

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт наук о Земле

Кашкова Валентина Сергеевна
Выпускная квалификационная работа
«Исследование режима заприпайных полыньей Карского моря, в зимний
период»

Уровень образования: магистратура
Направление 05.04.04 «Гидрометеорология»
Основная образовательная программа: «Гидросфера и атмосфера:
моделирование и
прогноз»

Научный руководитель:
В.н.с., к.г.н., доцент Иванов Борис Вячеславович

Рецензент:
В.н.с., к.г.н., доцент Юлин Александр Викторович

Санкт-Петербург

2023

Содержание

Перечень сокращений и условных обозначений.....	3
Введение	4
Глава 1 Район исследования.....	7
1.1 Физико-географические характеристики Карского моря, особенности ледового режима.	7
1.2 Режимные особенности заприпайных полыней и влияющие на них факторы.....	15
1.3 Метеорологические и гидрологические характеристики, влияющие на режимные особенности заприпайных полыней.....	20
1.4 Границы полыней, характеристики слитых полыней	25
Глава 2 Методы обработки ледовых карт при помощи геоинформационной системы ArcGIS.....	29
2.1 Обработка данных с помощью геоинформационной системы ArcGIS	29
Глава 3. Динамика заприпайных полыней Карского моря и влияние метеорологических характеристик за период 2000-2020 г.....	34
3.1 Характеристики площадей полыней	34
3.2 Повторяемость присутствия полыней.....	48
3.3 Изменение площади припая.....	54
Глава 4 Зависимость режима заприпайных полыней Карского моря от метеорологических показателей.....	58
4.1 Сбор метеорологических данных	58
4.2 Корреляционные связи площадей полыней с метеорологическими показателями ...	60
4.3 Множественный коэффициент корреляции между комплексом метеорологических показателей и изменчивостью площади полыней	65
Заключение	68
Список используемой литературы	69

Перечень сокращений и условных обозначений

Называние полыней:

СНЗ- Северная Новоземельская

ЮНЗ- Южная Новоземельская

АМ- Амдерминская

ЯМ- Ямальская

ОЕ- Обь-Енисейская

ЦК- Центральная Карская

ЗСЗ-Западная Североземельская

Введение

Процессы ледообразования, а также состояния морских льдов и все связанные с этой тематикой отрасли отечественной науки всегда были очень востребованы и привлекали всеобщее внимание научного сообщества. Морской лед, как известно, является крайне динамичной и неоднородной структурой, подверженной внутри сезонной, сезонной и межгодовой изменчивости.

В виду того, что экономическая и хозяйственная деятельность в арктических и приарктических регионах России во многом определяется и регулируется воздействием различных гидрометеорологических факторов, необходимость их изучения, включая особенности ледового режима арктических морей, приобретает особую значимость. Несмотря на относительно большую изученность данной темы, остается большое количество белых пятен и вопросов, связанных с локальными процессами ледообразования и динамики морских льдов в разных частях Карского моря. Одним из таких вопросов, касающихся пространственно-временной изменчивости характеристик ледового покрова, является изучение динамики заприпайных полыней.

Заприпайные полыньи являются одной из самых динамических структур ледового ландшафта в зимний период.

Сами заприпайная полыньи представляет собой участки открытой воды или тонкого льда (до 30 см) расположенные между неподвижным льдом (припаем) и дрейфующими морскими льдами. [Карелин, Карклин, 2012]

Полыньи Карского моря оказывают ощутимое влияние на ледовую обстановку в период с ноября по июнь. Они играют важную роль в системе энергообмена между океаном и атмосферой, а также зачастую являются наиболее безопасным путем при прохождении судов во время ледовой (зимней) навигации.

Кроме того, полынья является активной зоной продуцирования (образования) начальных и молодых видов льда, что также оказывает влияние на ледовые условия в исследуемом регионе, и термохалинные особенности верхнего слоя моря [Карелин, Карклин, 2012].

Цель исследования:

Оценка режимных особенностей заприпайных полыней Карского моря в зимний период, и влияние метеорологических факторов на их динамику.

Задачи:

1. Сформировать массив данных о размерах заприпайных полыней в зимний период путём обработки ледовых карт в формате SIGRID-3 с 2000 по 2022 гг.
2. Сформировать массивы метеорологических характеристик для акватории моря с 1998 по 2022 гг.
3. Формирование непрерывного ряда данных о площади заприпайных полыньях с 2000 по 2022 гг.
4. Установить количественные оценки причинно-следственных связей между характеристиками метеорологического и гидрологического режима моря.
5. Установить количественные оценки причинно-следственных связей между характеристиками полыней и особенностями метеорологического и гидрологического режима моря.

Актуальность работы:

1. Заприпайные полыньи — важный элемент ледового ландшафта арктических морей.
2. Полыньи являются зоной активной генерации молодых льдов в общем балансе льда арктических морей.

3. Заприпайные полыньи — энергоактивные зоны в системе океан-атмосфера-морской лед, играющие важную роль в теплообмене океана с атмосферой.

4. Полыньи являются важным элементом ледового плавания, обеспечивающим выбор наиболее оптимальных трасс в период зимней навигации.

Структура работы: Рассматриваемая выпускная квалификационная работа состоит из аннотации, введения, четырех основных глав, содержащих подглавы, заключения, списка используемой литературы, включающего в себя 53 источника, дополнительных материалов в виде 23 рисунка, 5 таблиц и приложения.

Глава 1 Район исследования

1.1 Физико-географические характеристики Карского моря, особенности ледового режима.

Одним из окраинных морей Северного Ледовитого океана является Карское море. На севере оно имеет протяженную и открытую к Арктическому бассейну Северного Ледовитого океана, в западной части оно имеет границу с Баренцевым морем через пролив Карские ворота, а на востоке через пролив Вилькицкого с морем Лаптевых.

Большой своей частью Карское море располагается на отмели материка, общая площадь составляет 885.2 тыс.км², объем воды 112 тыс. куб. км, средняя глубина составляет 127 м, наибольшая глубина 620 м. Самая западная граница проходит от мыса Кользат до мыса Желания, далее по восточному берегу Новой Земли, по западной границе от мыса Кусов Нос до мыса Рогатый, к восточному берегу острова Вайгач и далее по западной границе пролива Югорский Шар до мыса Арктический на Северной Земле на острове Комсомолец. Восточная граница проходит по западному берегу архипелага Северная Земля и восточными границами проливов Шокальского и Вилькицкого. Южная граница Карского моря проходит по материковому берегу от м. Белый Нос до пролива Вилькицкого. [Добровольский, Залогин, 1982]

Климатические особенности Карского моря складываются в силу его географического положения, поэтому климат региона полярный. Несмотря на влияние северной части Атлантического океана, климатические характеристики сильно отличаются, от Баренцева моря которое расположено совсем близко и даже сообщается с Карским через пролив. Температура воздуха ниже 0°С сохраняются в его северной части до 10 месяцев, в южной его части до 8 месяцев. Средняя температура самого холодного месяца (январь) равна -20, -28°С (минимальные температуры могут достигать до -

45°C; -50°C), в летний период, а именно в самом теплом месяце (июль) температура не превышает 1-6°C (максимальная температура до 16°C)

Погодные условия северных морей, в частности Карского моря, отличаются своей нестабильностью на во все сезоны года. Сильные ветра, резкие изменения температуры и температурные аномалии в закрытых акваториях уже с достаточной степени изучены имеют ключевое значение в исследованиях. Это объясняется пограничное положение Карского моря между относительно теплыми морями Северной части Атлантического океана и сильно охлаждающими районами Центральной Арктики и сообщаемся с Карским морем Лаптевых.

В юго-заполной части, как правило, преобладают ветра южных направлений, на рисунке 1 представлена преобладающее направление ветра в зимний период на станции Амдерма.

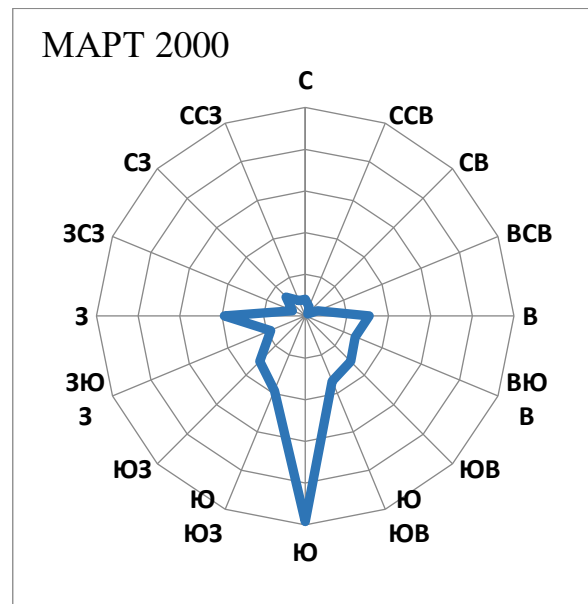
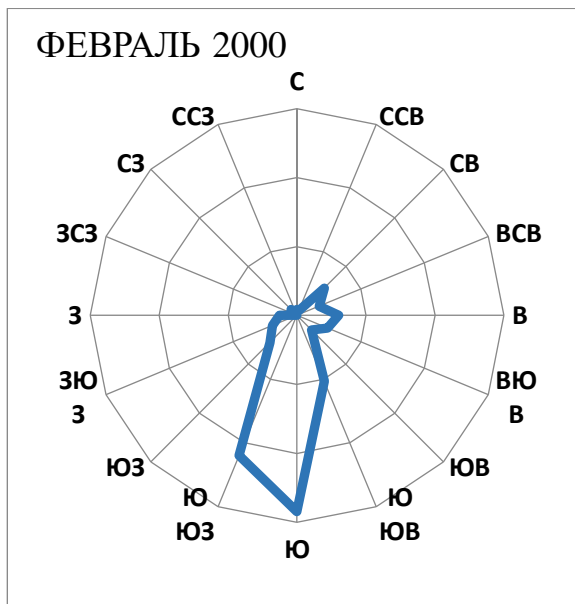
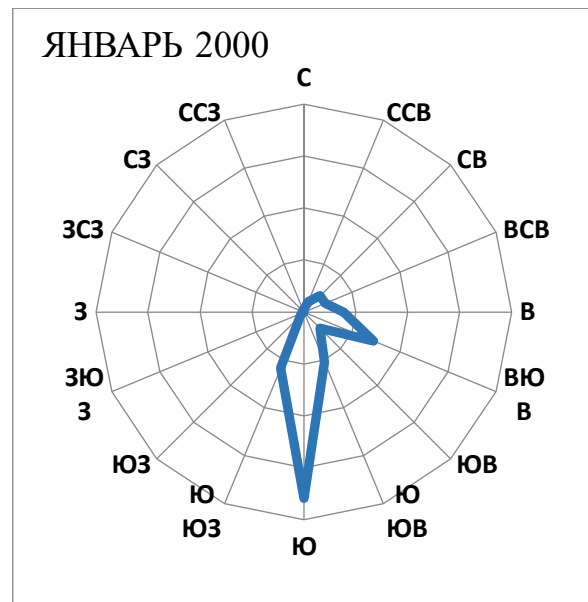
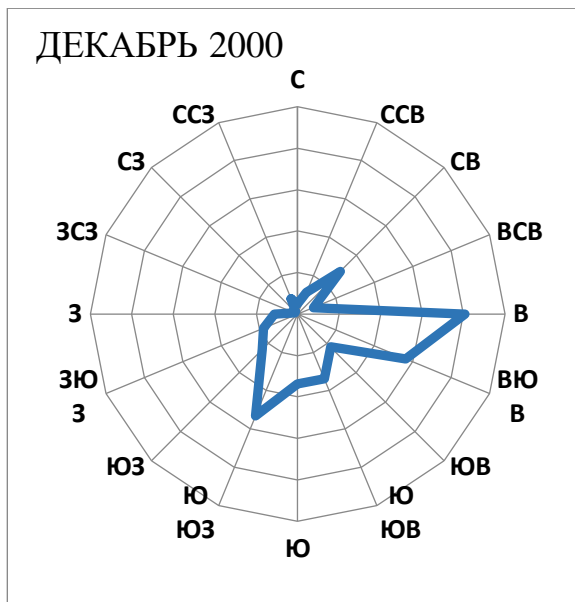


Рисунок 1— преобладающее направление ветра в зимний период на станции Амдерма за 2000 г

В северо-восточной части отмечаются также, ветры северных и северо-восточных направленностей летом и юго-восточных и южных направлений в зимний период. Скорость ветра в среднем составляет 7-8 м/с сменяясь порывами до 20 м/с. На рисунке 2 представлены преобладающее направление ветра в зимний период на станции мыс Стерлегова.

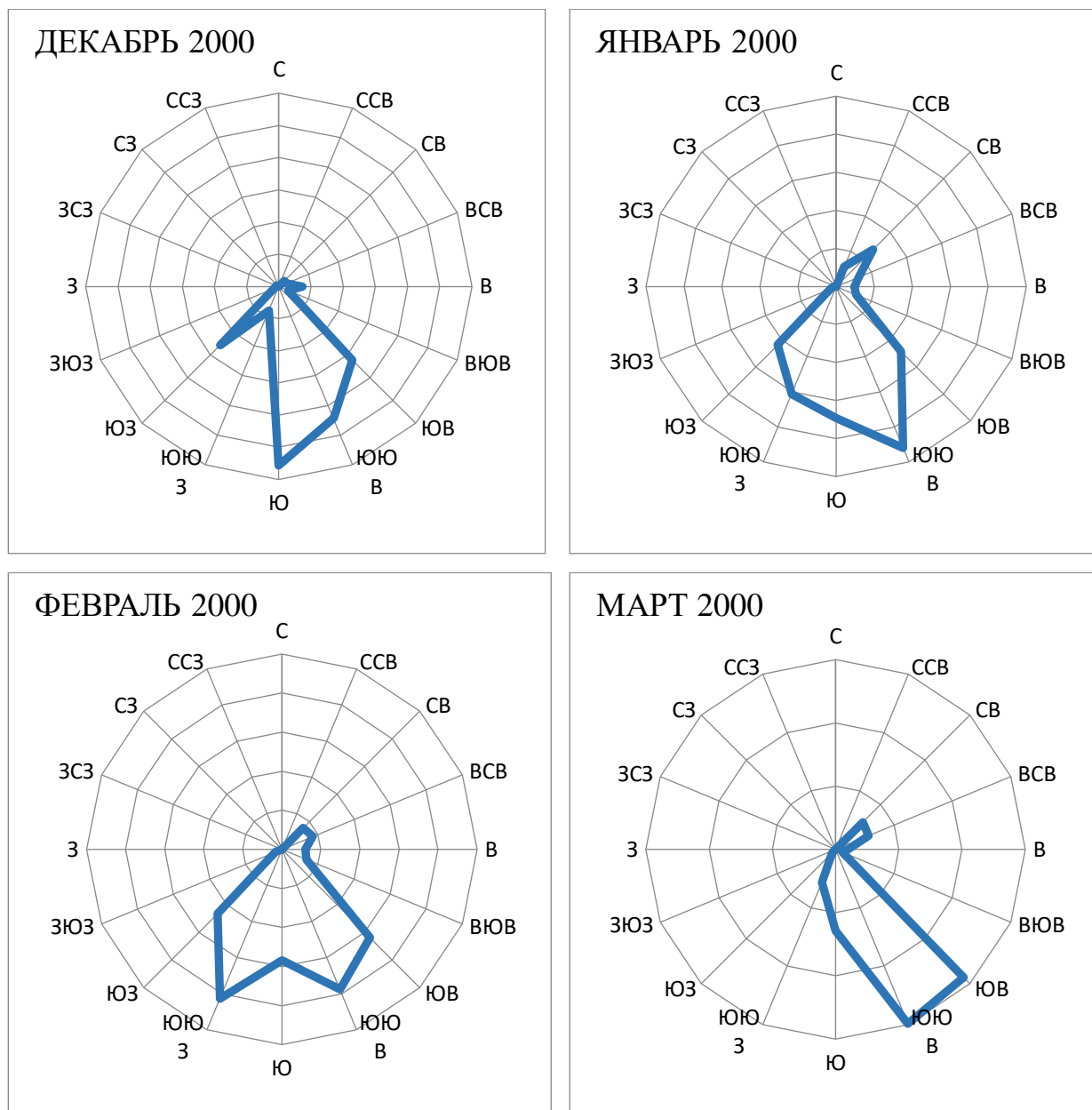


Рисунок 2— преобладающее направление ветра в зимний период на станции мыс Стерлегова за 2000 г.

Существенное увеличение скорости ветра на в западной части моря характеризуется частыми штормами в период, когда акватория не скованна льдом, порывы не редко достигают до 35 м/с. Также каждый сезон на архипелагах Новая Земля, Северная Земля и Земля Франца-Иосифа образуется такое природное явление как бора, при которой поток ветра развивает скорость до 40 м/с. [Ковалевский, Алексеев, 2012]

В весенние месяцы при смещении Полярного антициклона к полюсу, циклоническая активность постепенно снижается. К этому приводит и смещение Сибирского максимума, благодаря такому смещению барических систем происходит значительное снижение скорости ветра до 5-6 м/с, что в свою очередь способствует прогреву воздуха, при безветренной погоде устанавливается температура -5°C , -10°C .

Стоит отметить влияние стока рек на формирование местных гидрологических и климатических особенностей, а также на формирование припайных полынй (Обь-Енисейская, Центральная Карская). Сток крупных рек в Карское море является одним из важных элементов, влияющим на ледообразование и характеристику морской воды, его средний объем за год составляет примерно 1350 куб. км, что в значительной мере превышает суммарный сток в остальных морях Сибирского шельфа [Добровольский, Залогин, 1982 г.]

Под влиянием стока двух крупных рек Оби и Енисея находится 40% площади моря, это достаточно сильное влияние, а такие элементы как состояние вод, поверхностные течения, скорость нарастания морского льда, установка припая, и изменение солености воды, напрямую зависят от количества стока в целом. Весной в предустьевых областях (районы стока Оби и Енисея) лед интенсивно тает и деформируется из-за теплового и механического действия стока пресной воды. Средняя температура воды в низовьях Оби и Енисея в это время составляет $9,6$ и $7,0^{\circ}\text{C}$ соответственно. В осенний период тепловой сток с материка способен замедлить замерзание прибрежных вод, что приводит позднему становлению припайных льдов и раскрытию Обь-Енисейской полыньи.

Влияние речного стока распространяется также и на аккумулирующую способность поверхностного слоя воды. В Карском море толщина поверхностного слоя, способного активно поглощать солнечную радиацию и

атмосферное тепло может быть снижена, из-за сильного опреснения речными и талыми водами. Поэтому море поглощает только около 25% тепловой энергии, поступающей на его поверхность.

Основной объем пресной воды поступающий из крупных рек, около 80% поступает со стоком двух рек-Енисей (600 куб. км/год) и Обь (450 куб. км/год).

Стоковые воды рек в акватории Карского моря, в силу влияния местных течений и направления и скорости ветра в рассматриваемой области, распространяются неравномерно. Как правило происходит разветвление пресных вод по поверхности без значительного перемешивания, либо отклонение к северо-западу части моря в сторону Северной земли. Они способны распространяться вдоль береговой зоны на восток, к морю Лаптевых образуя длинные полосы, из пресной воды которая только через некоторое время постепенно перемешивается с морской водой [Добровольский, Залогин, 1982 г.]

Одним из важных ледообразующих факторов является температура воды. Температурный показатель складывается из климатических особенностей местности, что не способствуют сильному прогреву воды на протяжении года. Зимой, с января по июнь практически 80% поверхности покрыта льдом, из-за этого температура воды под ним, как правило, стремится к температуре замерзания морской воды и составляет -1.7°C , -1.9°C .

Как было отмечено выше, существенное влияние на термический режим воды оказывает влияние стока рек поэтому стоит отметить что, не смотря на полярный климат более высокие температуры воды отмечаются в прибрежной зоне устьев рек, в районе Обской губы и Енисейского залива. Более однородные по температурным характеристикам водные массы встречаются на мелководьях, это обусловлено не значительным перемешиванием уже прогретых поверхностных вод. Положительные температуры можно

зафиксировать и в желобах Св. Анны и Воронина, где температура воды может доходить до $+1.0-1.5^{\circ}\text{C}$, это связано с поступлением вод из более теплых участков Атлантического океана.

Термически режим в весенний период формируется таким образом, что благодаря теплообмену с атмосферой и поступлению лучистой энергии во время полярного дня, начинается процесс таяния и активного энергообмена в системе океан-атмосфера. В этот период большая часть энергии затрачивается на таяние льда, и только лишь в южном и юго-западном районах, где таяние льда происходит раньше температура воды начинает повышаться, так на юго-востоке глубина прогревания отмечается до 12 м, в юго-западной части до 20 м, в последние годы было замечено аномальное прогревание до 40 м в отдельных участках Карского моря.

В летний период, южная и центральная части моря практически полностью очищаются от припайного и дрейфующего льда, велико влияние многолетних толстых льдов, которые способны оставаться и на протяжении летнего периода. С первой декады сентября начинается ледообразование и постепенное выравнивание температурного фона до тех пор, пока вся акватория Карского моря не покроется льдом.

Соленость воды в акватории Карского моря, это один из параметров который является лимитирующим в образовании полыней. Распределение солености воды в разных частях моря, как правило, не может считаться однородным, так как это связано со свободным сообщением с Северным ледовитым океаном, а также большой материковый сток пресной воды из крупных рек. Образование льда и его таяние в течении сезона сильно влияют на величину и распространение солености в Карском море. Соленость поверхностных вод, как правило, отличается меньше средней солености океана, она меняется в пределах от 3‰ до 5‰ в южной и юго-западной части моря, и в пределах до 33‰-34‰ в северной и северо-восточной частях. В

зимние и весенние месяцы, когда сток Оби и Енисея очень незначителен, а также происходит интенсивное ледообразование и становление припая, соленость повышается и имеет максимальные показатели. Но стоит принять во внимание, что в областях устьев рек, где соленость морской воды на ее поверхности равна 25‰-30‰ увеличивается по направлению течений. [Добровольский, Залогин, 1982 г.]

Стоит отметить, что изменение солености меняется и по вертикали, так изменение увеличивается от поверхности к глубине, такое распределение выявляется от сезона к сезону и способно изменяться только с приходом весны в приустьевых участках. Но все равно с глубиной соленость становится все более и более однородной, и на определенной глубине перестает изменяться вовсе.

1.2 Режимные особенности заприпайных полыней и влияющие на них факторы

Наряду с припайным и дрейфующим льдом арктических морей, одним из неотъемлемых элементов ледового ландшафта является заприпайная полынья.

Заприпайная полынья представляет собой участок чистой воды или молодых льдов с толщиной до 15 см, расположенных за кромкой неподвижного припайного льда, но не являющийся частью массива дрейфующего льда. Это динамичная структура имеет ряд параметров по протяжённости, толщине молодого льда, если таковой имеется, и общей площади. [Карелин, Карклин, 2012]

В данной работе будут рассмотрены семь стационарных полыней Карского моря, а именно:

- Северная Новоземельская (СНЗ)
- Южная Новоземельская (ЮНЗ)
- Амдерминская (АМ)
- Ямальская (ЯМ)
- Обь-Енисейская (ОЕ)
- Центральная Карская (ЦК)
- Западная Североземельская (ЗСЗ)

Ниже, на рисунке 3 представлена схема расположения заприпайных полыней Карского моря [Карелин, Карклин, 2012]

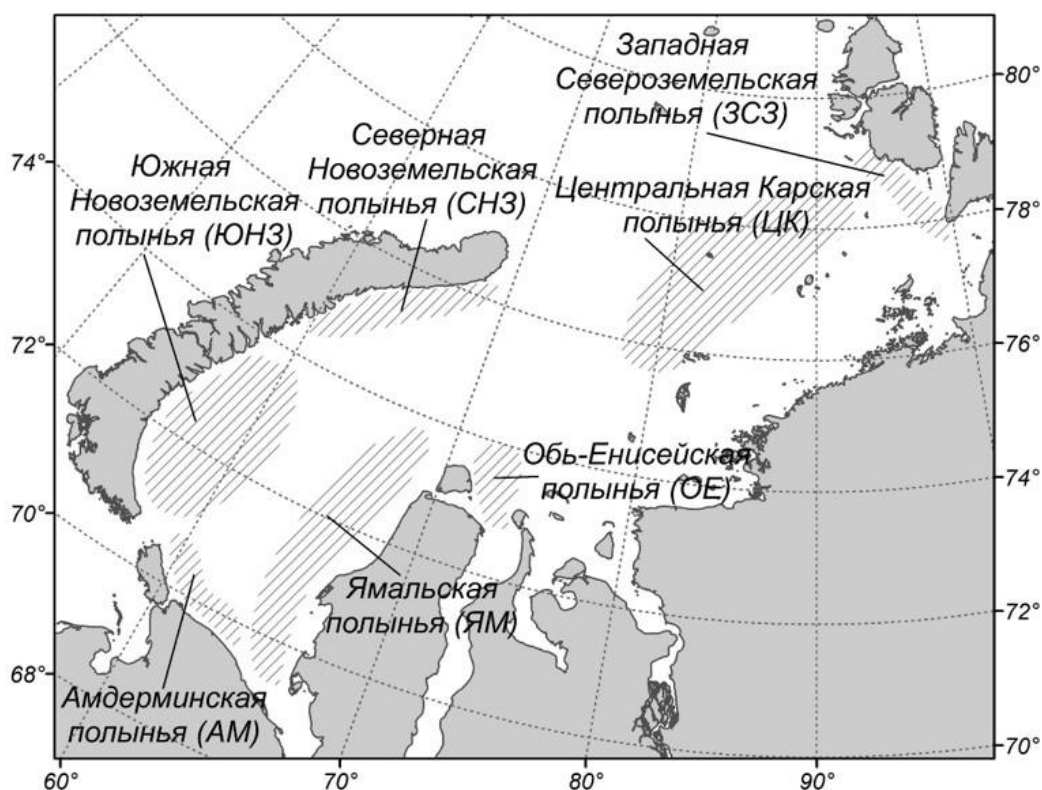


Рисунок 3 — Районы образования полыней в Карском море: приведены названия полыней, принятые в российских исследованиях и Литературе [Карелин, Карклин 2012]:

Все полыни, представленные на рисунке 3 являются стационарными, то есть каждая из полыней более 75% дней в году, включая зимний период, является открытой и активно участвует в образовании молодых льдов.

С привлечением спутниковых снимков ААНИИ была установлена высокая изменчивость во времени всех характеристик полыней. Так при анализе устойчивости полыни были приняты критерии оценки заключающиеся в постоянном наблюдении за границами самой полыни и границами дуреющего льда, которые опираются на многолетний опыт исследования в предыдущие годы: при повторяемости от 75 % и более –

полынья считается стационарной, 50–74 % – устойчивая полынья, менее 50 % – имеет эпизодический характер.

Каждая полынья, которая является стационарной (повторяемость свыше 75%) имеет свои приблизительные границы, рассмотрим каждую из полыньей в зависимости от их географического положения.

Северная Новоземельская полынья (далее СНЗ), как правило образуется под действием ветров отжимного характера вдоль всего восточного побережья северного острова Новая Земля, протягиваясь вдоль припая от пролива Маточкин Шар до мыса Желания. Протяженность полыньей может варьироваться в зависимости от погодных условий и меть длину от 180 до 610 км, ширина – от 23 до 110 км. В силу особенностей географического положения такое природное явление как бора способно в значительной степени изменить границы полыньей, таким образом, что при отжимном ветре свыше 35 м/с граница полыньей и дрейфующего льда начнет интенсивно смещаться, образуя участки чистой воды.

Южная Новоземельская (далее ЮНЗ) как и СНЗ полынья, образуется вдоль припая у восточного побережья южного острова Новой Земли, зачастую образуется слитая полынья с большой протяженностью вдоль все береговой линии. Южная образуется от пролива Карские Ворота до пролива Маточкин Шар, нередко полыньей дробятся на несколько мелких, но в последствии объединяются вновь. Протяженность полыньей также зависит от местных ветров и изменяется от 200 до 350 км, а ширина – от 51 до 227 км.

Амдерминская полынья (далее АМ) образуется от пролива Карские Ворота до южной части Байдарацкой губы. Здесь сильно велико влияние отжимных ветров западного и юго-западного направления, а также более теплые воды, поступающие из акватории Баренцева моря. Часто образуется слияние с ЮЗН, а также с Ямальской полыньей. Протяженность очень вариативна, и как правило, достигает 200–450 км в длину и 22–200 км в ширину.

Образование Ямальской полыньи (далее ЯМ) происходит под действием отжимных воздушных потоков юго-восточного и выстоянного направления вдоль прибрежного припая от Байдарацкой губы до о. Белый. Протяженность полыньи составляет 279–630 км, а ширина – от 16 до 106 км.

Обь-Енисейская полынья (далее ОЕ), как правило, формируется с первых дней образования материкового льда (припая) и существует практически весь сезон вплоть до его разрушения. Это одна из самых не стабильных полыней Карского моря, что связано и с влиянием местных течений, и со стоком крупных рек. Полынья начинается от северной оконечности о. Белый и продолжается до острова Диксон, в этом регионе часто происходит взлом припая и образование участков чистой воды, они очень быстро покрываются молодым льдом. Не смотря на свою стационарность, полынья очень часто изменяет свою форму, то образуя разрозненные участки чистой воды, то образуя слитую структуру с Центральной Карской. Можно предположить что влияние ОЕ полыньи оказывает влияние и на Центральную Карскую полынью

Центральная Карская- это одна из самых протяженных полыней Карского моря, имеет самые большие линейные размеры и площадь, она образуется под действием отжимных южных и юго-восточных. Как и Обь-Енисейская полынья она начинает формироваться после образования припая зачастую сливаясь с Обь-Енисейской. Располагается от острова Диксон до мыса Челюскина, может доходить до пролива Вилькицкого и часто, весной, сливается через пролив с полыньями в море Лаптевых. Это самая большая по всем показателям, полынья в Карском море, ее длина может изменяться от 311 до 900 км, а ширина – от 40 до 188 км.

Западная Североземельская полынья (расположенная в самой северной точке моря) образуется вдоль островов Северной Земли от мыса Неупокоева до мыса Арктический, часто огибая самый северный остров входит в море Лаптевых и сливается с местными полыньями. Образуется после становления

припайного льда под действием отжимного восточного ветра. Ее ширина изменяется от 23 до 130 км, а длина – от 180 до 570 км.

1.3 Метеорологические и гидрологические характеристики, влияющие на режимные особенности заприпайных полыней

В большинстве исследований прошлых лет, часто отмечается ключевая роль направления и скорости ветра на режимные особенности заприпайных полыней. Несмотря на то, что исследование кромки припая и границы полыньи и дрейфующего льда вызывает сложности, то спутниковая информация позволяет существенно упростить задачу.

Предполагается, что при южном направлении ветров ЦК полынья будет раскрываться, так как дрейфующий лед у кромки полыньи будет взламываться (при значительных скоростях ветра и наличии порывов) отходя дрейфующий лед дальше от припая. В таком случае обнажившаяся чистая вода, еще не покрытая молодыми льдами будет являться точкой энергообмена в системе океан-атмосфера.

Так в весенние месяцы (при наступлении полярного дня), полыньи являются аккумуляторами тепла, так как участки чистой воды с большой интенсивностью поглощают солнечную радиацию, которая интенсивно расходуется на прогрев воды в точке где присутствует чистая вода.

Одним из основных показателей, влияющих на полыньи и их расположение, является влияние местных течения Карском море. Большую роль в их формировании и изменении линейных размеров и площади играет обмен водными массами с прилежащими крупными водными объектами (Баренцево море, и море Лаптевых), а также сток рек в области Обь-Енисейской полыньи который по Обь-Енисейскому течению проходит вдоль берега до Северной земли. Под влиянием стока рек и притока теплых вод из других морей, воды Карского моря образуют ярко выраженный круговорот против часовой стрелки в юго-западной и северной части (рисунок 4).

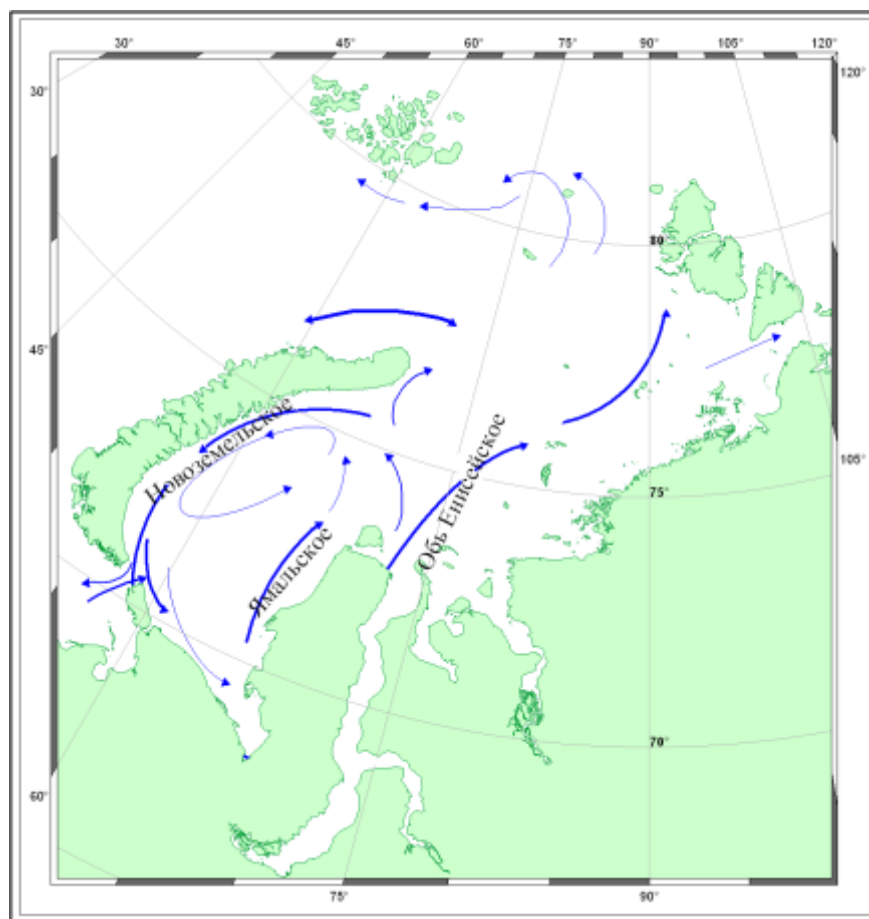


Рисунок 4 — Постоянные поверхностные течения Карского моря

Рассказывая влиянии течений, стоит отметить одно из основных направлений, а именно южный-западный круговорот, он образуется в западной части Обь-Енисейского течения благодаря притоку теплых вод из Баренцева моря которые поступают через крупный пролив Карские ворота. К тому же Обь-Енисейское течение при углублении на север, разделяется на несколько ветвей - западную, северную и восточную соответственно; западная ветвь достигая северо-восточной оконечности Новой Земли, разделяется еще на несколько потоков, один из которых движется в северо-восточном направлении, а другая, имеющая южное направление имеет название Новоземельского течения. У пролива Карские Ворота от Новоземельского отделяется течение Литке, которое соответственно идет в акваторию Баренцева море. Далее основной поток меняет свое направление на восточное и сливается

с теплым течением из Баренцева моря, направляясь к побережью Ямальского полуострова. Так возникает Ямальское течение которое идет на север до слияния с Обь-Енисейским течением, так замыкается круг поверхностных течений в юго-западной части Карского моря, он весьма сложен в своей динамике и структуре так как сильное влияние оказывают воды близлежащих морей [Алексеев, Радионов, 2015].

Являясь центральной, струя Обь-Енисейского течения начинает двигаться к островам Северная Земля расположенным, в дальнейшем разделяясь у берегов Таймыра и направляется к проливу Вилькицкого где может в дальнейшем и оказывать влияние на и на припай. Часть вод этого течения у берегов острова Русский разворачивает свой основной поток на север, и проходит вдоль островов Северной Земли, где после отклонения к северо-западу завершается круговорот течения северо-восточного участка.

Скорости вышеупомянутых течений поверхностных вод колеблются как правило от 5 до 15 см/с в зависимости от времени года или метеопоказателей. Скорость течений может существенно увеличиваться за счет влияния ветра, но строго при отсутствии льда как дрейфующего, так и стационарного, так, если направления течений совпадают по направлению с потоками ветра, то скорости их способны увеличиваться даже до 70-90 см/с. Велико влияние и от типа циркуляции атмосферы.

Одним из факторов изменения размерных характеристик полыньей является влияние направления ветра и его интенсивность, также порывы и их продолжительность.

Формирование Северной Новоземельской полыни происходит в основном от влияния западных направлений ветра только в самой северной его части, а именно начиная от мыса Опасного, также при устойчивом западном и северо-западном направлении проявляется влияние теплых вод, поступающих

из Баренцева моря что способствует расширению границ полыньи от границы дрейфующего ледяного поля.

При интенсивных западных и юго-западных ветрах Южная Новоземельская полынья может очень сильно увеличиваться в размерах. Также, как и в случае с Северной Новоземельской, сказывается большое влияние теплых вод из южной части Баренцева моря, приток которых происходит через расположенный ниже пролив Карские Ворота и через пролив Маточкин шар, но только в том случае если он не закрыт припаем.

Амдерминская полынья, образуется чаще всего под влиянием ветров отжимного характера, имеющих западное и юго-западное направление (также, как и СНЗ и ЮНЗ). Как правило однолетние дрейфующие льды уходят далеко от припая, и Амдерминская полынья начинает постепенно сливаться с Ямальской. Сильно и влияние теплых вод близлежащего более теплого Баренцева моря заходящие через Карские ворота и попадающие в местный круговорот течений расположенных в юго-западной части Карского моря.

Ямальская полынья, располагаясь вдоль всего западного побережья Ямальского полуострова, чаще всего раскрывается за счет восточного и юго-восточного направления ветра. Здесь стоит отметить, что крупное Ямальское течение в весенние месяцы часто играет большую роль в раскрытии полыньи и может иметь достаточно крупные размеры. Направление ветра вместе с влиянием течений, а также затоком более теплых вод Баренцева моря, часто создает ситуацию, когда разрушение припая и таяния льда происходит гораздо быстрее чем в других частях моря. Ямальская полынья часто сливается с АМ полыньей даже в зимние месяцы.

Формирование Обь-Енисейской полыньи, часто происходит из-за постоянного влияния пресных вод крупных рек Оби и Енисея. Сильное влияние оказывает, и сильная изрезанность береговой линии что приводит к увеличению длины полыньи, и тем самым увеличивая ее площадь при повышении температуры воздуха и взлома припайных льдов. Таким образом размеры

существенно меняется и порой составляют от 238 до 600 км. В наиболее холодные месяцы раскрытие полыньи и ее устойчивость также сильно зависит от изменения температуры воздуха, влияние оказывают и ветры южного и юго-западного направления. В районе острова Диксон чаще всего происходит слияние ЦК и ОЕ полыней.

Как и у всех полыней ЦК полынья имеет свои максимальные размеры в июне, так как в это время отмечается интенсивное таяние льда. Начиная с марта, когда центральная часть моря все еще покрыта льдом размеры ЦК полыньи тоже могут иметь значительные линейные размеры и площадь. В этот период особое влияние оказывают ветры западного и юго-западного направления отжимного характера.

Западная Североземельская полынья, как одна из самых удаленных и трудных в исследовании, имеет зависимость от интенсивности и направления ветра, а именно ветров восточного и юго-восточного направления. Она часто сливается с ЦК полыней, а также с полыньями моря Лаптевых, даже в самом северном участке.

1.4 Границы полыньей, характеристики слитых полыней

Заприпайные полыньи, как неотъемлемая часть ледового ландшафта, в зависимости от условий окружающей среды имеют свои режимные особенности. К таким процессам можно отнести: закрытие полыньи, раскрытие, слияние одной полыньи с близлежащими, и обратный процесс при котором происходит обособление границ или уменьшение площади до минимальных размеров.

Закрытию полыней, расположенных в разных районах моря способствуют как правило ветры прижимного характера обратные тем направлениям, которые способствуют их раскрытию (отжимной характер ветров). Также в значительной мере играют роль и изменение температуры воздуха и температуры поверхностного слоя течения о которых было сказано в подглаве 1.3.

Процесс раскрытия полыньи, всегда сопровождается рядом факторов, включающих в себя особенности рельефа береговой линии, температур и направления ветра, сильно влияние и местных факторов, например, СНЗ и ЮНЗ полыньи, располагающиеся у островов Новая Земля подвержены такому природному явлению как бора.

Слияние в свою очередь можно считать одним из видов раскрытия, или увеличения размеров и общей площади полыньи в целом. Данный процесс происходит под влиянием таяния дрейфующего льда. Чаще всего за последние годы наблюдается слияние СНЗ и ЮНЗ полыньи, ОЕ и ЦК полыньи, реже ЦК и ЗСЗ [Карелин, Карклин, 2012].

Как показали результаты работы, слияние полыней Карского моря — это такой процесс, который встречается довольно часто. За период с 2000-2022 год процент повторяемости слитых полыней, или другими словами частота слияния полыней на примере ОЕ+ЦК полынья составило 83% от всего времени существования полыньи.

Условные границы заприпайных полыней часто оказываются стертыми из-за масштабного слияния, которое часто наблюдается с марта по июнь, это создает некоторые сложности в работе через геоинформационные системы. Так был составлен новый список слитых полыней и список крупномасштабных полыней (зачастую можно наблюдать слияние полыней начиная от полуострова Ямал до самой северной точки Северной земли).

По итогу были определены слитые полыньи, которые чаще всего встречаются за исследуемый промежуток времени:

- СНЗ+ЮНЗ
- ЮНЗ+АМ
- АМ+ЯМ
- ЯМ+ОЕ
- ОЕ+ЦК
- ЦК+ЗСЗ

На рисунке 5 отмечен частота возникновения слитых полыней от общего времени исследования.

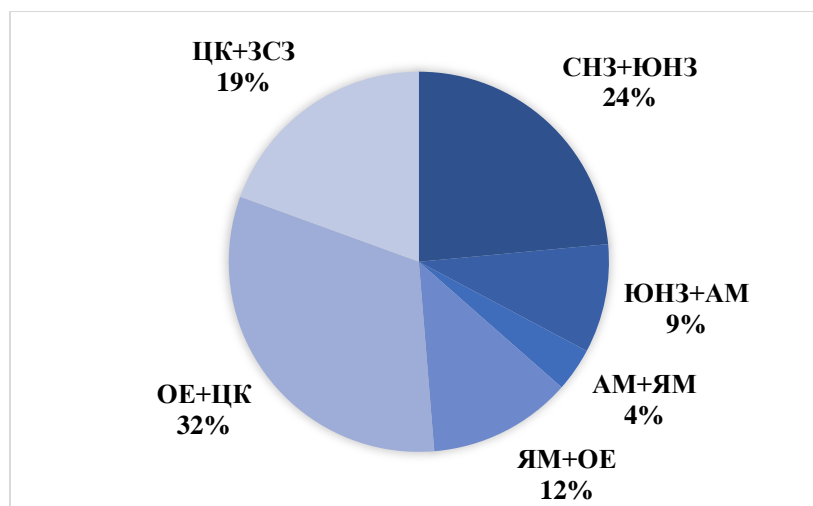


Рисунок 5 — Частота возникновения слитых полыней с 2000 по 2022 г.

Чаще всего можно наблюдать слияние Центральной Карской и Обь-Енисейской полыни, 32 % времени на протяжении года эти две полыни

являются слитыми, 24 % времени слитыми являются Северная и Южная Новоземельские полыни, а самое минимальное время, за которое полыни сливаются это Амдерминская и Ямальская и составляет всего 4 %.

Исходя из географического расположения слитых полынней было предложено внести новую классификация слитых заприпайных полынней:

- Новоземельская (НЗ)— включает в себя южную и северную Новоземельские полыни (СНЗ+ЮНЗ)
- Юго-западная(ЮЗ) — включает слияние трех полынней, южную Новоземельскую, Амдерминскую и Ямальскую (ЮНЗ+АМ+ЯМ)
- Центральная (Ц) — самая протяженная крупномасштабная полынья включает слияние Обь-Енисейской и Центральной Карской полыни (ОЕ+ЦК)
- Северо-восточная (СВ) — это слияние только Центральной Карской и Западной Североземельской полыни (ЦК+ЗСЗ)

Исходя из вышесказанного был составлен рисунок 6 на котором отражена частота возникновения крупномасштабных слитых заприпайных полынней.

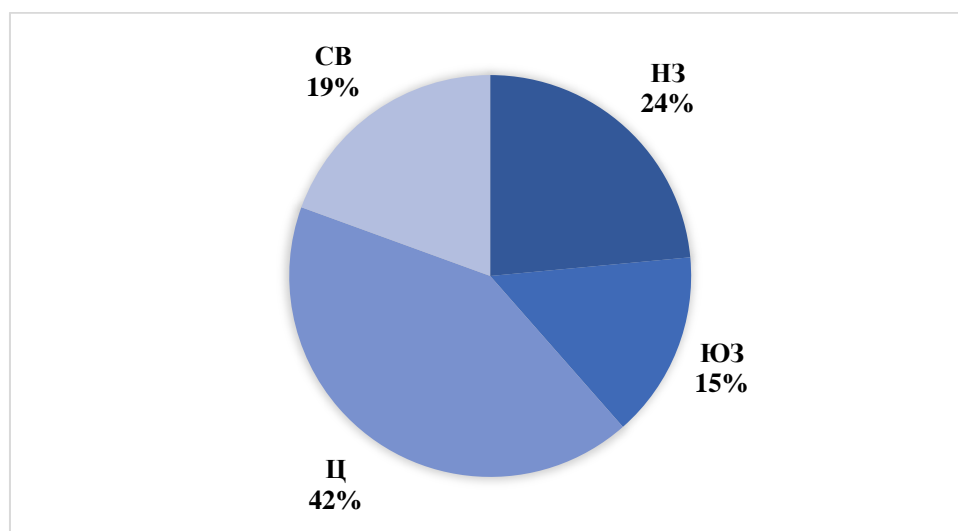


Рисунок 6 — Частота возникновения слитых крупномасштабных полынней с 2000 по 2022 г.

Для упрощения задачи по исследованию слитых друг с другом полыней, как было отмечено выше можно принять во внимание новый вид классификации. Проблему составляет тот факт, что при работе в ГИС разделение полыней не всегда является возможным или рациональным. Так как частота слияния полыней сильно выражена даже в период одного года, то в данном случае считать две или даже три слитых полыньи за 1 крупномасштабную будет более корректно в рамках данного исследования.

К процессу обратному, то есть процессу обособления полыньи приводит как правило резкая смена температуры воздуха, при которой даже на месте пролегания местных течений (рисунок 4) начинает образовываться тонкий лед толщиной не более 30 см, то есть данную область уже нельзя назвать полыней. Вследствие увеличения толщины льда и происходит процесс обособления полыньи и возвращение ее к своим привычным границам.

Глава 2 Методы обработки ледовых карт при помощи геоинформационной системы ArcGIS.

2.1 Обработка данных с помощью геоинформационной системы ArcGIS

Для более точной оценки режимных особенностей и характеристик полыней использовались региональные ледовые карты ААНИИ с 2000-2022 гг.

Ледовые карты как глобальные, так и региональные создаются на основе спутниковых снимков, используемых специалистами для определения ледовой обстановки. При создании ледовых карт используются основные характерные показатели такие как:

- Площади и толщины припайного льда
- Сплоченность дрейфующего льда
- Толщины дрейфующего льда
- Наличие полыней и разводий
- Наличие торосов и стамух
- Общее количество всех элементов ледового ландшафта

Для точного анализа были использованы региональные карты Карского моря за период с конца ноября и до начала июня.

Для более удобной работы в геоинформационной системе ArcGIS создаются отдельные редактируемые документы в формате «. shape» для последующего выведения данных в другие программы для упрощения работы с ними. Основной редактируемый слой является рабочим документом, в который можно вносить поправки и изменения, так стандартная таблица атрибутов при работе включает в себя столбцы с датой отдельно взятой карты, площади полыньи в зависимости от ее положения и толщины льда (если таковой имеется), а также наличие слитых или разрозненных полыней.

После создания рабочего файла открывается ледовая карта на определенную дату (расположение даты в share-файле: год, месяц, число) и привязывается к географическим координатам базового слоя представляющего собой береговую линию северных морей с островами и полуостровами.

При настройке рабочей карты используется распределение цветов в зависимости от толщины и сплоченности льда, учитываются и характеристики припая, его площадь и размеры. Становление припайного льда как правило является отправной точкой для начала работы, так как существование полыньи можно считать только то время после которого произошло становление припая без его дальнейшего разрушения. Наблюдения показали, что за последние 20 лет стабильное образование припайного льда начинается только с третьей декады ноября.

Возрастные характеристики льда, его сплоченность и распределение можно визуализировать в ГИС с помощью векторного архива для чтения закодированной информации «SIGRID-3: A VECTOR ARCHIVE FORMAT FOR SEA ICE CHARTS» на данный момент он является международным и действующим документом, принятым Всемирной метеорологической организации (ВМО) для ледовых карт в глобальном банке цифровых данных по морским льдам (GDSIDB). Этот формат Sea Ice Grid (SIGRID), объединяет в себе два архива SIGRID и SIGRID-2 как стандартные форматы для ВМО. Распределение цветов карты можно может проводиться вручную или с помощью базовых цветов с выделением нужных объектов и их контуров. После определения нужных участков, в самой программе производится расчет площадей и линейных размеров стационарных полыньей. Работа с полями чистой воды и тонкого льда включает в себя разделение границ полыней на 7 отдельно взятых полигонов, и при наличии слияния учет общей площади слитых полыней.

После получения массива данных еще в таблице атрибутов в ГИС производится необходимый расчет геометрии площадей из стандартных кв. м в кв. км, или другие единицы измерения необходимые для дальнейшей работы. Параметры линейных размеров также рассчитываются и переводятся в нужные величины для дальнейшей работы с файлом. В таблице атрибутов выделенного слоя можно ранжировать данные в том порядке, который необходим для дальнейших шагов в обработке данных.

Таким образом проводится обработка каждой карты за определенный день в месяце, региональные карты составляются ААНИИ с дискретностью каждые 7 дней. Так как полыньи встречаются не на каждой карте, в силу того, что постоянный дрейф льда и влияние метеорологических показателей имеют достаточное влияние на положение полыней, то в табличных данных могут встречаться пропуски. Если такое происходит, то дополнительно идет проверка через спутниковую информацию, и уже после проверки, когда достоверно известно отсутствие полыньи, пропуск в данных остается.

Для последующего проведения анализа и построения графиков данные переносятся в таблицу Excel где уже потом можно производить расчеты с другими не связанными с ГИС гидрометеорологическими величинами и показателями теплового баланса.

Для примера обработки данных в Excel представлена таблица 1 где отражено изменение среднемесячных значений площадей ЦК полыньи за период с декабря по июнь. Центральная Карская полынья считается самой крупной из всех, также, как и ее повторяемость в течении даже одного отдельно взятого года составляет от 90 % до 100%. Подобные таблицы по другим полыньям Карского моря представлены в приложении 1-6.

Таблица 1 — Среднемесячные площади Центральной Карской полыньи за 2000-2022 г.

Центральная Карская 2000-2022 год							
год	Площадь тыс. км ²						
мес	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	декабрь
2000	3539	3747	13483,92	21031	12871	8758	4825
2001	7532,907	39665,27	30202,84	25115,14	27389,93		13377
2002	25284,92	65371,48	25901,88	7254,09	13448	19023	10320
2003	7181,909	14727,11	8674,914	4528,89	7969,542	4365	
2004	25986,42	62945,18	87591,57	51497,19	49981,09	21342	
2005	12362,13	6017,415	6039,665	18075,56	22726,88	21545	31516
2006	5354,872	2940,502	7346,028	18800,64	17715,51		11508
2007	18998,24	10974,82	5657,402	2572,639	10533	37572	8898
2008	6703,217	10821,32		8979	28527	43467	
2009	15459,18	23198,62	5996	7888,179	11519	8193	8527
2010	10451,68	15290,13	23935,85	9100,972	6692,004	49616	9515
2011	4637,815	5724,962	7477,488	8169,97	15932,57	37985	13167
2012	6734,322	3679,035	7150,763	7416,907	5594,853	8791	22898
2013	31870,17	7151,027	14757,14	10346,58	3315,402	4227	9904
2014	9424,726	3219,628	3183,686	3113,454	3731,841		16321
2015	3385,332	4139,622	4034,115	10631,46	13140		33033
2016	7028,179	8230,632	15667,79	7818,369	18255	19450	
2017		9913	12796	12564	15289	26226	21839
2018	5527,994	1760,081	10941,8	4785,24	8158	22848,81	8512
2019	24277,82	3394,285	7289,461	4245,555	15761,58	9200,157	13163
2020	21249,34	15181,21	4957,039	7247,608	10547,53		15590
2021	11685,5	8281,997	4477,449	4218,681	4320,175		
2022	9080,051	19640,02	5224,697	6708,02	4675,475		
Повторяемость,%	95	100	95	100	100	72	78
мах	31870	65371	87592	51497	49981	49616	33033

Для наглядности строятся диаграммы и графики, на примере рисунка 7 можно понять изменение площади полыньей за определенные периоды времени.

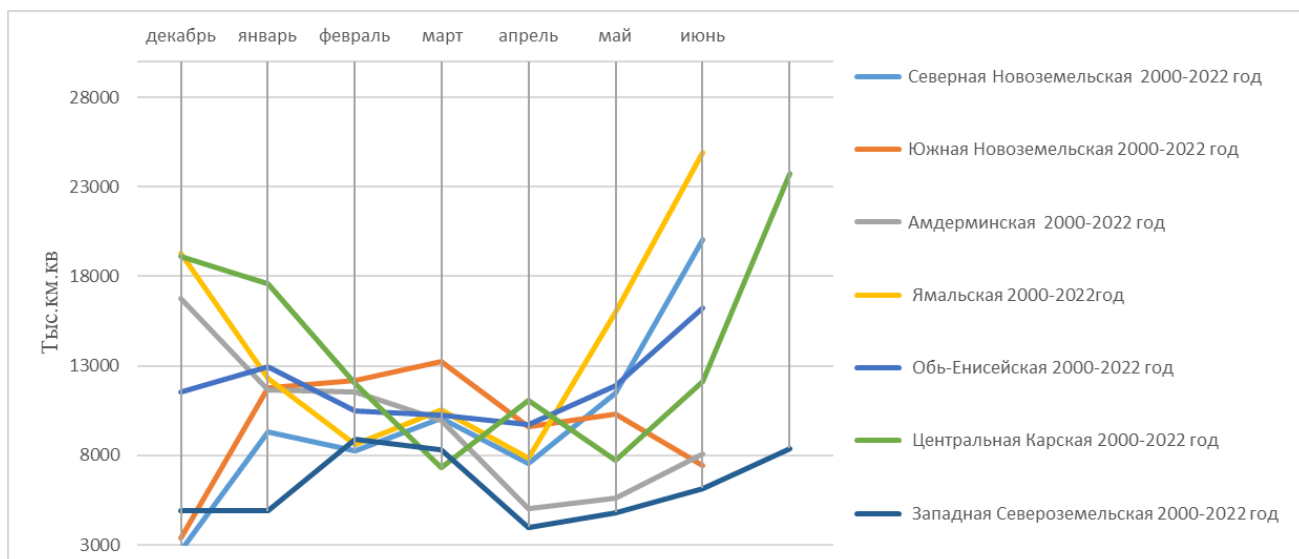


Рисунок 7 — Площадей заприпайных полыньей Карского моря за 2000-22 г.

При недостатке или отсутствии информации за какой-либо период времени помимо ледовых карт использовались спутниковые снимки NOAA-19 для работы с которыми использовалась программа ENVI. ENVI используется для визуализации и обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), полный цикл обработки включает в себя использование набора инструментов от ортотрансформирования и пространственной привязки изображения до получения необходимой информации и её интеграции с данными ГИС.

В том случае если недостатка информации на спутниковых снимках (облачность более 5 баллов, отсутствие данных на определенный промежуток времени) все же происходил, то использовались глобальные ледовые карты арктических морей ААНИИ. Глобальные ледовые карты показывают общую ледовую обстановку во всех Арктических морях сибирского шельфа, включая разные виды льдов, их дрейфа и сплоченности. глобальные карты не показывают всех необходимых показателей полыней, но хотя бы дают возможность оценить ледовую обстановку, и в целом оценить процессы ледообразования в нужном регионе.

Глава 3. Динамика заприпайных полыньей Карского моря и влияние метеорологических характеристик за период 2000-2020 г.

3.1 Характеристики площадей полыней

На протяжении многих лет сотрудниками ААНИИ ведется активное исследование ледового ландшафта и в том числе полыней. Динамика и процессы ледообразования, а также особенности атмосферных процессов над Российской Арктикой всегда являлись основными объектами изучения как много лет назад, так и на сегодняшний день.

В связи с тем, что к 2024 году планируется существенное увеличение навигационного сезона, а именно навигации и в зимний период, то возрастает потребность в мониторинге ледообразования. Карское море является районом активной зимней навигации даже сейчас, и важнейшим местом разработки полезных ископаемых. Расширение хозяйственной детальности и новые пути транспортировки ресурсов на данный момент являются исключительно актуальной темой как в исследовании ледовых полей, так и в планировании маршрутов для судовождения. Так как полыньи являются наилегчайшим путем в зимней навигации, то изучение характеристик и особенностей прогнозирования раскрытия полыней также можно считать актуальным.

Объем и точность данных наблюдений за заприпайными полыньями Карского моря существенно возрос с 1973 г., с увеличением интенсивности плавания судов на Енисей в зимний период (с октября по май), и с появлением спутниковой информации [Карелин, Карклин 2012]. Это отмечается в работе В. П. Карклина и И.Д. Карелина где были приведены результаты многолетних наблюдений за припаем и заприпайными полыньями арктических морей, в том числе Карского моря, с 1980 по 2009 гг.

Однако за последнее десятилетие наблюдается существенное изменение ледового режима Арктических морей, исходя из данных монографии [Карелин, Карклин 2012] и сравнивая с современными данными полученными

за счет распространенности спутниковой информации, можно отметить что ледовая обстановка от года к году стала изменяться в ускоренном темпе.

Во время обработки ледовых карт был отмечено раннее таяние льдов весной и позднее замерзание акватории осенью. Это привело к необходимости сократить исследуемый период с января по декабрь, так как период с 2000-2022 год в ноябре еще не происходит становление припая и полноценного оледенения Карского моря.

В данной главе приведены результаты мониторинга состояния заприпайных полыней в Карском море в современный климатический период — за последние 20 лет.

На рисунке 7 представлен Обобщённый шейп-файл с полынями 2000 — 2022 г. составленные по средним размерам полыней за весь исследуемый период с помощью программы обработки геоинформационной информации ArcGIS.

Даже по обобщенным данным можно оценить тот факт, что, начиная от пролива Карские ворота до Северной земли можно наблюдать полыни практически вдоль всего припая, что при использовании в ледовом плавании существенно облегчает и способствует увеличению проходимости судов через Карское море.

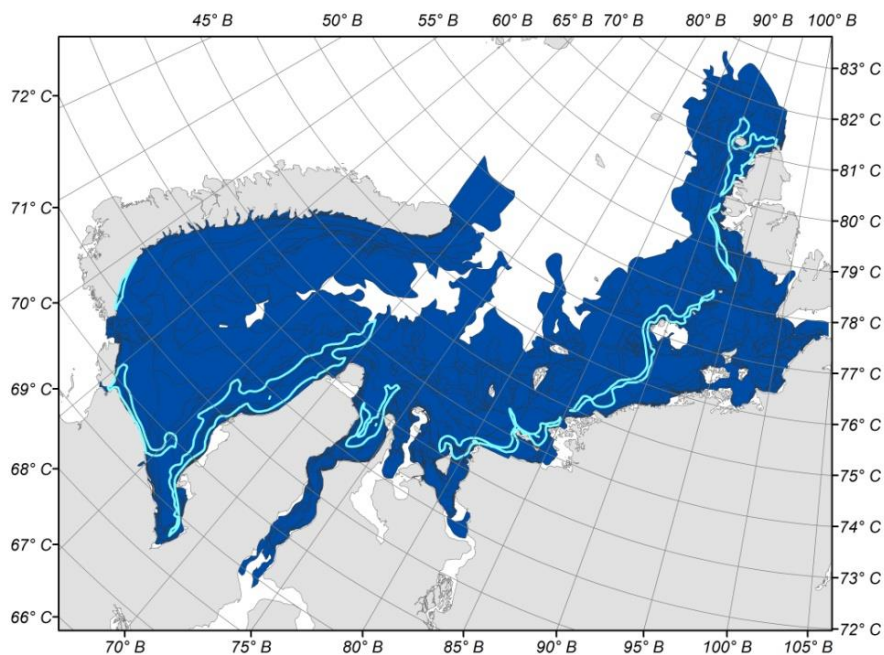


Рисунок 7 — Обобщённый шейп-файл с полыньями 2000 — 2022 г.

[Составлено автором в геоинформационной системе ArcGIS]

После сбора необходимой информации по полыньям, был составлен архив пространственных данных по площадям всех полыней Карского моря, а также трех стационарных полыней ЗФИ.

Для точного анализирования данных были составлены графики изменчивости площадей полыней за период исследования, приведены средние значения площади полыней за каждый месяц, таким образом наглядно можно судить о размерных характеристиках каждой отдельно взятой полыни. Еще в самом начале работы с данными было отмечено несколько особенностей в формировании структур и размеров участков тонкого лада и воды особенно в юго-западном участке моря. Это можно наблюдать на рисунках 9-13, и более привычное и стабильное развитие в северо-восточной части моря. На рисунках приведены кривые максимальных значений площади за период с 2000 по 2022 гг. Кривые максимальных значений показывают амплитуду межгодовой изменчивости площади полыней, которая позволяет корректно оценить изменчивость характеристики относительно средне многолетних показателей.

Далее на рисунках 9 и 11-17 будут представлены графики среднемноголетней изменчивости площадей в современной климатической обстановке, и описание особенностей формирования полыней за исследуемы отрезок времени, отличительные особенности и влияние некоторых факторов, которые можно отследить еще на этапе поверхностного анализа данных полученных в ГИС.

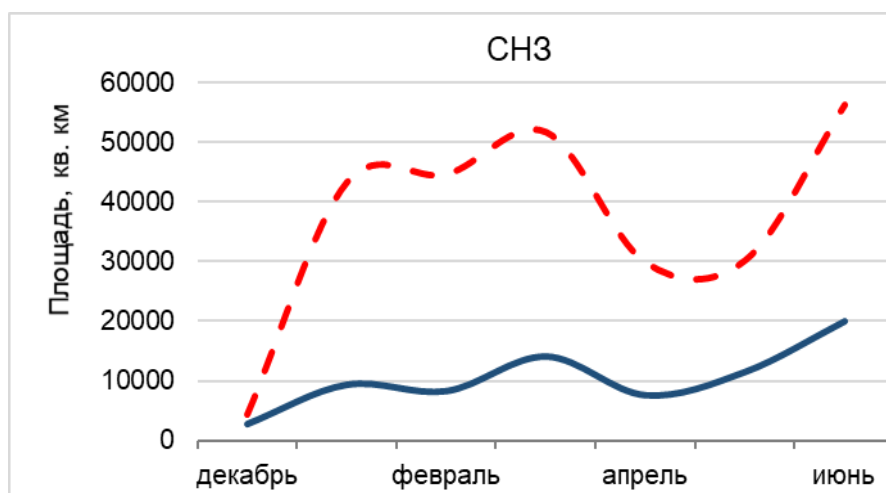


Рисунок 9 — Межгодовая изменчивость Северной Новоземельской полыньи

Синяя сплошная кривая — средние значения 2000 — 2022 гг.; красная пунктирная кривая — максимальные значения

Северная Новоземельская полынья в силу того, что располагается в зоне влияния теплых вод из Баренцева моря, имеет очень ярко выраженные максимумы площадей.

Рассматривая средние показатели хочется отметить, что в марте, в этот период акватория моря имеет достаточно высокую сплоченность и толщину льда, мы можем наблюдать достаточно значительные размеры полыньи, а именно 14088 км². В то время как далее в апреле происходит уменьшение размеров и в среднем может быть от 7000-8000 км². Вполне очевидно, что в июле, когда происходит активное таяние ледяных полей площадь будет расти, но на фоне еще не разрешенного припая площадь как правило может достигнуть в некоторые года даже отметки в 20000 км².

Если анализировать средние значения площади за весь год, то стоит отметить одну из отличительных особенностей, в начале ледообразования (начало его приходится на середину ноября), а также в период полного оледенения мы видим на графике сильное снижение показателей площади. Более заметно это выражено через кривую максимальных значений. Такое сильное снижение, а точнее отсутствие полыней, связано это в первую очередь с особенностью оледенения юго-западной части Карского. Здесь при современных климатических условиях можно наблюдать позднее оледенение, что приводит к затруднению в исследовании. Оно может быть связано с особенностью расположения Новой земли, местные течения и влияние теплых вод Баренцева моря, непосредственная близость пролива Карские ворота, в целом оказывают существенное влияние на ледовую обстановку.

При рассмотрении и обработке ледовых карт было выявлено, что в юго-западной части Карского моря стабильное образование дрейфующего, а также стационарного припайного льда происходит гораздо позже начала декабря.

На рисунке 10 представлена региональная ледовая карта ААНИИ на которой вся юго-западная часть покрыта тонкими льдами до 30 см толщиной. Приведена карта за середину января 2019 г.

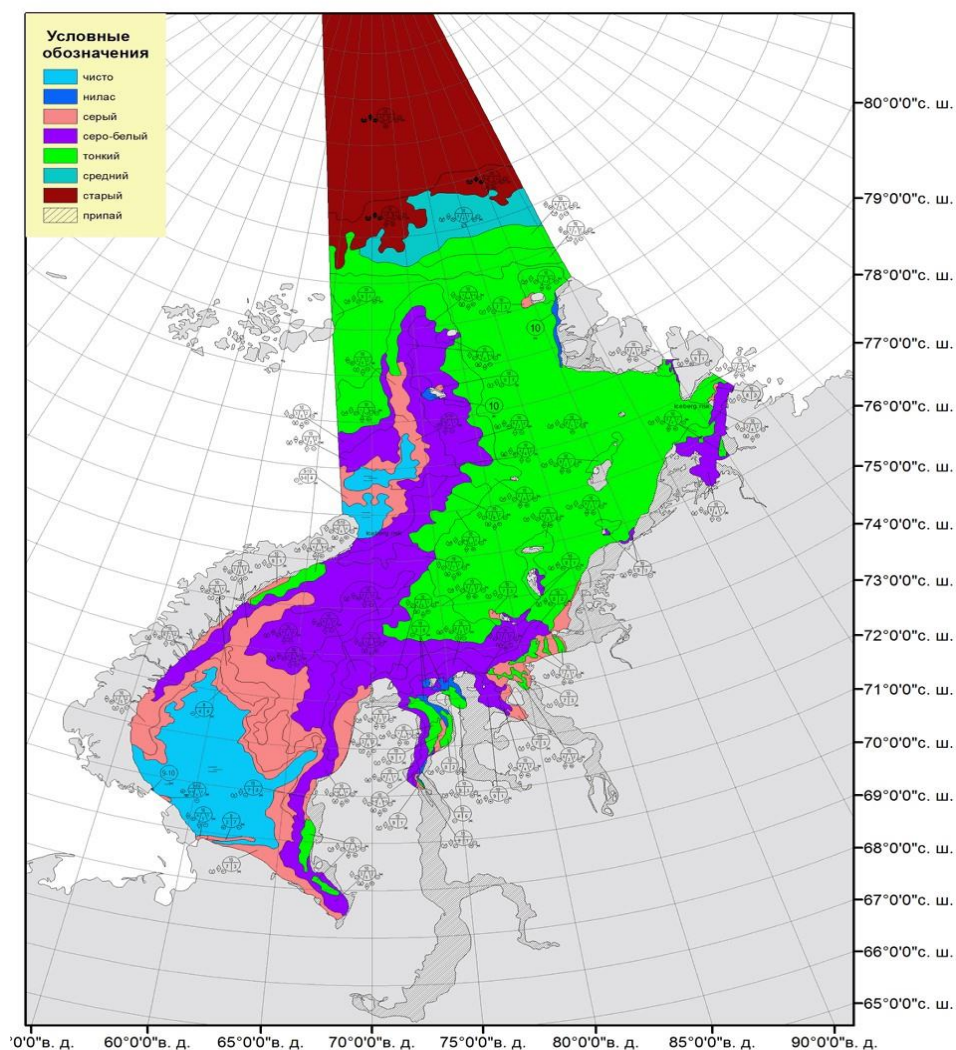


Рисунок 10 — Ледовая обстановка Карского моря за январь 2019 г.

Рисунок отражает тот факт, что при наличии припайного льда стабильного ледообразования в юго-западной части не происходит. Так как полынья — это именно участок чистой воды или тонкого располагающегося за припаем при стабильном ледообразовании, то тогда даже чистая вода за припаем, не является полыньей. Отсюда получается, что при такой обстановке показатели по толщине льда не могут быть внесены в архив данных. Они игнорируются вплоть до того момента пока не стабилизируется образование льда без дальнейшего его таяния, это проверяется при просмотре карт за следующие даты.

максимальные значения отмечаются в марте с февраля по март, в этот период отмечена достаточно большая по площади полынья, которая составила 52321 км². И максимум, более очевидный, в июне 56300 км².

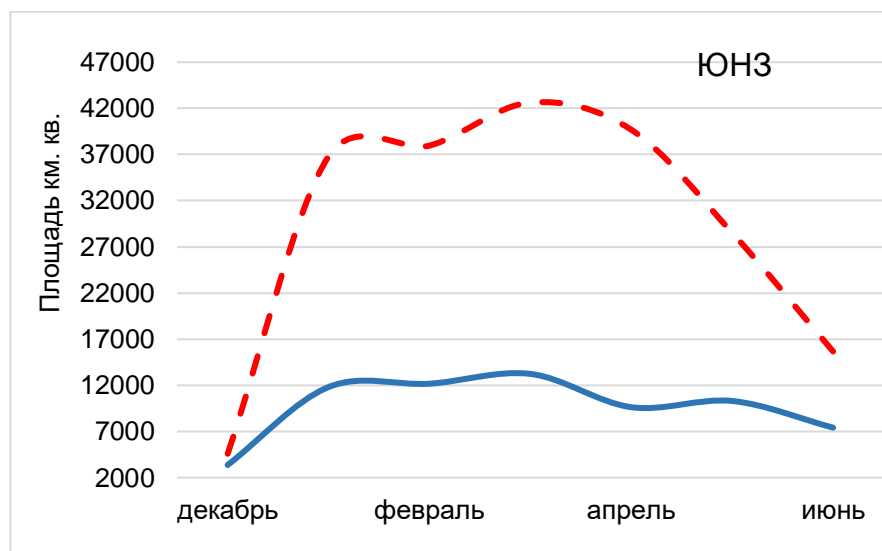


Рисунок 11 — Межгодовая изменчивость Южной Новоземельской полыньи

Синяя сплошная кривая — средние значения 2000 — 2022 гг.; красная пунктирная кривая — максимальные значения

На рисунке 11 можно наблюдать изменчивость площадей, как и на рисунке 9 можно здесь присутствует уменьшение размеров стационарной Южной Новоземельской (ЮНЗ) полыньи начале зимнего сезона, декабре-январе. Это связано с особенностью географического положения ЮНЗ полыньи, она располагается между проливом Маточкин Шар и крупным проливом Карские который имеет ширину 50 км. Как было отмечено выше в данной точке очень велико влияние воды из Баренцева моря, которое своим влиянием способно в еще большей степени влиять на формирование ледяных полей и как следствие на положение и размер полыньи.

Существенное увеличение размеров наблюдается в феврале, среднее значение за 2000-2022 гг. 12174 км², и далее практически весь март и начало апреля можно наблюдать плато за весь период которого площадь приблизительно равна от 10000 км² до 13000 км². На графике можно отметить

размер полыньи в июле, он может показаться намного меньше чем в другие месяцы примерно 7000 км² и меньше. Это связано с более ранним таянием льдов, а порой и полным очищением ото льдов в юго-западной части акватории. Здесь присутствует похожий механизм таяния, как и в начале зимнего сезона, то есть влияние залива теплых вод соседнего моря.

Также на графике присутствуют максимальные значения полыньей за период с 2000-2022 гг. в марте- апреле отмечена самая большая показатели площади, которая составила 42631 км². В момент начала стабильного ледообразования, как и в случае со средними показателями с февраля по начало апреля наблюдается плато прерываемое в июне, так как в это время заканчивается сезон.

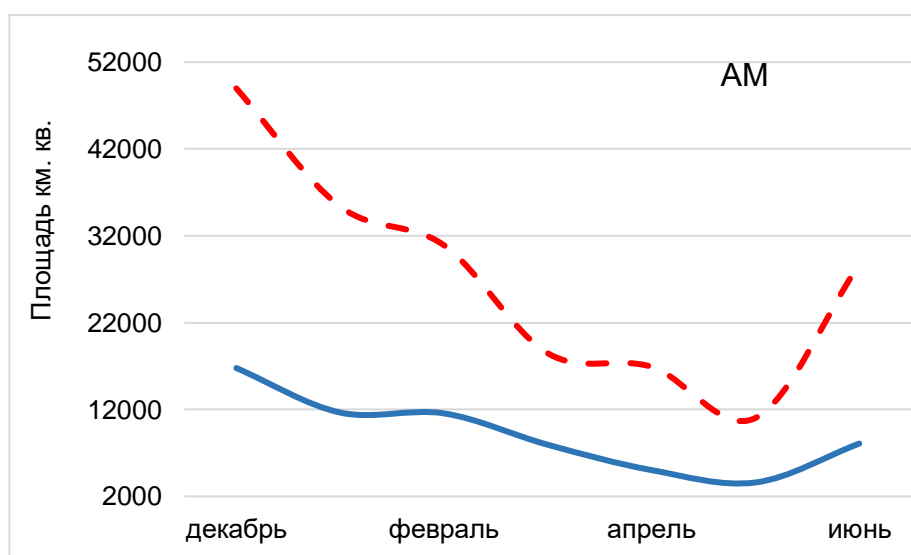


Рисунок 12 — Межгодовая изменчивость Амдерминской полыньи

Синяя сплошная кривая — средние значения 2000 — 2022 гг.; красная пунктирная кривая — максимальные значения

Отмеченная на рисунке 12 Амдерминская полынья, как правило из-за близости пролива Карские ворота имеет схожую с ЮНЗ полыньей динамику в течении года. Здесь существенную роль играют течения и не смотря на непосредственную близость пролива, обычно теплые воды

распространяются на север, что безусловно оказывает влияние, но имеет более сглаженный характер.

Для АМ полыньи характерно уменьшение площади полыньи ближе к весенним месяцам, так своего максимума по среднегодовым показателям площадь достигает в феврале и составляет 11500 км². Далее начиная с марта по май, повторяясь на протяжении многих лет, идет уменьшение до 3400 км² и вплоть до полного закрытия полыней (как правило это происходит в первой декаде мая). Перед полным таянием ледяных полей в конце мая, пока еще держится припай, площадь АМ может достигнуть 8000 км².

Стоит обратить внимание и на максимальные значения, если полынья достигает своих максимальных размеров, а это около 35000 км², то происходит идентичная ситуация как и со средними показателями.

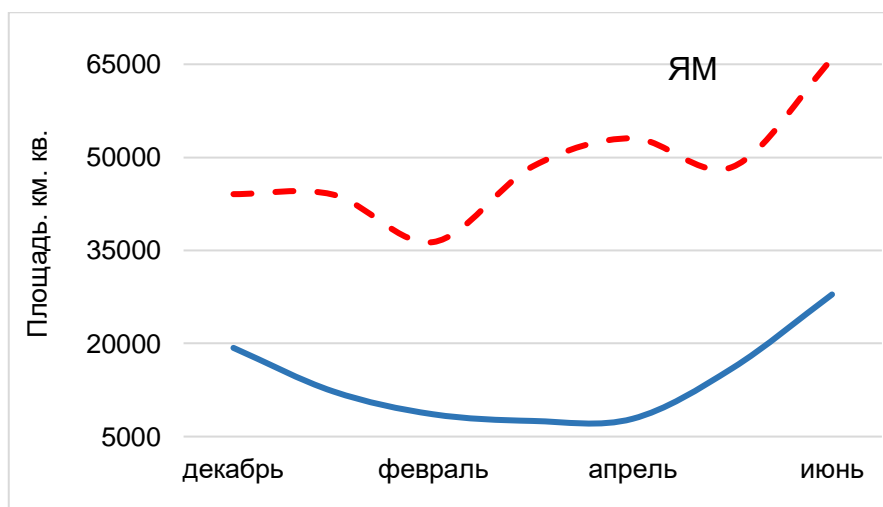


Рисунок 13 — Межгодовая изменчивость Ямальской полыньи

Синяя сплошная кривая — средние значения 2000 — 2022 гг.; красная пунктирная кривая — максимальные значения

Показатели Ямальской полыньи (рисунок 13), в виду близкого расположения к АМ полыньи во многом схожи с друг с другом. Здесь можно наблюдать (чаще чем АМ) более значительное уменьшение размеров площади

чем у АМ. Начиная с декабря, не смотря на особенность ледообразования Юго-западной части моря, в декабре и январе полынья присутствует без размытия своих границ и слияния с более тонкими льдами, как например ЮНЗ. В январе она может достигать 12000 км², но (приблизительно с 2 декады февраля) ближе к марту наблюдается снижение размеров до 7000 км² до 9000 км², которое продолжается до первой декады мая. В мае, когда еще возможно отследить формирование и полынья еще отвечает заданным критериям ее площадь достигает 16000 км² и далее растет вплоть до полного освобождения моря от толстых однолетних льдов.

Максимальные значения (если таковые достигаются) могут иметь волнообразный характер, с увеличением в марте-апреле где могут достигать и 55000 км².

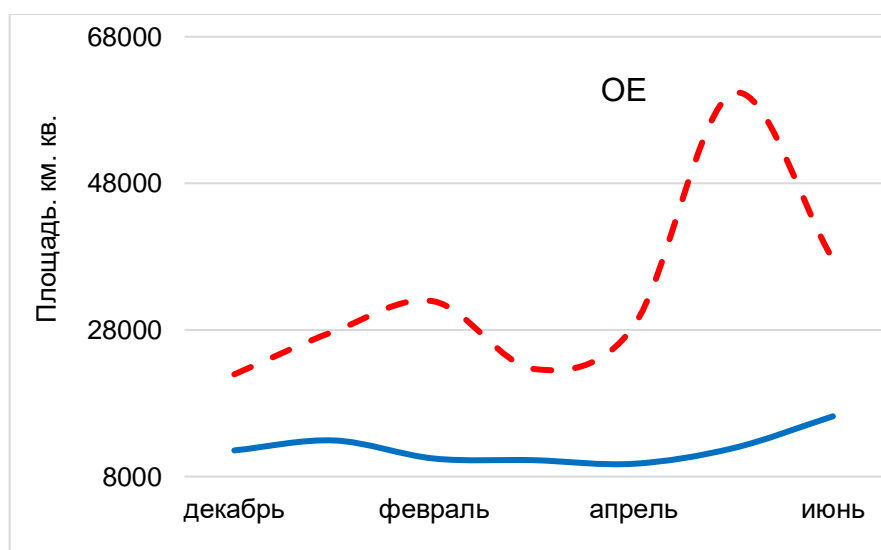


Рисунок 14 — Межгодовая изменчивость Обь-Енисейской полыньи

Синяя сплошная кривая — средние значения 2000 — 2022 гг.; красная пунктирная кривая — максимальные значения

Беря во внимание особенности формирования Обь-Енисейской полыньи, а также обилие факторов на нее влияющих стоит отметить, что она является не стабильной хоть и стабильной (постоянно присутствующей)

полюньей среди всех наблюдаемых в Карском море. Она располагается в месте впадения в море крупных рек таких как Обь и Енисей, воды которых несут большое количество пресной воды, которая смешиваясь с соленой водой приводит к нестабильности ледообразования, периодическому и преждевременному взлому припайного льда, это в значительной мере осложняет наблюдение за ее показателями.

Значения площади ОЕ полюньи (рисунок 14) в течение всего периода значения как правило варьируются от 9000 км² до 13000 км². Отличительной особенностью можно считать тот факт, что Обь-Енисейская полюнья не всегда образуется в привычном виде, то есть не как вытянутая вдоль припая узкая полоска чистой воды или молодого льда, ОЕ полюнья больше напоминает комплекс обособленных участков или разрывов в ледяном покрове за пределами припая, которые часто меняют свои размеры и форму (зачастую от недели к неделе могут наблюдаться разрывы в абсолютно разных местах). За исследуемый период сложно обнаружить, чтобы на одном и том же месте образовывалась идентичная по форме и размеру полюнья. Часто происходит слияние ОЕ и ЦК, это усложняет задачу так как приходится разделять одну слитую на два отдельных участка в районе острова Диксон.

Как показано на рисунке 14, если не брать во внимание особенности строения и расположения ОЕ, то на протяжении всего года площадь остается практически одинаковой без разительных изменений.

Если обращаться к максимальным значениям, то в целом, самые большие значения достигаются в мае и могут достигать даже 60300 км². За последнее время, а именно с 2010 по 2019 г., частота возникновения и размеры ОЕ возросли, это можно сравнить с данными 1980-2000 г. описанными в монографии [Карелин, Карклин 2012] где максимальные значения могли достигать лишь 20000 км².

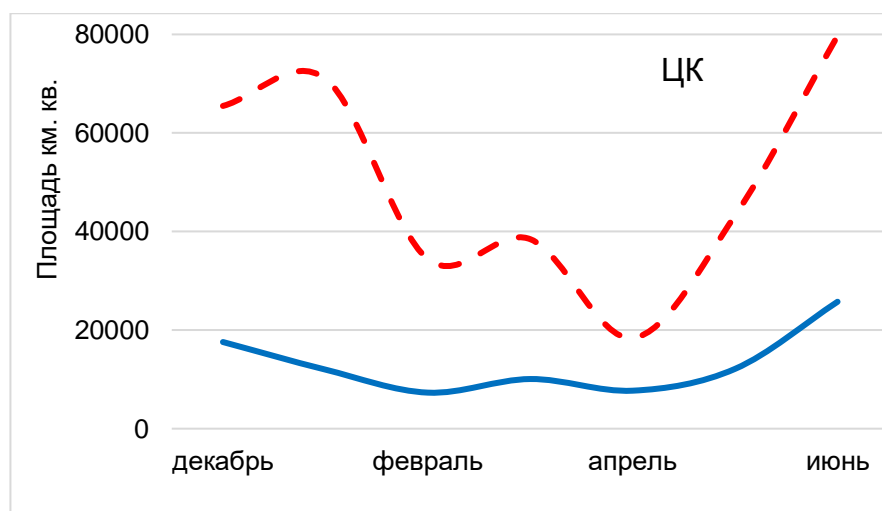


Рисунок 15 — Межгодовая изменчивость Центральной Карской полыньи

Синяя сплошная кривая — средние значения 2000 — 2022 гг.; красная пунктирная кривая — максимальные значения

Наиболее крупной и протяженной вдоль материковой зоны стационарных полыней является Центральная Карская полынья, приблизительно установленные границы, которой расположены от острова Диксон до припайной зоны напротив пролива Вилькицкого. Для ледового плавания ЦК представляет наибольшую ценность, так как линейные размеры и повторяемость позволяют проходить большой участок Северного морского пути (далее СМП) без значительных препятствий. Расположенная за пределами припаяя полоса тонкого льда может проходить дальше к северу и сливаться с ЗСЗ полыней образуя непрерывную линию, которая уходит в море Лаптевых сливаясь там с другими полынями.

По своим площадным значениям ЦК хоть и имеет большую протяженность, но примерно сопоставима с ОЕ, так как она представляет собой длинную узкую полосу за припаем, которая развита больше в длину, хотя также, как и ОЕ может представлять из себя череду не связанных друг с другом разрывов льда в которых будет чистая вода или тонкий лед, либо начальные формы льда такие как серый и белый нилас.

В среднем размеры ЦК (рисунок 15) достигают примерно 12000 км² в январе и мае, и 7000 км² в апреле. Максимальные же значения (аномально крупные полыньи) зачатую бывают 70000 км² и более. Такие аномалии не очень часто встречаются, но, как и в случае с ОЕ с 2010 по 2019 г. учащаются, и начинают происходить не только в начале и конце сезона, но и в феврале-марте.

Если рассматривать максимальные значения то можно заметить их существенное снижение в апреле 18300 км², в большинстве случаев это обусловлено повышением давления дрейфующего льда на области полыней в апреле, а также особенностями дрейфа однолетних средних и однолетних толстых льдов которые чаще всего можно наблюдать в северо-восточной части Карского моря. Далее с мая площади начинают расти и в конечном итоге полынья достигает своих самых крупных размеров.

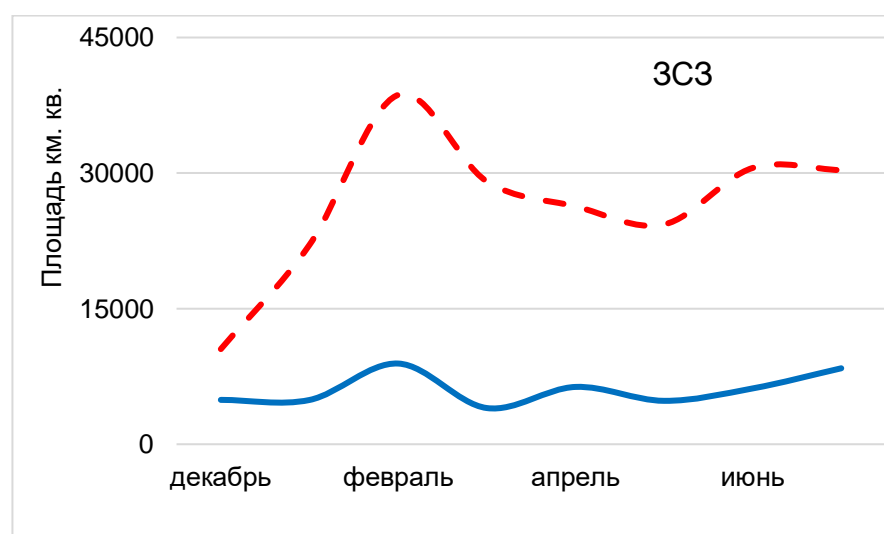


Рисунок 16 — Межгодовая изменчивость Западной Североземельской
полыньи

Синяя сплошная кривая — средние значения 2000 — 2022 гг.; красная
пунктирная кривая — максимальные значения

Западная Североземельская полынья, представленная на рисунке 16 имеет не такие значительные линейные размеры как ЦК полынья, но она также является стационарной на протяжении зимнего периода.

Ее средние размеры как правило не превышают 9000 км^2 , причем своих максимальных размеров по средним значениям она достигает в феврале и составляет 8399 км^2 . Далее в марте и до второй декады мая размеры ее держатся примерно от 4000 км^2 до 5000 км^2 . Очень часто при хорошо развитом припае ЗСЗ сливается с ЦК полыньей что в значительной мере продлевает время существования в раскрытом виде ЗСЗ. Тут большую роль играют крупные местные течения которые гонят воды с юго-западной части Карского вверх в северную часть акватории.

ЗСЗ в отличии от остальных полыней не подвержена такому влиянию течений, и ее размеры по большей части регулируются тем, что она больше всех приближена к водам Северного Ледовитого океана. Ее географическое положение и близость к морю Лаптевых во многом характеризует ее средние и максимальные размеры. По сравнению с ЦК максимальный размер встречающийся на протяжении всего периода исследования достигал максимум до 30000 км^2 .

Изменение размеров от месяца к месяцу как средних, так и максимальных является, в отличии от других, идентичным и имеет повышение в феврале и дальнейшее понижение до второй декады мая.

3.2 Повторяемость присутствия полыней

Основополагающим критерием в определении стационарности полыней является процент ее повторяемости в раскрытом виде за зимний период года. От того как много времени в году участок имеет пространство с чистой водой или покрыт начальными видами льдов, зависит то как будет выглядеть ледовый ландшафт и режим в данный год, ведь полыньи зимой являются активной зоной продуцирования молодых льдов. На которые в свою очередь всегда ориентируются судоводители в время ледового плавания.

Для того чтобы понять в какие месяцы в основном наблюдались участки полыней был составлен график повторяемости в зимние месяцы (рисунок 17), на графике представлена повторяемость в процентах за исследуемый период с 2000 по 2022 г.

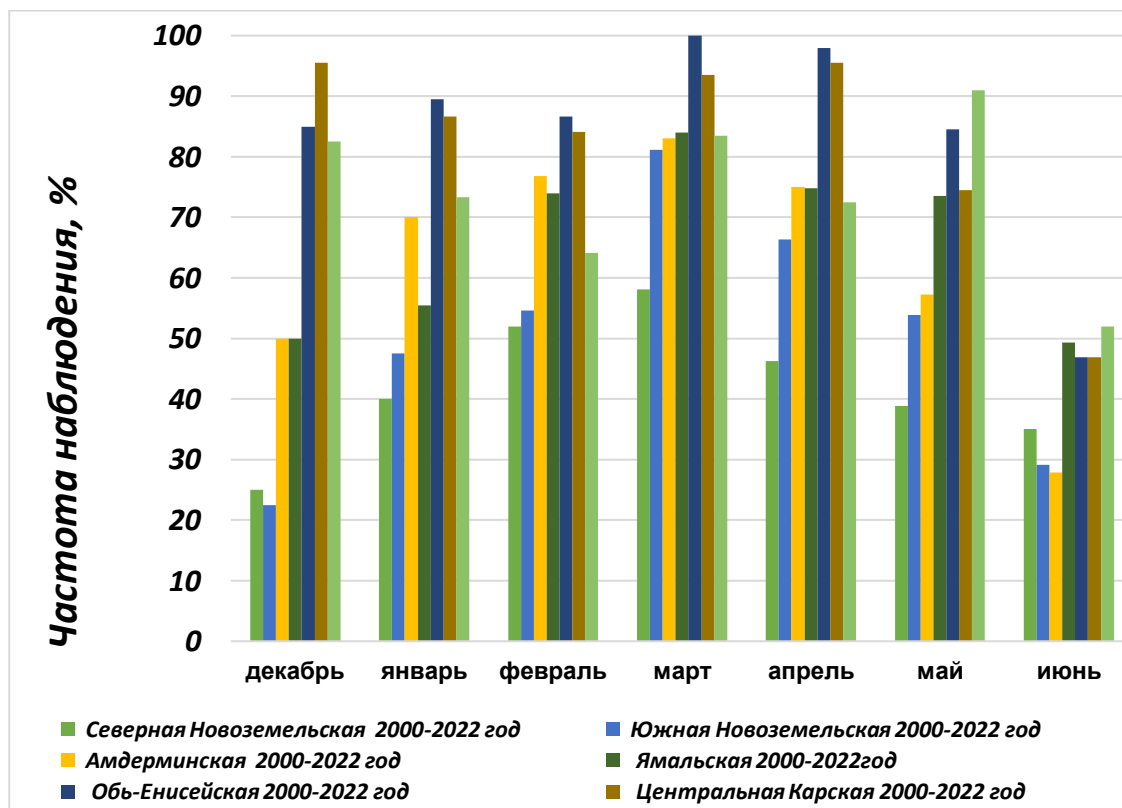


Рисунок 17 — Процент повторяемости полыней Карского моря с 2000 по 2022 г.

Обращаясь к рисунку на рисунке 17 можно наблюдать сильное снижение повторяемости за период с 2000-2020 гг. Это непосредственно связано с ранним таянием льда в юго-западной части Карского моря и быстрым таянием начиная со 2 декады мая, которое показало себя еще с 1998 г. начиная с 2000 г. привычное для Карского моря оледенение которое начиналось с октября больше не наблюдается, а количество даже молодого льда которое до 2000 г наблюдалось с 1 декады октября, теперь наблюдается с начала ноября. Также и с ранним таянием, еще в 90-х годах 20 века активное разрушение и таяние льда начиналось с июня, но сейчас в июне акватория Карского моря практически полностью очищается ото льдов за исключением тех участков где ежегодно наблюдаются ледяные массивы повышенной сплоченности и торосистости.

СНЗ и ЮНЗ всегда ниже в январе- феврале, а также в мае составляет как правило 30-50%. Как было упомянуто выше это связано с поздним становлением припая и стабильным ледообразованием. Повторяемость имеет заниженный характер, так как учитывается, что по всей протяженности полыней есть сильное влияние теплых вод ближайшего моря. Начиная с марта по апрель за 2000-2022 гг. полынья была раскрыта 80% времени.

Из-за близкого расположения АМ полыньи к пр. Карские ворота, повторяемость не может быть корректно описана и обоснована так как вблизи пролива происходит заток теплых вод, который приводит к разрушению припая и дрейфующего льда. С марта по май отмечается увеличение случаев 2000-2022 гг. полынья была раскрыта 83% времени, в апреле за 2000-2022 гг. полынья была раскрыта в 75% случаев.

Как и в случае с вышеупомянутыми полыньями, Ямальская (ЯМ) располагается в юго-западной части Карского моря и также подвержена влиянию теплых вод Баренцева моря, хоть и в гораздо меньшей степени.

На графике представленном на рисунке 18 можно видеть меньшее колебание повторяемости, самая большая разница замечена в марте где за

попынья была раскрыта 84% времени, и в апреле где пынья была раскрыта 75% времени, (еще меньше чем в марте).

Для проверки данных были использованы данные монографии [Карелин, Карклин, 2012]., для того чтобы сравнить повторяемость в тех случаях, которые вызывают больше всего неопределенность. Таким образом был составлен график отображенный на рисунке 18.

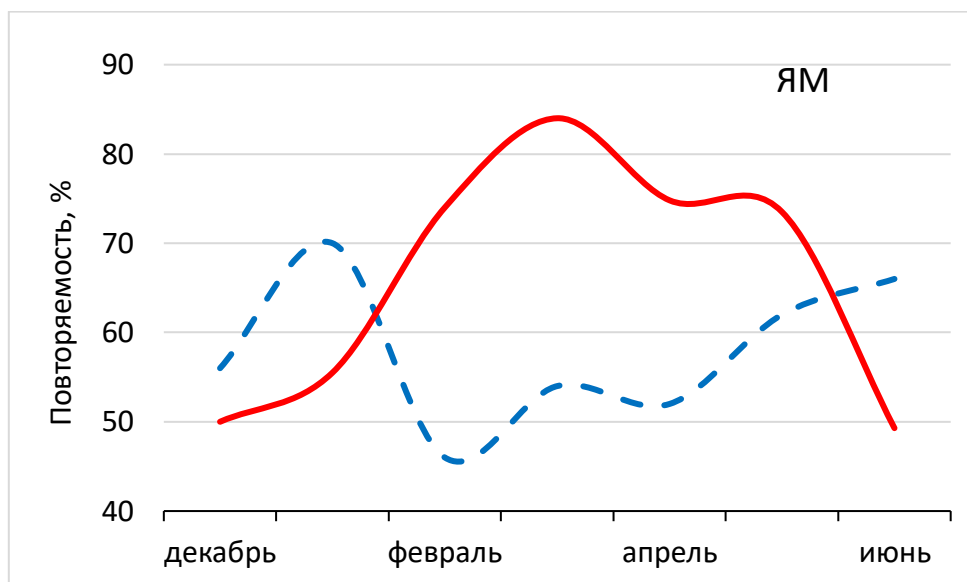


Рисунок 18 – Повторяемость Ямальской пыньи

Красная кривая — средние значения 2000 — 2000 гг.; пунктирная линия — средние значения 1980 — 2000 гг.

Графики данных монографии [Карелин, Карклин, 2012].и современных данных пересекаются феврале и июне, это доказывает то, что на протяжении многолетнего периода с 1980 г. стабильное ледообразование вдоль полуострова Ямал было в пределах нормы, а раннее разрушение не имело место быть.

Как было отмечено выше, участок Обь-Енисейской пыньи является очень сложным для исследования ледовых процессов из-за постоянного поступления распреснения поверхностных вод моря из-за влияния крупных рек. Но в свою очередь данный участок в меньшей степени подвержен

влиянию теплых вод из Баренцева моря, хотя снижение процента повторяемости в июне связано непосредственно с ранним таянием.

Общая повторяемость за период 2000-2022 гг, в целом с началом февраля и по первую декаду июня повторяемость достаточно велика. В марте полынья имеет раскрытое состояние 100% времени. Со второй декады июня график стремительно опускается до самой минимальной вероятности, это связано с невозможностью измерений полыньей в этот отрезок времени.

Так же, как и в случае с ЯМ был составлен график повторяемости совмещённый с данными за 1980- 2000 гг. рисунок 19.

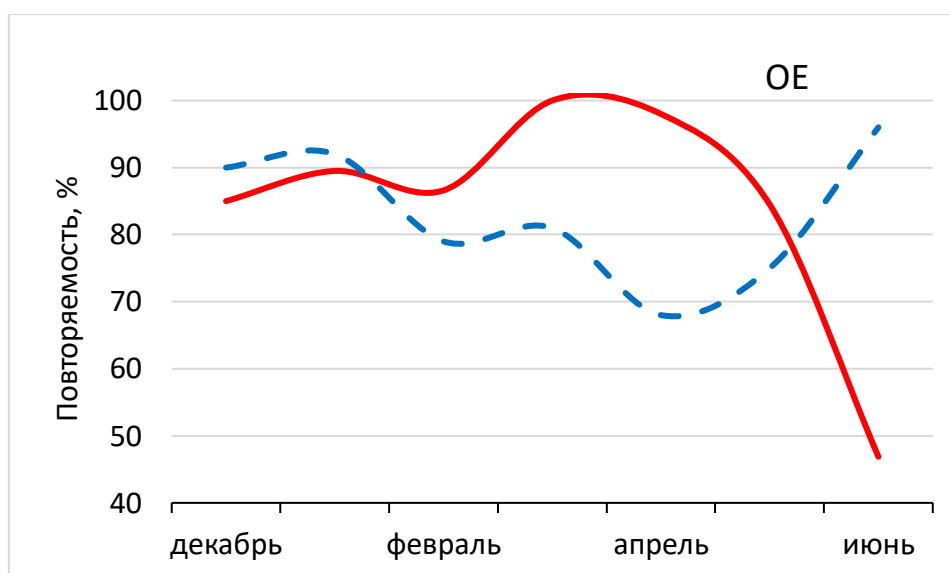


Рисунок 19 – Повторяемость Обь-Енисейской полыньи

Красная кривая — средние значения 2000 — 2022гг.; пунктирная линия — средние значения 1980 — 2000 гг.

Здесь, как и в случае с ЯМ наблюдается сильное уменьшение (вплоть до 0%) в мае-июне за 2000-2022 гг., а за данные 1980-2000 гг. полынья имеет раскрыты характер и продолжает свое существование.

Для точного определения повторяемости раскрытия полыньей в Карском море самой подходящей для исследования является Центральная Карская полынья (ЦК). Она является наиболее стабильной, и меньше всех

подвержена влиянию теплой воды из Баренцева моря, но из-за влияния течений все еще зависит от пресных вод как Обь-Енисейская полынья. Рассматривая ЦК можно с большей уверенностью и наиболее корректно проанализировать полученные данные.

В целом наблюдая изменчивость ЦК можно с точностью сказать, что на протяжении всего года она присутствует в 90-100 % случаев. Исключением является лишь конец мая и июнь, так как уже начинается разрушение припая и дрейфующих льдов. В некоторые годы, а именно с 2000 г. по 2008 г. ЦК присутствует в раскрытом состоянии на фоне стабильного припая даже до второй декады июня, далее с 2010-2020 гг. постепенно повторяемость отдалается к второй декаде мая, так как значительная разрушаемость льда прогрессирует в этот период.

ЗСЗ полынья, представленная также на рисунке 18 зачастую превышает по повторяемости даже ЦК и ОЕ в мае и июне, что связано с ее северным расположением по отношению к другим. А с января по апрель остается по своим значениям ниже ЦК и ОЕ, в целом повторяемость ЗСЗ не превышает 75% за целый год.

В целом ЗСЗ по повторяемости не сильно уступает другим стационарным полыньям, даже не смотря на то что она располагается севернее всех других полыней и в большей степени открыта водам Северного Ледовитого океана.

Характер повторяемости полыней достаточно сильно изменился за последние 20 лет, об этом говорят, как данные за 2000-2022 гг., так и многолетние данные монографии за 1980-2000гг [Карелин, Карклин, 2012]. В значительной мере можно наблюдать увеличилась повторяемость Ямальской полыньи с февраля по май, а также Западной Североземельской с декабря по май, и Центральной Карской за тот же период. Стоит отметить изменчивость повторяемости таких полыней как Северная Новоземельская, Южная Новоземельская, Амдерминская и Ямальская, здесь в силу климатических

особенностей и влияния периода потепления, наблюдалась и наблюдается сейчас стабильное изменение ледовитости Карского моря, его юго-западной и, если касаться припайной зоны и северо-восточной частей. Обращаясь к ледовым прогнозам ААНИИ представляемым каждый год в рамках ежегодного отчета в отделе ледового режима и прогнозом, можно сказать, что в связи с климатическими изменениями в Арктике количество льда в целом не изменилось, но изменился его возрастной состав.

Увеличение количества молодых льдов конечно существенно влияет на судоходство по СПМ, что является несравненным плюсом. Но в то же время эти нарушения и изменения ледяного покрова вызывают ряд сложностей в изучении уже известных физических явлений, таких как образование и динамика полыней. Это может приводить к тому, что некоторые исследования за прошедшие годы могут стать не актуальными в современном климатическом периоде и требуют новой интерпретации и новых методов исследования.

3.3 Изменение площади припая

Рассматривая изменчивость полыней стоит обратить внимание и на такой важный элемент ледового ландшафта как припай. Образование заприпайных полыней невозможно без установившегося и стабильного припайного льда, причем стоит обратить внимание на его режимные особенности, такие как даты становления и разрушения [Карклин, Юлин, 2017].

Для подтверждения приведенных выше данных которые указывают на изменение общего ледового баланса были составлены графики изменения площади припайного льда в Карском море за такой же период с 2000-2020 гг. как и в случае с полыньями.

Для наглядности были построены графики по площади припая за 2000-2020 гг. представленные на рисунке 20-21.

При построении учитывались гидрологические особенности каждой из частей моря, так Карское море было разделено на две части которые существенно отличаются друг от друга по своим режимным особенностям, а именно на юго-западную (более теплую, и более подверженную влиянию теплых вод из близлежащего моря) и северо-восточную (отмечено наименьшее влияние залива теплых вод из Баренцева моря). На графиках отмечены среднемесячные показатели площади припая, измеренные в геоинформационной системе ArcGIS, а также линии тренда по всем месяцам.

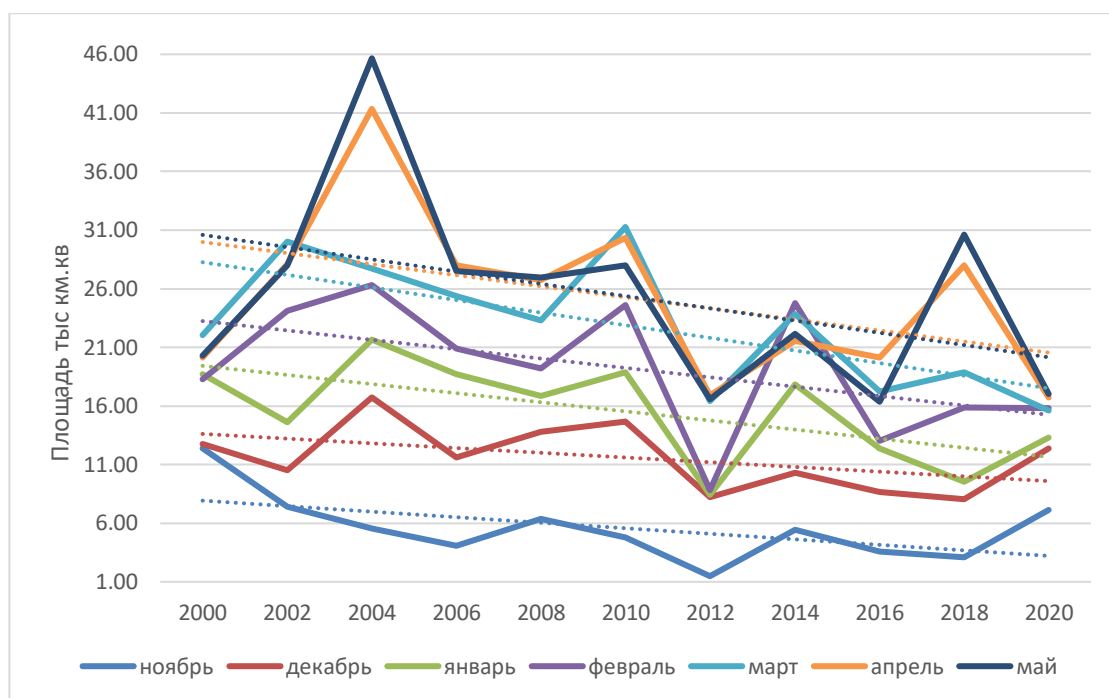


Рисунок 20 — Площадь припая юго-западной части Карского моря в тыс.км² за 2000-2020 гг.

Здесь, на рисунке 20 можно очевидно уменьшение площади припайного льда практически во все месяцы. Линии тренда с ноября по май (месяцы начала стабильного роста припайного льда) начиная с 2000 года дают возможность оценить снижение площади, а также частое нарушение целостности припая. Разрушение припая из года в год особенно в 2012 г. вообще не свойственно для неподвижного материкового льда, в 2012 году во все месяцы наблюдается уменьшение площади.

Уменьшение площадей материкового льда может быть охарактеризовано недостаточным фоном отрицательных температур воздуха, и изменение температуры морской воды в связи с прогревом воды весной и осенью на фоне раннего оттаивания весной и позднего замерзания юго-западной части моря осенью. Это подтверждает полученные данные по полыньям, расположенным в юго-западной части, которые показали изменение в сторону увеличения площади и продолжительности периода раскрытия зимой.

Как упоминалось в пункте 3.2 о повторяемости полыньей, юго-западная часть акватории сильно подвержена влиянию теплых вод Баренцева моря [Карклин, Юлин, 2017], которые попадают через пролив Карские ворота, что сказывается на датах становления припая и его росте с начала сезона ледообразования.

Далее для большего охвата территории был проанализирован архив данных по площади припая в север-восточной части моря. Для наглядности был составлен график представленный на рисунке 21.

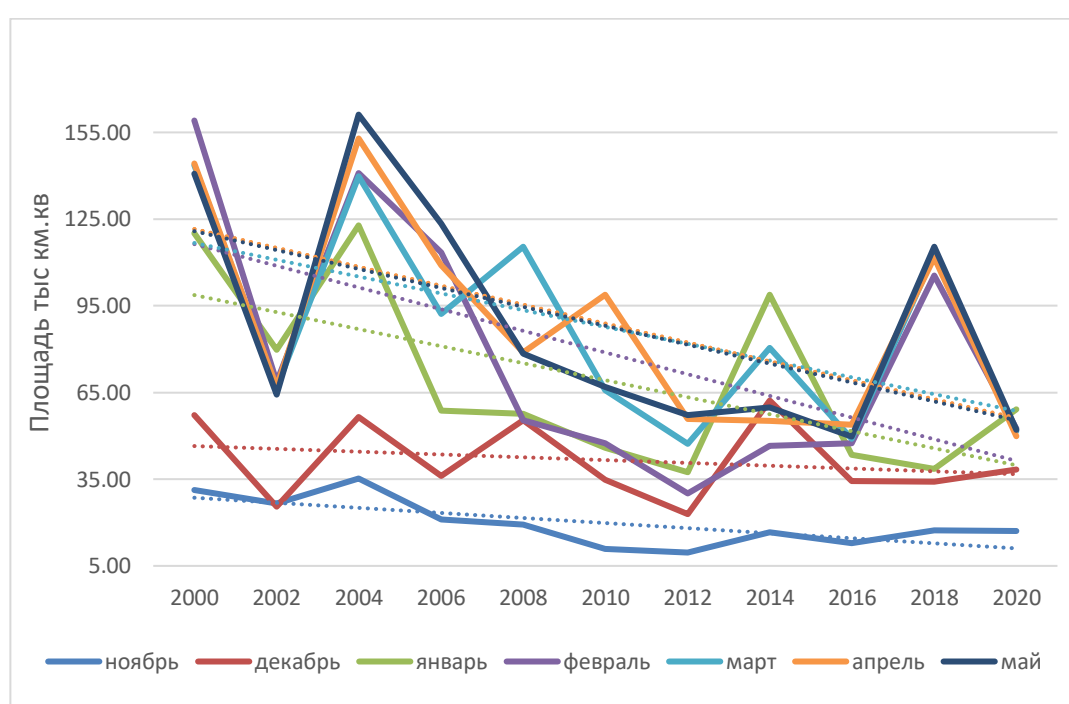


Рисунок 21 — Площадь припая северо-восточной части Карского моря в тыс. км² 2000-2020 гг.

Беря во внимание то что северо-восточная часть акватории в меньшей мере подвержена влиянию теплых вод, приносимых местными течениями, были получены следующие данные. Как показано на рисунке 21, в ноябре и декабре (в начале сезона ледообразования) не прослеживается сильное уменьшение площадей практически за весь период 2000-2020 гг., линия тренда практически прямая особенно в декабре, но начиная с января идет резкое уменьшение. Начиная с 2000 года, особенно с января по март идет

сильное уменьшение количества припайного льда. Если в юго-западной части моря изменение за все месяцы идет одновременно и синхронно, без изменений от месяца к месяцу, что может быть связано с интенсивным перемешиванием более теплых вод Баренцева моря, и как следствие увеличение фоновых температур воды. То в северо-западной части, где влияние минимально или отсутствует, происходит скачкообразное изменение от месяца к месяцу. Несмотря на то, что к середине зимнего сезона, а именно с января по апрель, количество припайного льда должно становиться больше, мы можем наблюдать обратное явление что дает возможность судить о глобальных изменениях климата над Российской Арктикой.

Во время работы с ледовыми картами ААНИИ, на протяжении нескольких лет была выявлена аномалия, связанная с разрешением припая, и сильное смещение его границ к материку. Это наблюдалось в период с 2012-2014 гг. когда в начале января припай занимал большую часть север-восточной части моря, а потом на протяжении января и начале февраля происходило его разрушение. Эту аномалию можно наблюдать на региональных картах ААНИИ представленных в приложении 7-8.

Глава 4 Зависимость режима заприпайных полыней Карского моря от метеорологических показателей.

4.1 Сбор метеорологических данных

В работе используются архивы метеорологических показателей структурированные и составленные на основе базы данных ВНИИГМИ-МЦД.

Для каждой из семи полыней был выбран участок исходя ее условных границ в Карском море, на крайних точках выделенного участка располагается метеорологическая станция.

- Амдерма,
- о. Белый,
- Стерлегова,
- м. Челюскин,
- о. Голомянный,
- о. Визе
- Усть-Кара
- о. Хейса
- о. Диксон
- Марресале

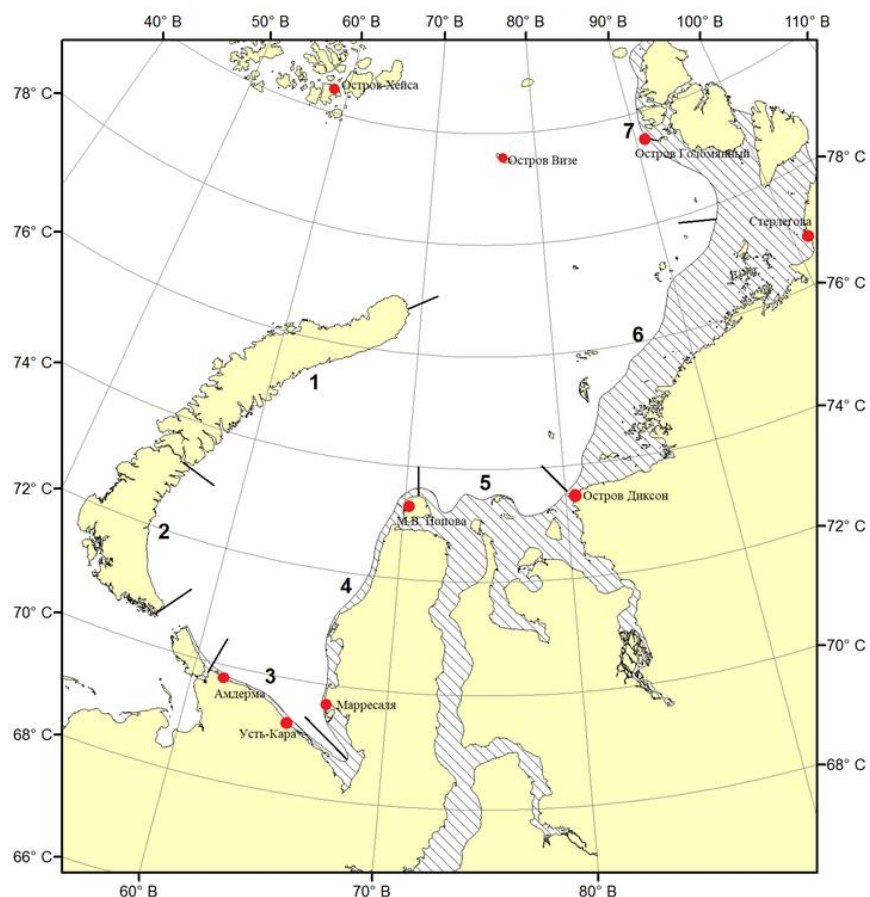


Рисунок 22 — Расположение метеостанций в Карском море: Поленыи:
 1- Северная Новоземельская; 2- Южная Новоземельская;
 3-Амдерминская; 4- Ямальская; 5- Обь-Енисейская;
 6- Центральная Карская; 7- Западная Североземельская

Каждый метео-архив включает в себя срочные данные за период с 1998 – 2022 гг. срочные данные осредняются до среднесуточных по всем стандартным наблюдениям, приводящимся на метеостанциях.

Дополнительно подготавливаются данные по среднемесячному и среднегодовому направлению ветра на каждой станции, суммы градусо-дней, средне месячные и среднедекадные суммы осадков, разница давления на разных станциях которые расположены на границах каждой поленыи.

4.2 Корреляционные связи площадей полыней с метеорологическими показателями

Для расчета корреляционных связей за основу брались исследования, представленные в монографии «Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века» [Карелин, Карклин 2012], одной из основных причин раскрытия полыней является скорость и направление ветра отжимного характера по отношению к каждой отдельно взятой полынье. Для осуществления поиска зависимостей площади от направления ветра были рассчитаны вероятности для каждой полыньи с ветрами отжимного характера. Также для корректного проведения анализа было принято решение сопоставить данные в более крупном масштабе, а именно показатели давления и разницы давления между двумя точками и площадью полыней.

Для каждой из семи полыней был выбран участок исходя ее условных границ в Карском море, на крайних точках выделенного участка располагается метеорологическая станция.

Выбранные участки:

- Северная Новоземельская (СНЗ) — о. Визе – Амдерма
- Южная Новоземельская (ЮНЗ) — о. Визе – Амдерма
- Амдерминская (АМ) — Амдерма — Марресала
- Ямальская (ЯМ) — Марресала – ст. им Попова (о. Белый)
- Обь-Енисейская (ОЕ) — ст. им Попова (о. Белый) – о. Диксон
- Центральная Карская (ЦК) — о. Диксон – м. Стерлегова
- Западная Североземельская (ЗСЗ) — м. Стерлегова – о. Голомянный

После того как были произведены расчеты и получены данные были составлены графики и таблицы для наглядного представления сложившихся корреляционных связей. Расчеты производились для все полыней Карского моря, здесь на рисунке 22 представлены графики по ОЕ полынье, для примера был взят 2020 г.

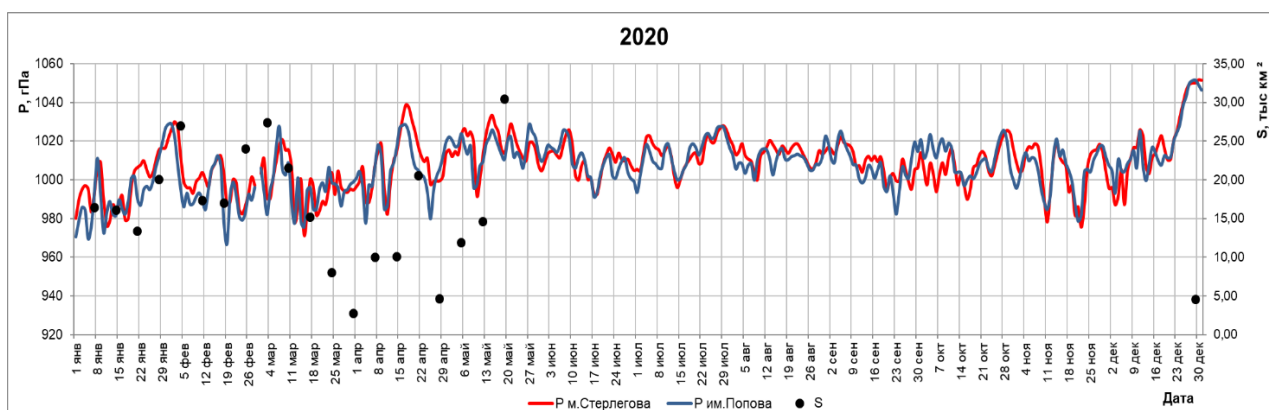
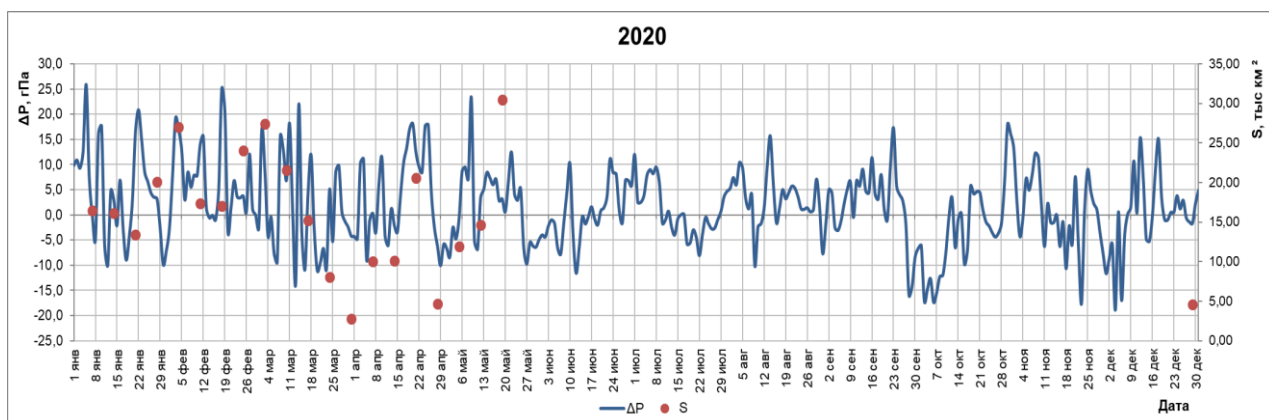


Рисунок 23 — Пример сопоставления данных атмосферного давления (разницы атмосферного давления) и изменения площади полыней

Здесь в случае роста атмосферного давление происходит пересечение с показателями площади что можно наблюдать с февраля по март. В случае со снижением давления в апреле можно заметить и снижение площади полыньи, таким образом на первый взгляд в течение 1 года (2020г.) можно наблюдать зависимость ходи атмосферного давления с площадными показателями. На графике присутствуют значения площадей только за зимний период, а именно

за период с января по июни и декабрь, так как с декабря акватория моря в большинстве случаев уже покрыта однолетними льдами, а припай уже считается установившимся.

Для более точной интерпретации графиков, представленных на рисунке 22, данные были сведены в один общий вид и была рассчитана линейная корреляция, которая представлена в таблице 2.

Таблица 2 — Связь увеличения площади полыней и разницы атмосферного давления на метеорологических станциях за период с 2000-2020

Название полыньи	Станции	Коэффициент корреляции
Северная Новоземельская (СНЗ)	о. Визе – Амдерма	0,5
Южная Новоземельская (ЮНЗ)	о. Визе – Амдерма	0,4
Амдерминская (АМ)	Амдерма — Марресалея	0,2
Ямальская (ЯМ)	Марресале – с. Им М.В. Попова (о. Белый)	0,4
Обь-Енисейская (ОЕ)	ст. им Попова(о. Белый) – м. Стерлегова	0,4
Центральная Карская (ЦК)	о. Диксон- м. Стерлегова	0,4
Западная Североземельская (ЗСЗ)	м. Стерлегова- о. Голомянный	0,4

Таким образом в таблице 2 представлены показатели корреляции за весь период с 2000-2021 гг. Обращаясь к таблице 2 можно увидеть показатели линейной корреляции между ходом разницы атмосферного давления и изменениями площади. Начиная с СНЗ можно наблюдать самый высокий показатель корреляции, он принимает значение 0,5. Во многом это зависит от режимных особенностей СНЗ описанных в подглаве 3.1, а также на то что изменчивость давления связана как с климатическими, так и с географическими особенностями местности.

АМ полынья показала самый минимальный показатель, он составил 0,2. Так как юго-западная часть моря, а именно близость к проливу Карские ворота вносит свои изменения в развитие или закрытие полыньи. Здесь сложно

сделать однозначный вывод так как еще на этапе обработки в ГИС АМ показывает свою зависимость от затоков теплой воды с Баренцева.

В остальных случаях показатели корреляции равны 0,4. ЯМ и ОЕ полыньи за весь период показали свою зависимость не только от показателей давления, но и от показателя уровня моря, который в общем балансе тоже оказывает свое влияние на взлом молодых льдов.

ЦК как самая крупная и протяжная полынья имеет показатель 0,4 как на станции о. Диксон, так и на м. Стерлегова. Большое расстояние, тем не менее, все равно позволило определить разницу в давлении между двумя точками и сопоставить с изменчивостью размеров ЦК. Здесь также присутствует зависимость от уровня моря, хотя и в меньшей степени.

ЗСЗ как самая труднодоступная и сложная и изучении полынья, также показала значение 0,4. Касаемо метеорологических данных здесь не удалось охватить весь масштаб и протяженность ЗСЗ, так как м. Стерлегова и о. Голомянный не покрывают всего расстояния где расположена полынья. Но даже в этом случае при охвате только части территории удалось сопоставить данные.

Одним из основных факторов влияющих на изменчивость площадей является ветер отжимного характера. В связи с этим была рассчитана вероятность влияния ветров определенных румбов на изменение площади каждой отдельно взятой полыньи за период с 2010-2020 гг.

Таблица 3 — Вероятность изменения площади полыней при отжимных ветра с 2000-2020 гг.

	Полынья						
	СНЗ	ЮНЗ	АМ	ЯМ	ОЕ	ЦК	ЗСЗ
Отжимное направление ветра	С, З, СЗ	Ю, ЮЗ, З, СЗ	Ю, ЮЗ, З	СВ, В, ЮВ, Ю	В, ЮВ, Ю, ЮЗ	В, ЮВ, Ю,	СВ, В, ЮВ
Вероятность	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5

Здесь уже представлены более высокие показатели, а именно 0,5 для СНЗ, ЯМ, ЦК, ЗСЗ и ОЕ. Был взят период в 10 лет, за 2000-2020 гг. можно было более точно установить зависимости, ведь в этот период заметно выше изменчивость самих размеров полыней и их общей площади. АМ и ЮНЗ полыньи показала значение 0,4, это немного превышает значение между площадями и изменением атмосферного давления

Но как показывает практика, отжимной характер ветров влияет не столько на саму полынью, а сколько на дрейфующий лед на границе между полыней и дрейфующими ледяными полями [Гудкович 1979]. Так как вне зависимости от сплоченности и размера ледяных полей, перемещение всего льда в целом происходит постоянно даже в зимний период. Само влияние отжимного характера ветра (даже не продолжительное время) влияет непосредственно на лед у кромки припая или у границ полыньи.

При раздробленности льда на границе полыньи ветра отжимного характера способны приводить дрейфующий лед в движение образуя участки полыньи с четкими границами. При обнажении чистой воды происходит постепенное образование молодых льдов в зоне полыньи, которые со временем разрушаются и при господствующем отжимном характере ветра процесс может повторяться до тех пор, пока ветер не сменит свое направление.

4.3 Множественный коэффициент корреляции между комплексом метеорологических показателей и изменчивостью площади полыней

Для определения корреляционных связей между площадью полыни и несколькими метеорологическими параметрами применялся метод множественной корреляции.

Используемые показатели:

- Площадь полыни
 1. Обь-Енисейская(ОЕ)
 2. Центральная Карская(ЦК)
- Атмосферное давление в районе исследования
- Скорость отжимного характера ветра
- Температура воздуха

Расчет проводился с использованием матрицы парных коэффициентов корреляции:

$$R_{yx_1x_2...x_k} = \sqrt{1 - \frac{\Delta r}{\Delta r_{11}}}, \quad (1)$$

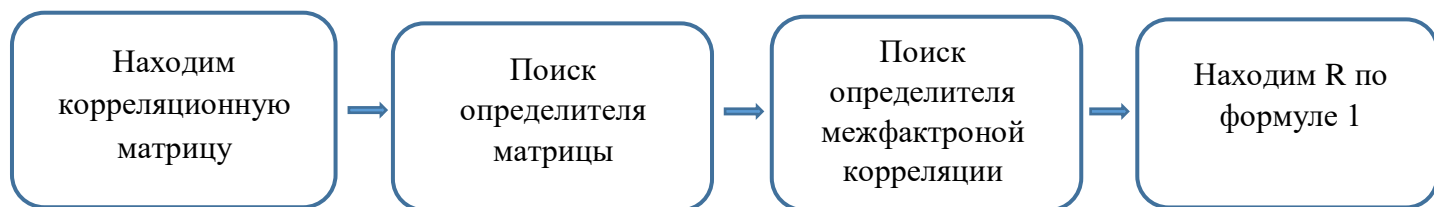
Где

Δr - определитель матрицы парных коэффициентов корреляции $yx_1x_2 \dots x_k$,

Δr_{11} - определитель межфакторной корреляции $x_1x_2 \dots x_k$

Для реализации данного метода использовался язык программирования Python.

Для наглядности была составлена блок-схема последовательности действий при проведении расчетов.



Блок-схема алгоритма расчета множественного коэффициента корреляции

По итогу были получены коэффициенты корреляции по двум полынням Обь-Енисейской и Центральной Карской за 2019-2021 гг. представленные в таблице 4 и 5.

Обь-Енисейская полынья	
год	коэф. коррел.
2019	0,65
2020	0,73
2021	0,70

Таблица 4 — Показатели множественной корреляции для Обь-Енисейской полыньи

Центральная Карская полынья	
год	коэф. коррел.
2019	0,61
2020	0,62
2021	0,72

Таблица 5 — Показатели множественной корреляции для Центральной Карской полыньи

Полученные расчётные коэффициенты корреляции дают возможность судить о том, что существует тесная взаимосвязь между значением общей площади полыньи и выбранными предикторами. Можно наблюдать коэффициент 0,7 в 2021 году как для ОЕ, так и для ЦК полыньи.

Дальнейшее изучение режима заприпайных полыней позволит дополнить регрессионную модель чтобы в последствии определить и другие показатели влияющие на динамику площадей, а также на особенности ледообразования в районе исследования.

Заключение

По итогу проведенной работы, связанной с оценкой режимных особенностей заприпайных полыньей в зимний период можно сделать вывод о том, что заприпайные полыньи, являются крайне изменчивой структурой в ледовом ландшафте, которая способна изменяться за короткий промежуток времени под влиянием различных метеорологических характеристик. В условиях постоянно изменяющихся климатических условий также произошло изменение показателей не только полыней и припая, но и всего ледового баланса.

За весь исследуемый период можно наблюдать тенденцию к увеличению общей площади полыньей, а также учащение их возникновения относительно прошлых лет. Прослеживается тенденция к уменьшению толщин неподвижного материкового льда, о чем свидетельствует уменьшение площади припая в юго-западной и северо-восточной акваториях Карского моря. Увеличение границ стационарных полыньей, высокий процент слияния полыньей, и уменьшение площади припая, могут говорить о серьезных изменениях зимних ледовых условий в Российской Арктике.

Беря во внимание вышеупомянутые изменения, важной частью исследования являлось определение корреляционных связей площади полыней с метеорологическими показателями. Благодаря проведенному расчету множественной корреляции была найдена средняя и высокая зависимость площади полыней с выбранными предикторами. Она составила 0,6 и 0,7 что свидетельствует о тесной зависимости.

По ходу проведения работы, а также обзора литературы было принято во внимание влияние теплового баланса и дрейфа льда которые при дальнейшем исследовании могут дополнить регрессионную модель и привести к высоким показателями корреляционной связи.

Список используемой литературы

1. Абрамов, А. В. Организация ледокольной проводки транспортных судов / А. В. Абрамов, М. А. Загородников // Управленческое консультирование. - 2017. - №10.
2. Алексеев Г.В., Александров Е.И., Глок Н.И. [и др.] Эволюция площади морского ледяного покрова Арктики в условиях современных изменений климата // Исследование Земли из космоса. 2015а. № 2.
3. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И. и др. Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015б. № 1 (103).
4. Антонова, О.Д. Арктический шельф - область геополитических и экономических интересов России / О.Д. Антонова, Г.В. Лебедев, Г.Е. Румянцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2014. - №4.
5. Атлас "Природные условия в Баренцевом и Карском морях" (под ред. Е.У. Миронова). - СПб, ААНИИ, CD-R, 2008.
6. Афанасьева Е.В., Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Демчев Д.М., Чуфарова М.С., Быченков Ю.Д., Девятаев О.С. Методика составления ледовых карт / ААНИИ // Российская Арктика №7-2019 — 2019, С. 5 –20
7. Бадю Ю.Б., Иванина Д.Ю. Развитие криолитогенеза в районах побережья западного сектора Арктики // Криосфера земли, 2004, т.8, №2.
8. Библиографический указатель литературы по морским льдам (1995-2000 гг.). - Под ред. Ю.А. Горбунова. - Гидрометеиздат, Спб, 2003. – С 168.
9. Богородский П.В., Макштас А.П., Пнюшков А.В. Моделирование нарастания льда в заприпайной полынье // Проблемы Арктики и Антарктики №2(92) – 2012, С. 85–94
10. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР // МГУ, 1982 г. – С 102-110

11. Бородачев В.Е., Бородачев И.В. Ледовитость Карского моря в вариациях климата Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 2 (104).
12. Ботнарюк, М. В. Анализ состояния и перспективы развития Северного морского пути / М.В. Ботнарюк // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2013. - №4.
13. Бушуев А.В. Сбор, обработка и анализ данных по льду/ А.В. Бушуев. - В кн.: Морской лед. Справочное пособие. –СПб, 1997
14. Бухарицин П.И. Особенности ледового режима и методы прогноза ледовых условий северной части Каспийского моря: Дис. на соискание уч. степ. канд. геогр. наук. - ААНИИ, Ленинград, 1987.
15. Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Черкашев Г.А., Ванштейн Б.Г. Динамика берегов Карского моря // Криосфера Земли, 2006, т. X, №2.
16. Войнов Г.Н. О новой интерпретации сезонной изменчивости приливов арктических морей России // Метеорология и гидрология. 2003. № 9. С. 59–70.
17. Войнов Г.Н. Способ приведения ежечасных наблюдений за уровнем моря к однородным рядам с помощью калибровки приливов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 2 (104).
18. Горбунов Ю.А., Карелин И.Д., Кузнецов И.М., Лосев С.М., Соколов А.Л. Основы физикостатистических методов ледовых прогнозов и расчетов для арктических морей заблаговременностью до 30 суток. – Л.: Гидрометеиздат, 1983.
19. Гудкович З.М. Изменение сплоченности ледяного покрова под влиянием динамических процессов. – Л.: Гидрометеиздат, 1979, ч. 2, с. 73-80.
20. Гордиенко П.А. Припайные льды арктических морей/ П.А. Гордиенко// Проблемы Арктики и Антарктики. 1971
21. Н.Н. Зубов Океанологические таблицы- Л.: Гидрометеиздат, 1957. - 50 с. 171с. 405 с.

22. Гудкович З.М., Доронин Ю.П. Дрейф морских льдов. - СПб, Гидрометеиздат, 2001.
23. Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. Климатические изменения ледяного покрова морей евразийского шельфа - СПб.: "Наука", 2007, 136 с.
24. Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. О характере и причинах изменений климата Земли // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 15–23.
25. Сорохтин О.Г. Парниковый эффект: миф и реальность // Вестник РАЕН. 2002. Т. 1. № 1.
25. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014.
26. Загородников, М. А. Ледокольное обеспечение круглогодичного регулярного судоходства по трассам Северного морского пути / М.А. Загородников // Управленческое консультирование. - 2017. - №9.
27. Йоханнесен Д.М., Александров В.Ю., Фролов И.Е, Сандвен С. и др. Научные исследования в Арктике. Т. 3. –СПб: Наука, 2007.
28. Карклин В.П., Юлин А.В., Карелин И.Д., Иванов В.В. Климатические колебания ледовитости арктических морей сибирского шельфа // Тр. ААНИИ. 2001. Т. 443.
29. Карклин В.П., Юлин А.В., Шаратунова М.В., Мочнова Л.П. Климатическая изменчивость ледяных массивов Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4 (114).
30. Карклин В.П., Ковалев Е.Г. Влияние солнечной активности на формирование крупных аномалий ледовитости арктических морей // Тр. ААНИИ. 1994.
31. Карелин И.Д., Карклин В.П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века // Спб. – ААН И. – 2012

32. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2 (6).
33. Ковалев Е.Г., Юлин А.В. Автоматизированная прогностическая система для целей научнооперативного обеспечения навигации в Арктике // Труды ААНИИ. – 1998. – Т. 438. – С. 73–82.
34. Ковалевский Д.В., Алексеев Г.В., Бобылев Л.П., Данилов А.И. Последствия изменений климата для некоторых видов хозяйственной деятельности в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 4 (94).
35. Лебедев Г.А., Сухоруков К.К., Ковалев С.М. Термическое разрушение морского льда. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 184 с.
36. Магрицкий Д.В. Тепловой сток рек в моря российской Арктики и его изменения // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2009. № 5.
37. Морской энциклопедический справочник/ Т 1/ Исанин Н.Н., 1987
38. Международный проект, выполненный ГНЦ РФ ААНИИ и Международным Арктическим научно - исследовательским Центром при Университете штата Аляска, "Гидрохимический Атлас Северного Ледовитого океана", 2001 г.
39. Немировская И.А., Кравчишина М.Д., Реджепова З.Ю. Органические соединения и взвесь в снежно-ледяном покрове и почвах в районах антарктических станций России // Лед и снег. 2015. Т. 55. № 4.
40. Попов А.В. Роль заприпайных полыней в Арктической климатической системе. // Раздел в отчёте по НТП-1 ААНИИ за 1999.
41. Проблемы Северного морского пути // Центр, науч.- исслед. и проектно-конструкт. ин-т. мор. флота (ЦНИИМФ). - М.: Наука, 2006.
42. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века / И.Д.Карелин, В.П.Карклин // Спб. – ААНИИ. – 2012

43. Тепловой баланс арктических льдов в зимний период /Макштас А.П. //Л.– Гидрометеоздат. – 1984, 66 с.
44. Шалина Е.В., Бобылев Л.П. Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6.
45. Шерстюков Б.Г., Салугашвили Р.С. Новые тенденции в изменении климата Северного полушария Земли в последнее десятилетие // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2010. Вып. 175.
46. Barber D.G., Massom R.A. /The role of sea ice in Arctic and Antarctic Polynyas //Polynyas: Windows To the World / Eds. W.O. Smith, Jr. Barber D.G. New York: Elsevier, 2007. Ser.47. p. 1–43.
47. Dmitrenko I., Tyshko N., Kirillov S., Holemman J., Eicken H, Kassen H. Impact of flaw polynyas on the hydrography of the Laptev Sea // Global and Planetary Change 48 (2005) 9 -27,2005.
48. Gould M., Jeffries M. Temperature variations in lake ice in central Alaska, USA // Annals of Glaciology. 2005. Vol. 40. P. 1–6.
49. Graverson R.G., Mauritsen T., Tjernstrom M., Kallen E., Svensson G. Vertical structure of recent Arctic warming // Nature. 2008. V. 451.
50. Johannessen O., Alexandrov V., Frolov I., Sandven S., Pettersson L., Bobylev L., Kloster K., Smirnov V., Mironov Ye., Babich N. Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route. Studies and Applications. - Springer, Praxis Publishing, UK, 2007.
51. Matishov G.G., Dzhenyuk S.L., Moiseev D.V., Zhichkin A.P. Pronounced anomalies of air, water, ice conditions in the Barents and Kara Seas, and the Sea of Azov // Oceanologia. 2014. V. 56 (3).
52. Perovich D.K., Elder B.C. Temporal evolution of Arctic sea-ice temperature // Annals of Glaciology. 2001. Vol. 33. № 1. P. 207–211.
53. Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kolstrom T. Hale Cyclicity of Polar Activity and its relation to climate variability // Solar Physics. 2004. Vol. 224. P. 455–463.

Приложение 1 — Среднемесячные площади Северной Новоземельской
попыньи за 2000-2022 г.

Северная Новоземельская 2000-2022 год							
год	Площадь тыс. км ²						
мес	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	декабрь
2000					2314	8756	4985
2001					4031		
2002	5157		2374		9808	6367	4725
2003	1042	2607	2325	7253		8993	
2004	3401		2975	4632	3133	4864	
2005	5877		4435	3656	2276	2902	
2006				6917			
2007	6895	4357	7572	8151	4909	3743	
2008				4998	3215		
2009			4550	5478	7065		2950
2010				970	1122		4427
2011	6712	6492					
2012				2943	1411		
2013	2545	9275		7390			
2014	9997	5482	2771	2817			887
2015	2060	3067	5126	1092	856		
2016			7400	5308	4113	838	
2017		1617	8710		671		
2018	3272		6671	1157	7319		
2019		5287	4965	5284	615	8755	
2020	5484	7826		9632	8201		
2021			3118	5763	16129	11585	
2022	6809	16505	4696	4077	6121		
Повторяемость,%	54	45	63	81	81	41	22
мах	9997	16505	8710	9632	16129	11585	4725

Приложение 2 — Среднемесячные площади Южной Новоземельской
попыньи за 2000-2022 г.

Южная Новоземельская 2000-2022 год							
год	Площадь тыс. км ²						
мес	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	декабрь
2000	1609		2766	6616	2781	1173	5818
2001	1179	8941	2268	2350	6727		
2002	1348		2123	5594	7277	4311	6008
2003	8673		6118			8318	
2004	2985		4673	2026		1214	
2005				2548	3972		
2006				1295	4805	7182	6141
2007	6790	3744	7440		6843		
2008				5414	2823		
2009				5118	1397	3925	3355
2010			5399	1095	1175		2146
2011							
2012			8930		3935		
2013	8656	6442		8863			
2014	1073	6286	6755	3464			
2015	4340	3779		5794	4911		
2016			6869	4329	3992	1360	
2017		8902			227		
2018	3238		1246	639	1632	1184	
2019		7186		8192	8068	3114	4586
2020	6983			6828	5086		
2021	9031		5786	9676	2628	9182	
2022	5532	17280	3137	4283	7146		
Повторяемость,%	60	36	60	81	80	45	27
мах	9031	17280	8930	9676	8068	9182	6141

Приложение 3 — Среднемесячные площади Амдерминской полыньи за 2000-2022 г.

Амдерминская 2000-2022 год							
год	Площадь тыс. км ²						
мес	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	декабрь
2000	6323			6184	1793	4534	
2001		8177	6527	3494	3334		
2002	7621	2276	7652	2658	1526	1891	
2003	8499	6281,793	3879	3573	4466	5119	
2004				9717	3188	1838	
2005						8788	
2006				1513	6641		
2007					5892		
2008				7142		1289	
2009		8258	8877	4469		1968	5437
2010			7054	6318	4629	5121	
2011		7549	6940	2286	2616	6187	
2012			7471		8018		
2013	4113	8202	1496	7151			
2014	1389	3908	9316	5234	1629		8709
2015	2685		7735	4210	3310	7918	
2016			9502	2450	3012		
2017		8702		3461	3205	8231	
2018			1953	2276	641	1713	
2019				5592	4905	1595	
2020	16657	14767	12452	9958	12551		
2021	10657	9296	4421	4833	8771	9256	
2022	11045	17157,03	4709	5240	5080		
Повторяемость,%	41	50	68	91	86	64	10
мах	16657	17157	12452	9958	12551	9256	8709

Приложение 4 — Среднемесячные площади Ямальской полыньи за 2000-
2022 г

Ямальская 2000-2022 год							
год	Площадь тыс. км ²						
мес	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	декабрь
2000	3772	5393	7968	1540	4901	12186	9329
2001	5458	3289	8723	5652	5863		
2002			8520	6534	8516		8349
2003		6610	6168		9789	4359	
2004					5126		
2005		3561	5482	6567	2646		
2006					7582	6638	
2007			2796	3155	6289		
2008				791	9226		
2009				2649	2743	5588	
2010							6078
2011	9853	4202	2577				
2012			3779	3291			
2013					4527		
2014	6609	9115	3280	1465	3970		
2015	3817	3303	2021				
2016		7936	4934	3549	4875	3654	
2017	1472	5707					
2018		8343		2815	541	9402	
2019		8216	432	4685			
2020			3873	5641			
2021	11685	8282	4477	4219	4320		
2022	10720,97	17846,88	4001,565	9527,695	188,8874		
Повторяемость,%	36	60	68	69	73	27	14
мах	11685	17847	8723	9528	9789	12186	9329

Приложение 5 — Среднемесячные площади Обь-Енисейской полыньи за
2000-2022 г

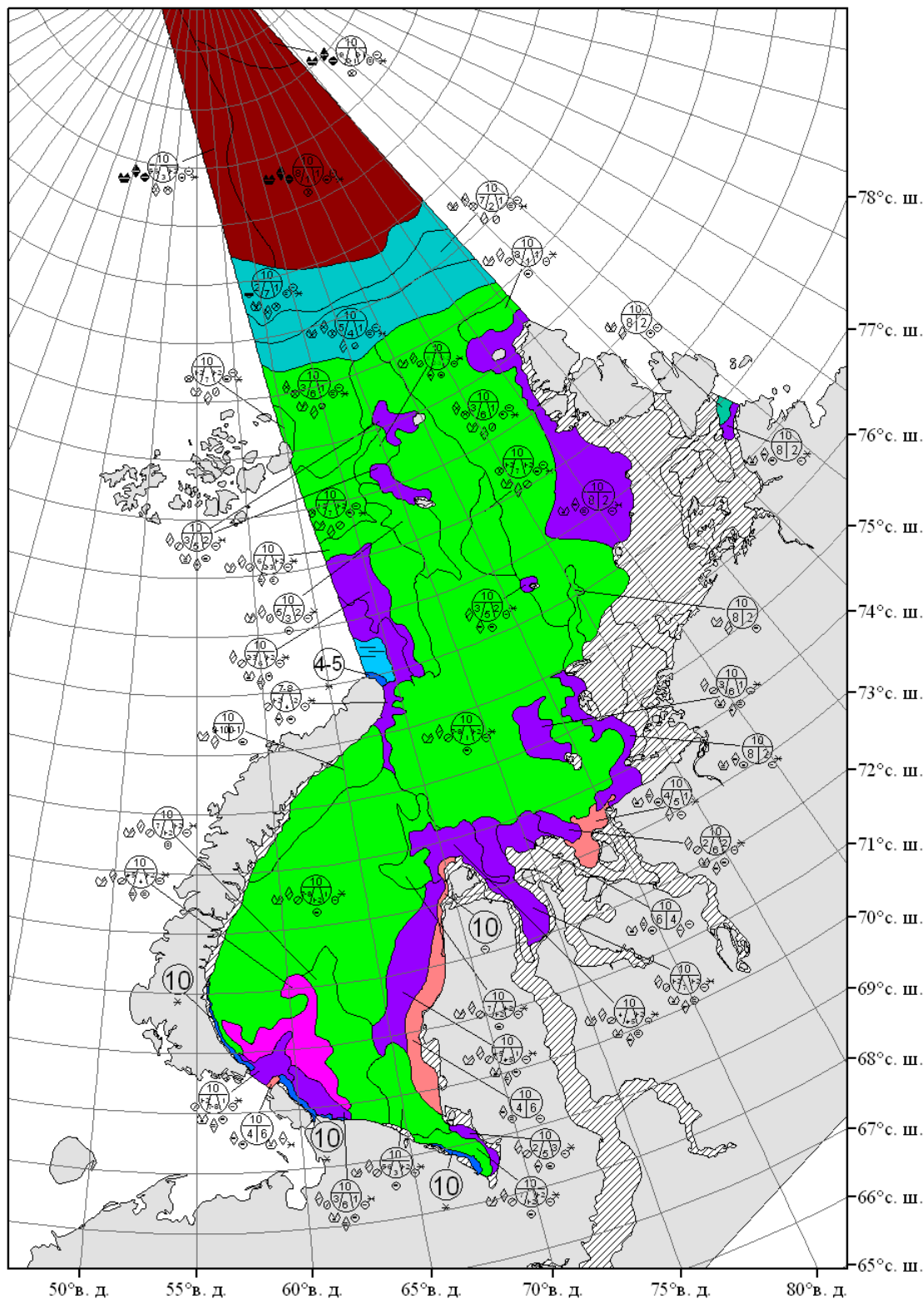
Обь-Енисейская 2000-2022 год							
год	Площадь тыс. км ²						
мес	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	декабрь
2000	8333	4502	9327	3320	9624	12199	21923
2001	16672	8514	13497	4998	10261		10089
2002	28991,04	25502	15605	4331	6707	13419	10007
2003	10492	10981	20718	5615	8016	10493	
2004	38043	36901	34533	26428	8565	5647	
2005	34622	23890	10146	6650	5820	39614	44407
2006	14911	30530,97	26578	15241	3937,003	4085	34371
2007	34487	16923	18239,02	14737	6755	7295	8128
2008	12750	19882		8508	15792	25335	
2009	19047	14131	17407	5975	4623	11999	6766
2010	17770	21419	13545	4617	9550	20440,03	8128
2011	18019	13533	11535	16059	32529,97	37620	1190
2012	8979	8433	8446	4837	3243	17703	7487
2013	14402	2970	2941	11693	7145	2336	12622
2014	9049	6224	14171,05	6726	5498		11468
2015	1885	7531	10327	15899	28674		15571
2016	17959	12237	9669	9340	7881	4680	
2017	18300	13126	14122	11793	10097	18978	11662
2018	11305	6796	4353	2867	1360	15255	
2019	18296	13742	13086	11442	8600	25155	12576
2020	16494	21356	15000	11363	19002		4572
2021	4763	6226	6381	2450	3776	2332	
2022	9543	20064	5020	7627	14428		
Повторяемость,%	100	100	95	100	100	81	73
мах	38043	36901	34533	26428	32530	39614	44407

**Приложение 6 — Среднемесячные площади Западной Североземельской
попыньи за 2000-2022 г**

Западная Североземельская 2000-2022 год							
год	Площадь тыс. км ²						
мес	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	декабрь
2000	4782	3270	2909	6028	11157	2175	3226
2001	3286	4570	18181	2262	11026		11256
2002	10166	30809	14987	12572	7311	11983	5758
2003	6462	8189	4497	7710	4477	10490	
2004	11923	16657	25209	17984	19262	6028	
2005	2375	1239	15771	9041	5812	4742	3703
2006	1928		13549,01	16901	8667		5716
2007	5056	4104	4828	3622	20965	20697	3589
2008	4745	1107	2103	10783,03	12194	6691	
2009	4387	4504	4966	8677	2052	7379	758
2010	1522	12128	14426,01	5468	7533	16019,03	7009
2011	5784	2099	3929	1400	3868	913	1429
2012	6150	1893	2300	3254,998	8502	9981	22058
2013	18056	3334	17259	13435	16835	2795	4728
2014	21389	10788	1424	1752	6185	8452	3338
2015	6703	1647	1986	2071	1656	806	6756
2016	1716	3565	4887	1564	4196	4463	
2017		1036	2947	3954	2994		5796
2018	1729	1510	5698	4152	2848	3120	3053
2019	8581	853	4373	4083	9240	12399	2227
2020	7387	2422	1919	6614	7225		6758
2021	12279	6620	3966		3682	3256	
2022	8466	937	4925	5218	7532		
Повторяемость,%	95	95	100	95	100	81	77
мах	21389	30809	25209	17984	20965	20697	22058

Приложение 7 — Региональная ледовая карта Карского моря за 07.01.2014 г.

по сплоченности		по возрасту				
чисто	7-8	нач. виды	серо-белый.	толстый.	пак.	
<1	9-10	нилас.	однолетний.	старый.	припай	
1-3	10	молодой.	тонкий.	остаточный.	отдельное поле	
4-6		серый.	средний.	двухлетний.	айсберг	



Приложение 8 — Региональная ледовая карта Карского моря за 02.02.2014 г.

по сплоченности		по возрасту					
чисто	7-8	нач. виды	серо-белый.	толстый.	пак.		
<1	9-10	нилас.	однолетний.	старый.	припай		
1-3	10	молодой.	тонкий.	остаточный.	отдельное поле		
4-6		серый.	средний.	двухлетний.	айсберг		

