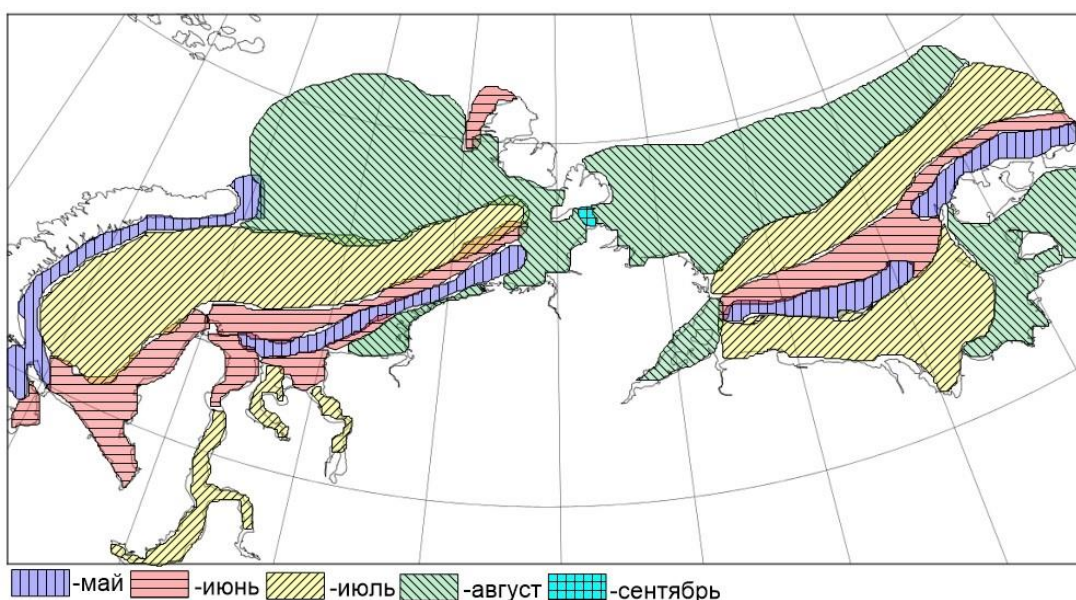


Рисунок 24. Карта возможных районов безопасного судоходства.

Расчет экономической выгоды. Полученные результаты можно использовать для расчета стоимости ледокольной проводки в акватории трассы СМП. Данная функция предоставляется на официальном веб-сайте Администрации Северного морского пути [37]. В качестве примера расчета, был выбран танкер ледового класса Arc 4. Данное судно может осуществлять самостоятельное плавание в разрежённых однолетних арктических льдах. В стоимость расчета входит валовая вместимость судна, ледовый класс, период навигации (зимне–весенний или летне–осенний) и количество зон (морей).

При прохождении судна в Карском море и море Лаптевых, не используя полученные в работе рекомендации, стоимость проводки будет равна в зимне–весенний период – 12 384 306, 16 руб. и 4 953 745, 56 руб. в летне–осенний.

При использовании рекомендаций в мае, ледокольную проводку в одном из морей можно не использовать, если грамотно рассчитать путь по участкам заприпайных полыней. В данном случае стоимость проводки снизится до 10 320 216, 64 руб., и, при аналогичной ситуации в июне, стоимость будет равна 4 128 063, 56 руб. В обоих случаях стоимость при

прохождении судна снизилась на 16,6 %. Полученный расчет действует до августа, так как только в этом месяце появляется возможность для транзитного прохождения морского транспорта через пролив между морями. Следовательно, далее, можно избежать проводки в исследуемых морях практически до ноября.

Выводы:

При анализе ледовой обстановки в летний период (май–ноябрь) за временной период 2016–2019 гг., была выявлена динамика в сокращении льда в Карском море и море Лаптевых. Ранее по общему количеству льда освобождается Карское море, где удалось выявить наиболее благоприятные районы для начала навигации между соседними портами с июня, используя участки заприпайных полыней в центральной части и южной части моря. Это можно объяснить существенным сокращением льда в Арктическом регионе за последние годы. В море Лаптевых был отмечен участок, где также может быть положено начало прохождения судов не ледового класса с мая – это Новосибирская заприпайная полынья.

В период, когда начинается осуществляться навигация в главных проливах, можно выявить опасное явление в виде «ледяной реки», которое опасно для судна процессами сжатия льда в отдельных участках, нагромождения его в мелководных районах.

Были выявлены опасные явления в виде полярных циклонов, из-за мезомасштабного протекания процесса, их сложно спрогнозировать и их воздействие может обширно влиять на состояние ледового покрова и его дрейф.

Используя уточняющие спутниковые снимки морской поверхности, были представлены рассчитанные характеристики изменения полыней, движения ледовых полей по проливам и расчеты их морфометрических характеристик в целях предоставления информации для корректировки используемых маршрутов по трассе СМП.

При использовании полученных в работе рекомендаций, была выявлена экономическая выгода при расчете стоимости ледокольной проводки по трассе СМП. Стоимость для прохождения судна снизилась на 16,6 %.

Заключение

В результате выполненной работы на основании поставленных целей были сделаны следующие выводы:

Карское море имеет более мягкий климат из-за влияния Атлантического океана. Ледовые характеристики предрасполагают к практически полному очищению моря в летний период, а значит, к снижению рисков опасного прохождения судов во льдах.

Море Лаптевых можно отнести к суровому по типу климатическим характеристикам, оно имеет свои особенности в распределении льда, так как находится на континентальном шельфе, где с преобладанием мелководных районов. При грамотном изучении и прогнозе таяния припая существует возможность благоприятного судоходства в районах заприпайных полыней раньше, чем будет открыта навигация по всему морю. Также нужно отслеживать ледяные массивы на западе и востоке моря, которые существенно препятствуют прохождению судов через проливы.

При рассмотрении спутниковых систем можно выделить отдельные плюсы и минусы в каждой, где-то это низкое пространственное разрешение или недостаточность пролетов над исследуемым местом, или вовсе недоступность информации в видимом диапазоне из-за облачности. Так как спутниковые данные можно получить в разном формате, что было отмечено при рассмотрении источников, то каждое программное обеспечение можно тоже использовать для определенных задач – это построение карт, обработки изображения или составления сложных композитных образцов. В совокупности использования всех систем появляется возможность тщательного исследования района судоходства и предоставления оперативного прогноза ледовой обстановки.

При анализе были выявлены главные критерии для оценки ледовых явлений в целях составления маршрутов для судов. Так как изначально рассматривались специфичные ледовые характеристики для исследуемых

морей, то следует сопоставить информацию об основных опасных гидрометеорологических явлениях, которые неблагоприятно влияют на судоходство. Состояние описывается рядом характеристик ледового покрова, которые наиболее существенно влияют на эффективность и безопасность плавания во льдах.

Для создания навигационных рекомендаций с использованием данных дистанционного зондирования действительны следующие критерии:

- общая сплоченность ледяного покрова;
- возрастной состав ледяного покрова;
- формы (горизонтальный размер) ледяного покрова;
- ориентация нарушений сплошности ледяного покрова (разрывов, разводий, каналов, трещин) в зимний период в замерзающих морях и в летний период в Арктическом бассейне.
- толщина ровного льда,
- торосистость ледяного покрова,
- сжатия льдов,
- разрушенность ледяного покрова.

Рассматривались стандартные и оптимальные маршруты по трассе Северного морского пути в целом, и по исследуемым морям отдельно.

При анализе ледовой обстановки в летний период (май–ноябрь) за временной период 2016–2019 гг., была выявлена динамика сокращения площади льда в Карском море и море Лаптевых. Ранее ото льда освобождается Карское море, где удалось выявить наиболее благоприятные районы для начала навигации между соседними портами с июня, используя участки заприпайных полыней в центральной части и южной части моря. Это можно объяснить существенным сокращением льда в Арктическом регионе за последние годы. Освобождение морей ото льда начинает происходить ранее летних месяцев и более интенсивно в отдельных районах. Из этого

следует, что сроки разрушения припайных льдов тоже смещаются на более ранний период.

В период, когда начинает осуществляться навигация в главных проливах, можно выявить опасное явление в виде «ледяной реки», которое опасно для судна процессами сжатия льда в отдельных участках, нагромождения его в мелководных районах.

Было выявлено опасное явление в виде полярных циклонов, из-за мезомасштабного протекания процесса, их сложно спрогнозировать и их воздействие может обширно влиять на состояние ледового покрова и его дрейф.

Используя уточняющие спутниковые снимки морской поверхности, были представлены рассчитанные характеристики изменения полыней, движения ледовых полей по проливам и расчета их морфометрических характеристик в целях предоставления информации для корректировки используемых маршрутов по трассе СМП.

Исходя из проведенного анализа спутниковых данных, была построена карта с рекомендациями, в какой период времени и в каком районе исследуемых морей существует благоприятная обстановка для прохождения морского транспорта без ледовой проводки. С мая по ноябрь может осуществляться безопасная навигация в районах Карского моря – Новоземельский, восточный и центральный, а в море Лаптевых – центральная часть и северный район Новосибирских островов. С июня по ноябрь в Карском море добавляется южный и юго-западный районы, а также на севере район Северной Земли. В море Лаптевых – центральная часть. С июля по ноябрь в Карском море открывается центральная часть, а в море Лаптевых – южный район и расширенный участок центрального. С августа по ноябрь оба моря обладают благоприятными условиями для безопасного судоходства.

При использовании полученной карты в ходе работы, была выявлена экономическая выгода при расчете стоимости ледокольной проводки по трассе СМП. Стоимость для прохождения судна снизилась на 16,6 %.

Основное содержание работы докладывалось на международной научно–практических конференции «Морские исследования и образование – MARESEDU» в 2018–2019 годах, международной научно–практической конференции ИНФОГЕО «Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий» в 2018 году, Всероссийской научно–практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации» в 2019 году, международной школе–семинаре: «Спутниковые методы и системы исследования Земли» в 2019 году, международной научно–практической конференции Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» в 2019 году, студенческой межвузовской научной конференции «Parte Incognita».

Результаты настоящей работы опубликованы в четырех сборниках тезисов конференции [2,33–34,36], а также в рецензируемом журнале «Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право» [32].

Список используемых источников

-
1. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М., Изд-во МГУ, 1982 г. С ил., 192 с.
 2. Ананьева А.А. Примеры синергетического анализа спутниковых данных о полярных циклонах южной части Карского моря в интересах судоходства. // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы V Международной научно-практической конференции. Часть 1. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2019. С. 43-47.
 3. Наблюдения за ледовой обстановкой: учебное пособие. – Спб.: ГУ «ААНИИ», 2009. – 360 с.
 4. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е.У. Миронова. СПб.: ААНИИ, 2010. 320 с.
 5. Бузуев А.Я. и др. Условия плавания судов во льдах морей северного полушария. М.: Изд-во Главного управления навигации и океанографии МО СССР, 1988. 280 с.
 6. Лоция Западной части Карского моря (от о-вов Новая Земля и о-ва Вайгач до меридиана мыса Северо-Восточный, за исключением Обь–Енисейского района). М.: Изд. Главного управления навигации и океанографии МО СССР. 1992. 221 с.
 7. Говоруха Л.С. Современное наземное оледенение Советской Арктики. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 256 с.
 8. Зубакин Г.К. и др. Айсберги Баренцева и Карского морей /Ледяные образования морей западной Арктики. СПб.: ААНИИ, 2006. С. 109–125.
 9. Использование спутниковой информации для обнаружения айсбергов и оценки айсберговой угрозы / И. А. Бычкова, В. Г. Смирнов // Лед и снег. – 2018. – Т. 58, № 4. – С. 537–551.

-
10. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том 11. Море Лаптевых. Ленинград.: Гидрометеиздат.- 1980. - с.98-163.
 11. Бородачев В.Е., Бородачев И.В. Ледовитость моря Лаптевых в условиях колебаний климата Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 3 (109). С. 60-73.
 12. В. А. Четверова, А. С. Макаров. Ледовая обстановка морей Лаптевых и Восточно-Сибирского как фактор переформирования береговой зоны // Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана. - Петрозаводск, 2011. - С. 49-52
 13. Сычев В.И. Примеры использования спутниковых технологий для изучения современного состояния Заприпайной полыньи севернее острова Котельный // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы V Международной научно-практической конференции. Часть 2. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2019. С. 164-172.
 14. Дистанционное зондирование морских льдов на Северном морском пути: изучение и применение / О.М. Йоханнессен, В.Ю. Александров, И.Е. Фролов, С. Сандвен, Л.Х. Петтерссон, Л.П. Бобылев, К. Клостер, В.Г. Смирнов, Е.У. Миронов, Н.Г. Бабич. - СПб.: Наука, 2007. - 512с.: ил. - (Научные исследования в Арктике: в 3т.; т.3).
 15. Ludwig, V., Spreen, G., Haas, C., Istomina, L., Kauker, F., and Murashkin, D.: The 2018 North Greenland polynya observed by a newly introduced merged optical and passive microwave sea-ice concentration dataset, *The Cryosphere*, 13, 2051-2073.
 16. Salomonson V., Lindsey R., Herring D., Abbott M., Conboy B., Esaias W., Justice C., King M., Murphy B. The MODIS instrument, NASA's Earth Observatory, 2001. – 25p.
 17. E. Attema, C. Cafforio, M. Gottwald, P. Guccione, A. Monti Guarnieri, F. Rocca et al. (2010) Flexible dynamic block adaptive quantization for Sentinel–1

SAR missions IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 7 (4) (2010, Oct.), pp. 766–770

18. Schmunk R. Panoply netCDF Visualization Software v. 4.1.0, NASA Goddard Institute for Space Studies, 2019. – 39 p.

19. Seidenglanz A. Panoply A Tool for Visualizing NetCDF-Formatted Model Output, The University of Bremen, 2012. – 19 p.

20. McVittie A. Flood mapping tutorial, Sentinel-1, ESA, 2019. – 9 p.

21. Braun A., Veci L. TOPS Interferometry Tutorial, Sentinel-1 Toolbox, ESA, 2020. – 20 p.

22. Сычёв В.И. Практическое использование спутниковых изображений по результатам дистанционного зондирования Земли из Космоса. Ч.4. Введение в анализ спутниковых данных с помощью интегрированной системы анализа спутниковых изображений ЮНЕСКО БИЛКО. – Майкоп: ИП Кучеренко В.О. – 2016.

23. Миронов Е.У., Спичкин В.А. Опасные и неблагоприятные ледовые явления // Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей. – Спб.: ААНИИ, 2004. С. 340–345.

24. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей [практическое пособие] / М-во природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Гос. науч. центр Российской Федерации Арктический и антарктический науч.-исслед. ин-т ; под ред. В. Г. Смирнова. - Санкт-Петербург: ААНИИ, 2011. – 238 с.

25. Smirnov V.G., Bychenkov Ju.D., Priamikov S.M., Shcherbakov Ju.A. (1999). The use of satellite information for ice navigation support / Proc.15th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'99), Helsinki, August 23–27, 1999. V. 1. P. 154–165.

26. Наставление для плавания по Северному морскому пути. – М.: Изд. ГУНИО МО СССР, 1966. 129 с.

-
27. Руководство для сквозного плавания судов по Северному морскому пути. – С.П-б: Изд. ГУНМО МО РФ, 1995, 415 с.
28. Мохов И.И., Хон В.Ч. Продолжительность навигационного периода и ее изменения для Северного морского пути: модельные оценки // Арктика: экология и экономика. — 2015. — т. 18, № 2. — с. 88–95.
29. Granberg A. G. The Northern Sea route: trends and prospects of commercial use. —1998. Ocean Coast Manag 41:175–207
30. Данилов А. И., Алексеев Г. В., Клепиков А. В. Последствия изменения климата для морской деятельности в Арктике // Лед и снег. — 2014. — № 3. — С. 91—99.
31. Khon V. C., Mokhov I. I., Latif M. et al. Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the 21st century // Climatic Change. — 2010. — Vol. 100, № 3—4. — P. 757—768.
32. Сычев В.И., Ананьева А.А. Информационное обеспечение навигации данными дистанционного зондирования в мелководных районах Арктики. // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. - СПб.: Андреевский издательский дом, 2018. Вып. 1 (32). С.47-52.
33. Сычёв В.И., Ананьева А.А. Динамика северного побережья Новосибирских островов в летний период на основе синергетического анализа спутниковых данных. // Сборник трудов V международной научно-практической конференции ИНФОГЕО 2018 «Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий». Том 1, СПб: РГГМУ, 2018. С. 102-105.
34. Сычёв В.И., Ананьева А.А. Особенности ледовых условий у западного побережья острова Котельный по спутниковым данным. // Морские исследования и образование (MARESEDU-2018) Труды VII Международной научно-практической конференции. Сборник. 2019. С. 171-179.

-
35. Использование спутниковой информации для обнаружения айсбергов и оценки айсберговой угрозы / И. А. Бычкова, В. Г. Смирнов // Лед и снег. – 2018. – Т. 58, № 4. – С. 537–551.
36. Ананьева А.А., Сычев В.И. Морфометрические характеристики крупных айсбергов у побережья Антарктиды. // Труды VIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2019)» - Тверь: ПолиПРЕСС, - 2019, Том I (III):С. 100-102.
37. Расчет стоимости ледокольной проводки в акватории СМП // URL: http://www.nsra.ru/ru/ledokolnaya_i_ledovaya_lotsmanskaya_provodka/raschet_st_oimosti_ledokolnoy_provodki_v_akvatorii_smp.html (дата обращения: 19.06.2020).