

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Информационные технологии и системы  
безопасности

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

(магистр)

На тему Исследование сезонной и межгодовой изменчивости площади припая в  
Восточно-Сибирском море

Исполнитель Трофимов Владимир Денисович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Шевчук Олег Игоревич

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор технических наук

(ученая степень, ученое звание)

Бурлов Вячеслав Георгиевич

(фамилия, имя, отчество)

«  »    20   г.

Санкт–Петербург

2023

## Оглавление

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 3  |
| 1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА.....   | 5  |
| 1.1 КЛИМАТ.....  | 7  |
| 1.2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА МОРЯ В ПЕРИОД<br>НАРАСТАНИЯ.....   | 10 |
| 1.3 ПРИПАЙ.....  | 14 |
| 1.4 ПОЛЫНЬИ.....   | 20 |
| 1.5 ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА МОРЯ В ПЕРИОД ЕГО<br>РАЗРУШЕНИЯ.....   | 23 |
| 1.6 ПЛОЩАДЬ АКВАТОРИИ В РАЙОНАХ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО<br>МОРЯ, ОСВОБОЖДАЮЩИЕСЯ ОТО ЛЬДА В ПЕРИОД ТАЯНИЯ<br>ЛЕДОВОГО ПОКРОВА..... | 27 |
| 2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....   | 31 |
| 2.1 СЕТЬ ПОЛЯРНЫХ СТАНЦИЙ В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ  | 31 |
| 2.2 ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ.....  | 37 |
| 3 МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТОЛЩИНЫ ПРИПАЯ В МОРЯХ<br>ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ ПО ДАННЫМ ПОЛЯРНЫХ СТАНЦИЙ.....                         | 41 |
| 3.1 МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА В МОРЕ<br>ЛАПТЕВЫХ.....   | 43 |
| 3.2 МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА В ВОСТОЧНО-<br>СИБИРСКОМ МОРЕ.....  | 49 |
| 3.3 МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА В ЧУКОТСКОМ<br>МОРЕ.....  | 60 |
| 3.4 СУММА ГРАДУСО-ДНЕЙ МОРОЗА.....   | 63 |
| 3.5 ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В ВОСТОЧНО-<br>СИБИРСКОМ МОРЕ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД.....                                   | 66 |
| 3.6 МЕЖГОДОВАЯ И СЕЗОННАЯ ЦИКЛИЧНОСТЬ ПЛОЩАДИ ПРИПАЯ<br>ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ.....  | 74 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....  | 81 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....  | 83 |

## ВВЕДЕНИЕ

В Арктике продолжается процесс глобального потепления, который приводит к быстрому сокращению площади арктического морского льда во все времена года. Наиболее сильное уменьшение льда происходит в сентябре, к концу сезона таяния. Потепление существенно влияет на весь процесс образования и таяния льда, изменяя начало сроков ледообразования, таяние и другие режимные характеристики в российских арктических морях, которые характеризуются "относительным похолоданием и потеплением". Некоторые авторы отмечают значительное увеличение процессов потепления и сокращения льда с 2005 года и связывают это с изменениями в атмосферных процессах, а также с новыми фазами климатических изменений в термохалинной структуре вод и циркуляции Северного Ледовитого океана (СЛО).[1]

Актуальность темы исследования. Согласно данным НАСА, за последние 30 лет площадь льда уменьшилась на 13,1 процента. Этот процесс не только влияет на животный мир Арктики, но и может привести к более серьезным последствиям для всей планеты, таким как увеличение уровня мирового океана и ухудшение климата во всем мире. Изменения климата приводят к тому, что начало и конец сроков ледообразования и таяния льда в российских арктических морях сдвигаются. Вот некоторые из эффектов, которые может вызвать изменение режимных характеристик в арктических морях:

- Изменение температуры воды и воздуха в регионе
- Изменение плотности воды и циркуляции водных масс
- Изменение водных и ледовых ресурсов в регионе
- Изменение арктической экосистемы

В связи с этим необходимо проводить более глубокие исследования причин и последствий изменения климата в Арктике, а также принимать меры для защиты экосистемы региона.

Объект исследования: характеристики ледяного покрова Восточно-Сибирского моря

Предмет исследования: межгодовая и сезонная изменчивость площади припая

Цель исследования: описание основных закономерностей в формировании режимных характеристик припая в Восточно-Сибирском море и выявление причин межгодовых и многолетних изменений статистических характеристик и показателей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка базы данных по площади припая для западной и восточной частей Восточно-Сибирского моря на основе натуральных наблюдений ААНИИ
2. Получение данных по ширине припая при помощи пакета обработки геопространственных данных Esri ArcGIS
3. Получение основных статистических характеристик по площади и ширине припая.
4. Определение гармоник во временных рядах ширины припая и температуры воздуха.

Апробация работы. Основные положения данной ВКР докладывались на:

"ARCTIC DAYS IN ST. PETERSBURG – 2021: INTERNATIONAL SCIENTIFIC COOPERATION IN THE ARCTIC IN THE ERA OF CLIMATE CHANGE" November 25 - 26, 2021 St. Petersburg, Russia

XXIX БЕРЕГОВАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ: НАТУРНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ — В ПРАКТИКУ БЕРЕГОПОЛЬЗОВАНИЯ Сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием Калининград 18—24 апреля 2022 года

МОРЯ РОССИИ: ВЫЗОВЫ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ НАУКИ (Севастополь, 26—30 сентября 2022 года)

## 1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА

Восточно-Сибирское море находится на северо-востоке России, между Камчаткой и Чукоткой, и омывает берега Якутии и Магаданской области. Его форма вытянутой полоски имеет длину более 2000 км и ширину от 300 до 1400 км.

Рельеф дна моря разнообразный - от мелководных шельфов до глубоководных впадин с грядами подводных хребтов, глубоководными холмами, оврагами, долинами и карами. Климатические условия моря суровы, сильно холодные зимы и короткое прохладное лето.

Воды моря содержат много кислорода, но распределены неоднородно. Флора и фауна моря богаты, включая множество видов морских животных и уникальный макрофитный комплекс водорослей на глубинах до 180 метров. В море также обитают гигантские креветки и киты. На юге и западе моря наиболее развит шельф с островами и мелкими архипелагами, где глубина не превышает 200 метров, в то время как центральная часть моря представляет собой систему узких впадин, которые разделяют гряды подводных хребтов.

Один из морей сибирского шельфа - Восточно-Сибирское море. На севере оно граничит с Арктическим бассейном, на западе - с морем Лаптевых, на востоке - с Чукотским морем. Это очень мелководный бассейн с чрезвычайно ровным дном, которое имеет общий наклон к северо-востоку. Берега моря на большей части их протяжения плавно переходят в морское дно. Глубины в западной части моря составляют 10-20 м, в восточной части - 30-40 м. В целом, Восточно-Сибирское море представляет собой равнинные и отлогие берега.

Индигирка и Колыма - две крупные сибирские реки, впадающие в море.

С учетом физико-географических особенностей (рельефа дна, ледового и гидрологического режима) море делится на две части – западную и восточную, условная граница между ними проходит по меридиану 160 в.д. В принятых

границах общая площадь составляет 770000 км, западная часть – 363000, восточная 407000

Восточно-Сибирское море находится на северо-востоке России, между Чукоткой, Камчаткой и островом Сахалин.

Северная граница моря, принятая в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ), проходит через пролив Лонга, соединяющий Восточно-Сибирское море с Чукотским морем. Далее граница идет по 179° долготы вплоть до мыса Сердцева-Кургана на побережье Чукотки.

## 1.1 КЛИМАТ

Восточно-Сибирское море находится на северо-востоке России, омывая берега Чукотки, Камчатки и острова Сахалин. Оно является одним из морей сибирского шельфа, граничащим с морями Лаптевых, Арктическим и Чукотским. Бассейн этого моря очень мелководный, с плавными берегами и ровным дном, глубина варьируется от 10 до 40 метров. В море впадают две крупные сибирские реки: Индигирка и Колыма. В соответствии с рельефом и гидрологическим режимом, море разделено на западную и восточную части, разделенные меридианом 160 восточной долготы. Климат Восточно-Сибирского моря обусловлен его высокоширотным положением, воздействием холодного Арктического бассейна с одной стороны и большого азиатского материка - с другой.

В зимнее время определяется малоградиентным полем атмосферного давления и малоустойчивыми ветровыми потоками с западной составляющей, в то время как весной и летом преобладают северные потоки.

Климат Восточно-Сибирского моря холодный и субарктический. Зима длится долго и характеризуется морозами до  $-30^{\circ}\text{C}$ . Лето короткое, прохладное и дождливое. Температура воздуха в летние месяцы колеблется от  $+5^{\circ}\text{C}$  до  $+15^{\circ}\text{C}$ . Вода в море также остывает зимой и прогревается летом не более  $+12^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, на этом районе часто происходят сильные бури, которые могут достигать силы ураганов. В целом, климат Восточно-Сибирского моря можно охарактеризовать как суровый и непредсказуемый.

В Восточно-Сибирском море присутствуют различные течения, включая Аляскинское течение, течение Оймяконского залива, Чукотское течение, Сибирское течение и Камчатское течение. Эти течения играют важную роль в формировании климата и экосистемы региона.

Гидрометеорологические факторы, такие как ветер, атмосферное давление, водообмен с Арктическим бассейном и соседними морями, а также сток рек, являются основной причиной колебаний уровня и течения в Восточно-Сибирском море. На севере моря присутствует постоянное течение, которое совпадает с основным, а на западе и северо-западе моря наблюдается трансатлантическое течение и дрейф льда. Направления течений в море меняются от западно-восточных. В восточной части моря характерным является восточное береговое течение, которое сохраняет свою направленность до мыса Биллингса и через пролив Лонга. Наибольшие скорости течений наблюдаются в проливах и на мелководных районах рек.

Аляскинское течение является холодным течением, которое течет вдоль берегов Аляски и проникает в Восточно-Сибирское море. Оно оказывает значительное влияние на климат этого региона, снижая температуру воздуха и воды.

Течение Оймяконского залива формируется из вод, которые поступают в залив с рек Лены и Яны. Оно также является холодным течением, которое оказывает влияние на климат и экосистему региона.

Чукотское течение является теплым течением, которое проходит через Берингов пролив и впадает в Восточно-Сибирское море. Оно принесло с собой многие виды рыб и других морских животных из Тихого океана.

Сибирское течение является главным течением, которое протекает вдоль побережья Сибири и впадает в Восточно-Сибирское море. Оно также оказывает значительное влияние на климат и экосистему региона.

Камчатское течение является теплым течением, которое проходит через Камчатский пролив и впадает в Восточно-Сибирское море. Оно также принесло с собой многие виды рыб и других морских животных из Тихого океана.

Все эти течения влияют на экосистему региона, образуя различные биологические сообщества и определяя распространение различных видов



животных и растений. Они также влияют на рыболовство и другие морские отрасли промышленности.

Важно отметить, что изменения климата могут повлиять на эти течения и, в свою очередь, на экосистему и промышленность региона. Поэтому, изучение и мониторинг этих течений является важной задачей для научных исследований и устойчивого развития региона.

## 1.2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА МОРЯ В ПЕРИОД НАРАСТАНИЯ

Средняя продолжительность замерзания Восточно-Сибирского моря составляет около 35 дней. Ледообразование начинается на северной границе моря в конце августа, когда сплоченные льды покрывают поверхность воды. Затем процесс распространяется к югу в течение сентября, и к 5 октября молодой лед начинает образовываться в прибрежной зоне. Восемь-девять месяцев в году, с октября по май-июнь, Восточно-Сибирское море полностью покрыто ледяным покровом благодаря устойчивому ледообразованию.

Как ледяной покров нарастает по двадцатой изобаре на Восточно-Сибирском море, необходимо уточнить. При этом следует учитывать, что формирование ледяного покрова зависит от многих факторов и происходит под воздействием различных условий, включая температуру воздуха и воды, скорость ветра и течений, а также другие факторы.

Восточно-Сибирское море находится в арктической зоне и его ледяной покров меняется в зависимости от времени года. В период нарастания льда, характеристики ледяного покрова могут быть следующими: [2]

Плотность льда: при нарастании ледяного покрова в Восточно-Сибирском море образуется плотный лед, который обычно составляет от 80 до 120 см толщиной.

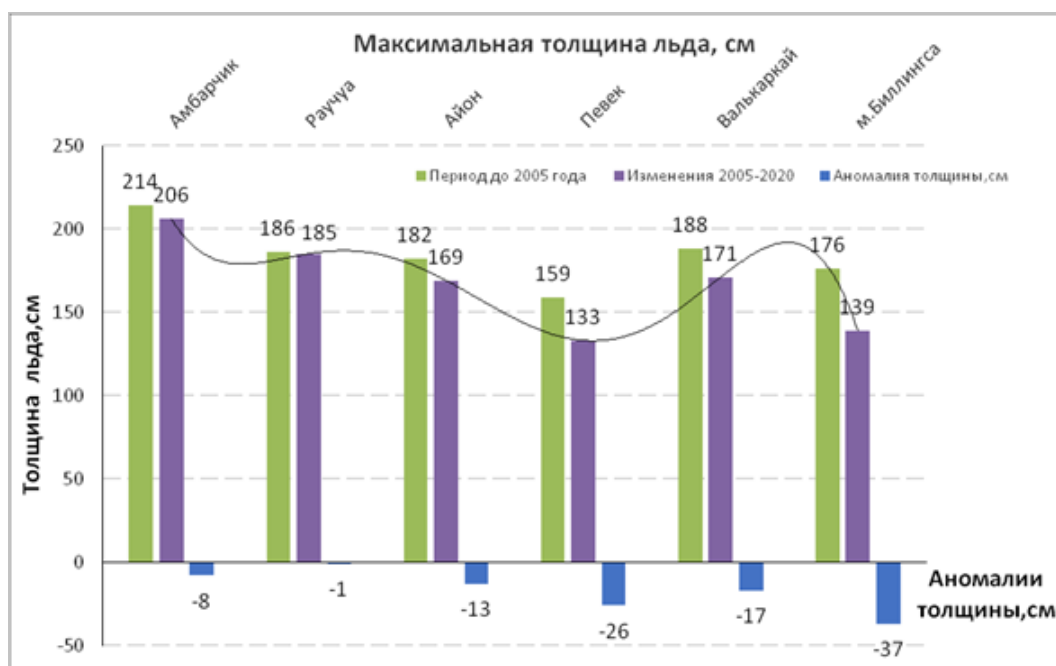


Рис. 1 максимальная толщина льда по данным полярных станций

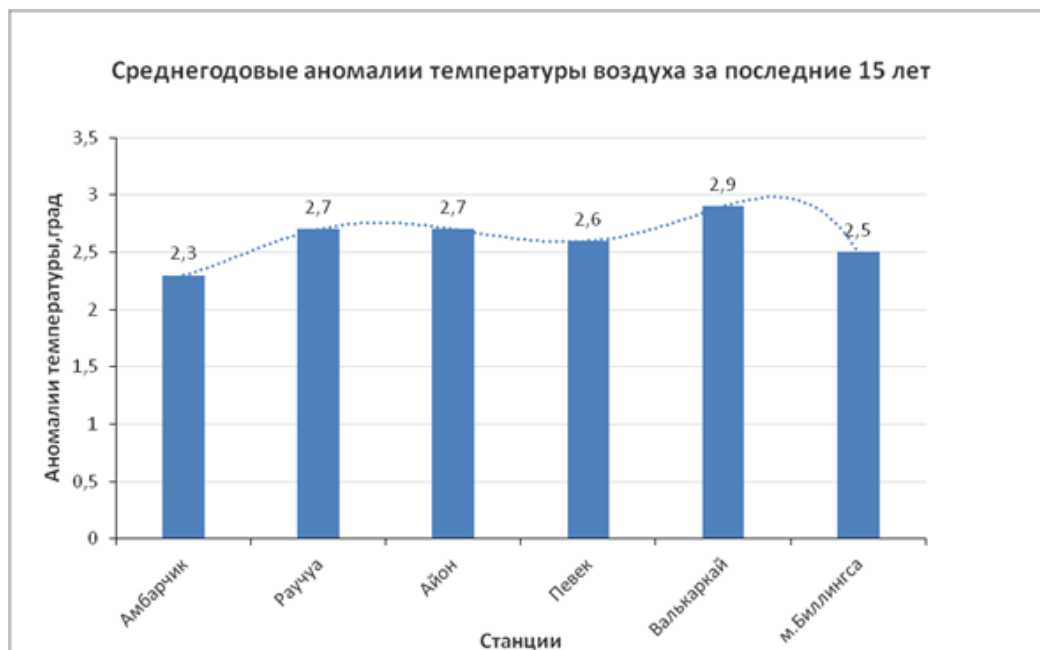


Рис. 2 среднегодовые аномалии температуры воздуха за последние 15 лет

Дрейф льда: ледяной покров Восточно-Сибирского моря может дрейфовать под воздействием ветра и течений. Обычно дрейф льда происходит в южном направлении вдоль побережья Аляски.

Толщина льда: в Восточно-Сибирском море толщина льда может достигать от 2 до 3 метров.

Состав льда: ледяной покров обычно состоит из морского льда и ледяных глыб, которые могут достигать больших размеров.

В период нарастания ледяного покрова на Восточно-Сибирском море характерно образование льда различных типов: от тонкого льда до крупных ледовых полярных дрейфующих льдов. В первый период нарастания ледяного покрова обычно формируется тонкий лед, который сильно колеблется под воздействием волн и течений. Затем образуется более прочный лед, который уже не так сильно колеблется и может выдерживать небольшие нагрузки.

Следующий этап нарастания ледяного покрова характеризуется образованием более толстого льда, который уже может выдерживать значительные нагрузки. В это время начинают формироваться ледовые полосы, которые образуются из-за различий в скорости роста льда в разных местах. В дальнейшем нарастание ледяного покрова продолжается до тех пор, пока он не достигнет максимальной толщины.

Характеристики ледяного покрова на Восточно-Сибирском море в период его нарастания зависят от многих факторов, таких как температура воздуха и воды, скорость ветра, течения и т.д. Однако в целом можно выделить несколько основных характеристик ледяного покрова в период его нарастания: толщина льда, его прочность, наличие трещин и полос, скорость роста и изменение формы льда под воздействием волн и течений.

В западной части моря и в Новосибирских проливах образовавшийся лед преимущественно местного происхождения. В некоторые годы здесь остаются льды, не вытаявшие в летний период, которые переходят в стадию двухлетних

льдов. В восточной части моря ледяной покров состоит как из вновь образовавшихся льдов, так и из льдов, не вытаявших летом, и многолетних льдов, занимающих центральный и северный районы. [4]

Для определения того, как нарастает ледяной покров в западной части Восточно-Сибирского моря и в Новосибирских проливах, также необходимо учитывать множество факторов. Однако, в целом, процесс формирования льда в этих районах схож с процессом нарастания ледяного покрова по двадцатой изобаре. Также важным фактором является географическое положение и топография районов, так как они могут влиять на скорость ветра и течений, а также на температуру воздуха и воды

Нарастание льда. Нарастание толщины льда в море происходит достаточно интенсивно. Уже в октябре в море представлены все возрастные градации льда кроме однолетнего (толщиной более 120 см). Более половины моря занимают молодые льды (толщиной до 30см), по 6% площади моря занимают однолетние тонкие (30-70 см) и однолетние средние льды (70-120 см). В отличие от других арктических морей в Восточно-Сибирском море после летнего периода остается в среднем до 24% не вытаявших льдов с включением многолетних льдов. Большая часть этих льдов (около 30%) находится в восточной части моря [17]

К февралю на большей части акватории моря образуется однолетний толстый лед, и практически не изменяется количество двухлетних и многолетних льдов. В конце зимнего периода ледяной покров состоит из припайных и дрейфующих льдов, сформированных однолетними толстыми льдами, а также двухлетними и многолетними льдами, занимающими 30% акватории восточной части моря

### 1.3 ПРИПАЙ

Как только лед начинает образовываться, он притягивает к себе морскую воду, которая поднимается на поверхность и замерзает. Таким образом, образуется слой льда, который плавает на поверхности и наиболее плотно сцеплен с водой на глубине от 20 до 200 метров. Этот слой льда и нижний слой воды, находящийся под ним, называется припаем.

Процесс формирования припая очень медленный, он начинается уже в конце сентября и продолжается до апреля-мая. В это время температура воздуха опускается до  $-40^{\circ}\text{C}$ , что ведет к образованию воздушной прозрачной синоптиком - явления, при котором в воздухе образуются кристаллы льда, которые довольно быстро растут и опускаются на поверхность моря. По мере образования новых ледовых пластов, припай утолщается и нарастает.

Припай оказывает огромное влияние на морскую жизнь в этом регионе. Он служит укрытием и местом размножения для многих видов морских животных, включая белую медведицу, морскую котиков, моржей и т.д. Также припай является препятствием для ветров и ограничивает перемещение льда.

Ветры могут оказывать большое влияние на морские условия в Восточно-Сибирском море, включая припай. Припай, также известный как ледовый наледь, является смесью льда и снега, которая образуется на поверхности моря в холодные месяцы. [5]

Сильные ветры могут создавать большие волны, которые могут разрушать или перемещать ледовые полости, что может привести к перемещению припая. Ветры также могут оказывать влияние на скорость стекания льда, что может влиять на формирование припая и его стабильность. [6]

Помимо ветров, другие факторы, такие как температура воздуха и течения, также могут влиять на формирование и местоположение припая.

Припай в Восточно-Сибирского моря является самым обширным в арктических морях. Большая его часть располагается в западной мелководной

части моря. Как правило, припай в море образуется на чистой воде. Однако в годы, когда в море остаются не вытаявшие в тений период остаточные льды, припай формируется с включением этих льдов.

Многолетний разброс сроков образования припая в районах моря составляет 5-6 декад. Ранние сроки приходятся на первую декаду октября, поздние – на последнюю декаду ноября. От 70 до 90 % случаев образования припая приходится на октябрь. Однако время наибольшей повторяемости сроков образования припая приходится на октябрь. Однако время наибольшей повторяемости сроков образования припая внутри месяца приходится на разные декады в каждом из районов.

В районе, включающем Новосибирские острова и проливы Санникова и Дм. Лаптева до Колымской губы чаще всего припай образуется в первой и третьей декадах месяца. Наиболее неустойчивы сроки образования припая вдоль чукотского побережья моря. Здесь припай примерно с одинаковой вероятностью может образоваться в любой из декад октября.

Многолетний разброс сроков образования припая зависит от изменчивости гидрометеорологических и ледовых условий, предшествующих устойчивому ледообразованию в море, и осенних условий в период ледообразования и нарастания толщины льда. Необходимой для образования припая. В среднем припай начинает образовываться через 10-15 дней после устойчивого ледообразования. [8]

С момента образования устойчивого припая его граница распространяется в море и в зависимости от зимних условий в апреле (иногда в мае) достигает своего максимального удаленного от побережья положения. Внешняя граница первичного припая в ряде районов удерживается стамухами, образовавшимися в периоды сильных нажимных ветров.

Прижимные и отжимные ветры могут оказывать различное влияние на припай в Восточно-Сибирском море в зависимости от направления и силы ветра.

Прижимные ветры, дующие от берега на открытую воду, могут способствовать вымыванию припая, увеличению высоты волн и усилению течений, что может породить опасность для судов и повреждение припайных сооружений. [9]

Отжимные ветры же, дующие от открытой воды к берегу, наоборот, могут способствовать образованию припая, уменьшению высоты волн и уменьшению течений. Однако в некоторых случаях они также могут повышать высоту припая и приводить к усилению градиента давления, что может вызывать штормовые волны и наводнения на прибрежных территориях.

Таким образом, прижимные и отжимные ветры имеют комплексное воздействие на формирование припая в Восточно-Сибирском море и требуют учета при планировании деятельности, связанной с припайными зонами.

Прижимные и отжимные ветры могут оказывать значительное влияние на образование стамух в Восточно-Сибирском море. Прижимные ветры дуют от открытого океана к берегу и могут вызывать нагревание воды у берега, что может способствовать образованию стамух. Отжимные ветры, напротив, дуют от берега в открытое море и могут способствовать охлаждению воды у берега, что может мешать образованию стамух.

Однако стамухи также зависят от других факторов, таких как температура воды, наличие льда и приливы, поэтому влияние прижимных и отжимных ветров на образование стамух может быть неоднозначным и зависеть от конкретных условий. В целом же, прижимные ветры могут способствовать образованию стамух в Восточно-Сибирском море, в то время как отжимные ветры могут снижать вероятность их образования. [10]

После становления припая в проливах Дм. Лаптева и Санникова его граница очень быстро смещается в восточном направлении. Наиболее интенсивное образование припая в Восточно-Сибирском море приходится на период с октября по январь, причем наибольшее приращение припая наблюдается в декабре-январе.



За месяц с ноября по декабрь на широте пролива Санникова граница в среднем перемещается на 300км. Затем интенсивность продвижения границы припая снижается, и в мае ее положение стабилизируется около северного побережья Новосибирских островов и у чукотского побережья, а в апреле – в центральных районах моря

Припай наиболее развит в западной и центральной части моря. Граница припая от устья Индигирки в северо-восточном направлении находится в среднем на расстоянии 285 км. Максимальное удаление границы припая от побережья Новосибирских островов на севере составляет от 50 до 80 км. Ширина припая в восточной части моря, рядом с чукотским побережьем, в среднем не превышает 25-30 км.

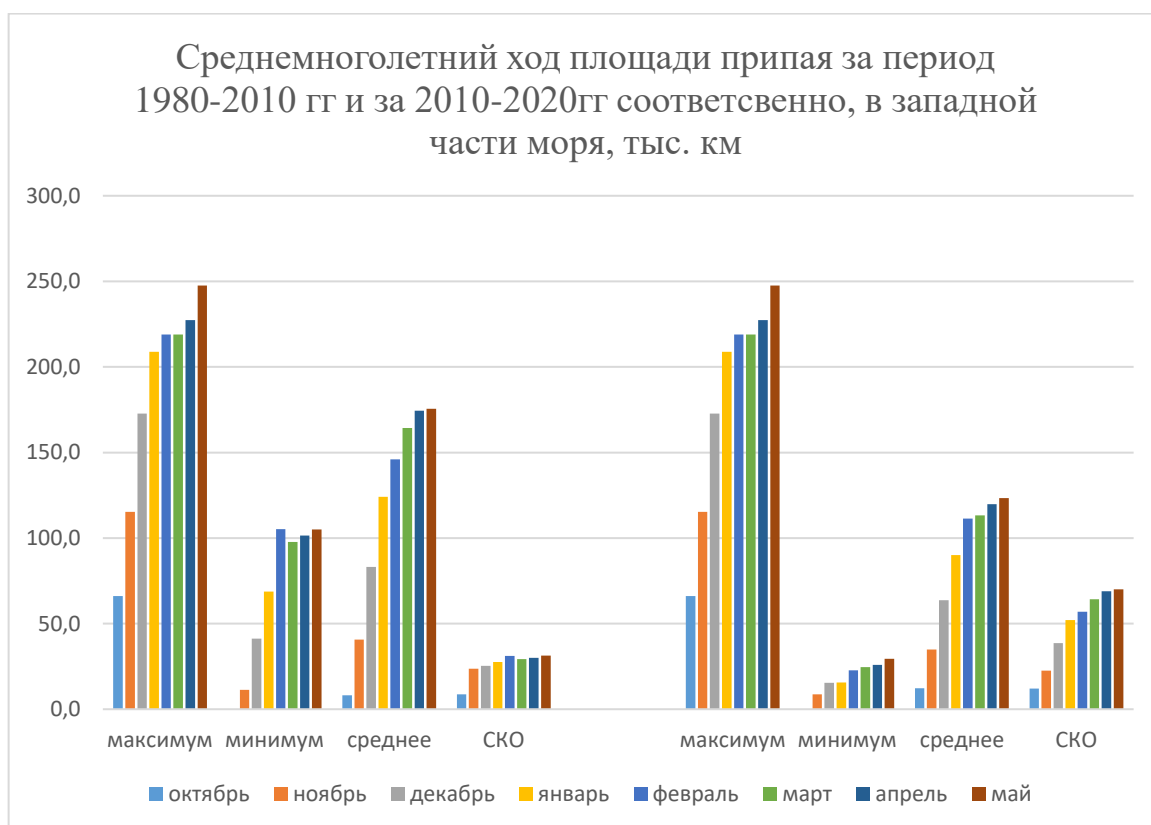


Рис. 3 среднегодовое движение площади припая за периоды 1980-2012 гг. и 2010-2020 гг. соответственно, в западной части моря

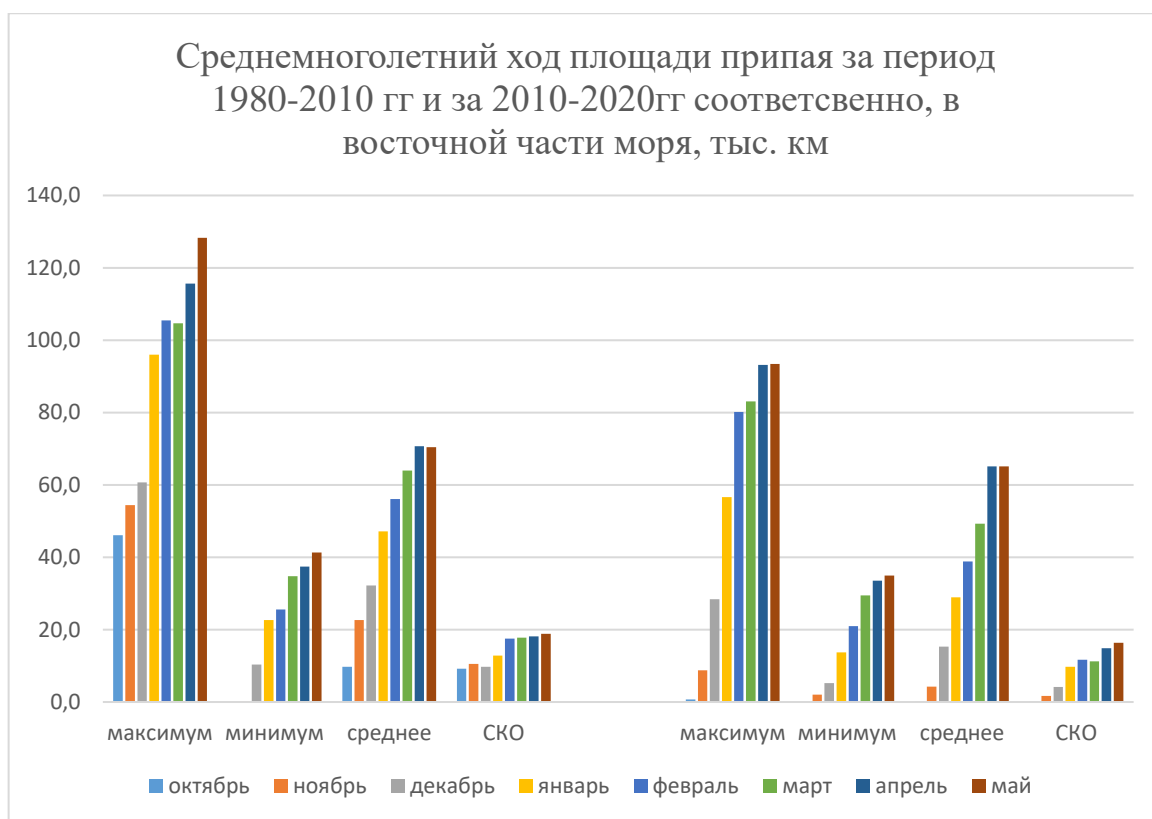


Рис. 4 среднемноголетний ход площади припая за периоды 1980-2012 гг. и 2010-2020 гг. соответственно, в восточной части моря

По мере смещения границ припая в море происходит изменение его площади. Если в западной части моря интенсивное увеличение площади припая происходит до января – начала февраля, а затем замедляется, то в восточной части площадь припая равномерно увеличивается в течение всего периода нарастания

Средняя площадь припая во всем море составляет 260 тыс. км<sup>2</sup>. Многолетние изменения площади припая происходят в пределах 154-254 тыс. км. Т.е. припай в ВСМ может занимать от 20 до 46% акватории – сюда вставь свои значения

В зимний период в Восточно-Сибирском море часто наблюдаются нажимные ветры, которые способствуют поступлению льдов из Арктического бассейна в восточную часть моря. Однако, смещаясь вдоль границы припая в северо-западном направлении, значительная часть этих льдов выносится в

Арктический бассейн и вовлекается в Трансарктический дрейф севернее Новосибирских островов.

В летнее полугодие повторяемость выносных ветров в Восточно-Сибирском море заметно возрастает, и площадь выносимых из моря льдов составляет в среднем около 100 тыс. км<sup>2</sup> [12]

Торосистость льдов в море составляет 2 балла и возрастает к границе припая до 3 баллов

Торосистость — это явление, когда льдины образуют плотный ледяной покров в море. Торосы могут возникать при различных условиях - например, когда ледяной покров разбивается под воздействием волн, ломается при приливах и отливах или растрескивается в результате изменения температуры.

В Восточно-Сибирском море торосистость достаточно высока в зимний период. Это связано с тем, что там образуются сильные морозы, которые приводят к образованию плотного льда на поверхности моря. Из-за торосов на морских путях могут возникнуть препятствия для судов, поэтому очень важно контролировать уровень торосистости и прогнозировать ее на основе метеорологических данных. Также торосистый лед есть удачное место для жизни морских представителей, таких как тюленей, некоторых видов китов и других животных.

## 1.4 ПОЛЫНИ

Заприпайные полыни. Образующиеся за припаем Восточно-Сибирского моря полыни в большинстве своем неустойчивы и относятся к разряду эпизодических (повторяемость менее 50%). Исключением является Северная Новосибирская полынья, образующаяся за припаем севернее Новосибирских островов. Эта полынья относится к стационарным, её повторяемость превышает 75%, и при благоприятных условиях её ширина может достигать десятков километров.

Северная Новосибирская полынья впервые была обнаружена в начале 19 века русской гидрографической экспедицией. Участки экспедиции были поражены, увидев чистую воду среди морозной зимы в столь высоких широтах. Увиденное ими породило идею открытого Северного океана к северу от Новосибирских островов, которая была опровергнута только в начале 80-х гг. XIX века. Оставшимся в живых участникам дрейфа «Жаннеты» под командованием де Лонга. Стало очевидным, что пространство чистой воды за припаем образуется под влиянием отжимного ветра и является «сибирской полыньей»

Северная Новосибирская полынь (также известная как Тунгусский спутник) располагается на северо-востоке Новосибирской области, на территории Тунгусского района. Её размеры составляют около 5 км в длину и до 3 км в ширину. [14]

Появление Северной Новосибирской полыни довольно редкое явление, которое очень трудно предсказать. Она возникает из-за таяния многолетнего мерзлотного слоя под землёй.

История открытия Северной Новосибирской полыни началась в 1971 году. Тогда жители Тунгусского района обнаружили на местности неизвестное образование. Первыми, кто описал полынь, стали сотрудники местного гидрометеорологического бюро. С тех пор Северная Новосибирская полынь была

изучена учёными из разных стран, но до сих пор она остаётся загадкой для многих геологов и гидрологов.

Великая Сибирская полынья — это крупнейшее в мире скопление фитопланктона, расположенное в Лаптевом море и Восточно-Сибирском море, на северо-востоке России. Полынь образуется в результате слияния нескольких крупных рек (Лены, Оби, Енисея) и тает с конца июля до середины сентября каждого года.

Площадь Великой Сибирской полыни колеблется от 800 тысяч до 1,4 миллиона квадратных километров, что примерно соответствует площади Украины. Ее форма и размеры неоднородны и изменяются в зависимости от погоды и других факторов.

Массовое цветение фитопланктона и образование полыни происходят ежегодно, но интенсивность этого явления может сильно варьироваться. В некоторые годы полынь может быть меньше, чем в другие, а также могут изменяться характеристики цвета и густоты фитопланктона.

История открытия Великой Сибирской полыни начинается со второй половины XIX века, когда первые экспедиции исследовали северные моря России. В 1878 году русский ботаник Федор Пахтусов обнаружил крупное скопление фитопланктона в Восточно-Сибирском море и назвал его "Морское лето". В 1893 году два мореплавателя-геолога Ходаев и Ефремов совершили первое научное плавание по Лаптевому морю и смогли подробно описать исследованные ими водные массы и фитопланктон, включая Великую Сибирскую полынь.

Заприпайные полыньи Восточно-Сибирского моря к востоку от Новосибирских островов образуются эпизодически. Их средняя повторяемость уменьшается от 44% до 25% по мере продвижения к чукотскому побережью. Однако в некоторые месяцы эти полыньи существуют устойчиво, их повторяемость больше 50%. Так, к устойчивым можно отнести Восточную

Новосибирскую (запад) полынью в декабре и в июне, Западную Чукотскую – в июне.

Восточная Новосибирская полынь и Западная Чукотская полынь — это две из четырех основных морских полыней в Арктике. Эти полыни расположены на севере России и окружают Северный Полюс.

Восточная Новосибирская полынь находится между Чукотским морем на востоке и Баренцевым морем на западе. Это глубокая полынь, имеющая глубину около 2,5 тысяч метров. Она также является самой большой морской полынь в мире. В зимние месяцы Восточная Новосибирская полынь покрыта плотным льдом, который начинает таять весной. [20]

Западная Чукотская полынь находится между Чукотским морем и Восточно-Сибирским морем. Она гораздо меньше по размеру, чем Восточная Новосибирская полынь, и имеет глубину около 1,2 тысяч метров. В зимние месяцы она также покрыта льдом, который тает весной.

Обе полыни играют важную роль в климате планеты, так как они влияют на циркуляцию воздуха и морской течения в Арктике. Они также очень важны для экосистемы региона, и являются местом обитания большого количества морских животных, включая морских млекопитающих, рыб и ракообразных.

Суммарная площадь полыней составляет в среднем за сезон около 5% от площади моря. В сезонных колебаниях общая площадь полыней изменяется в пределах от 3 до 8%. Минимальные величины приходятся на центральные зимние месяцы: конец января – начало марта.

## 1.5 ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА МОРЯ В ПЕРИОД ЕГО РАЗРУШЕНИЯ

Восточно-Сибирское море является одним из самых холодных морей на планете, средняя температура его воды составляет около  $-1,5^{\circ}\text{C}$ . В зимний период вода в море замерзает, и на поверхности образуется ледяной покров толщиной от нескольких сантиметров до нескольких метров.

Разрушение ледяного покрова начинается весной, когда становится теплее и начинается таяние льда. В это время на поверхности моря образуются расщелины, которые со временем увеличиваются в размерах. Ускорить процесс разрушения льда могут сильные ветры и зыбь воды.

Во время разрушения ледяного покрова Восточно-Сибирского моря на его поверхности образуются различные формы льда - от маленьких кристаллов до крупных ледовых глыб. Разрушенный лед позволяет кораблям свободно передвигаться по морю, что является важным фактором для транспортировки грузов и развития экономики региона.

Основными характеристиками ледяного покрова Восточно-Сибирского моря в период его разрушения являются:

- появление трещин и разломов на поверхности льда;
- образование ледяных глыб и бушей, которые перемещаются под воздействием приливов и ветра;
- увеличение площади открытой воды.

Разрушения ледяного покрова Восточно-Сибирского моря начинаются обычно в конце апреля - начале мая в связи с таянием льда на берегах рек, усилением солнечной активности и повышением температуры воздуха. Однако время начала разрушения может варьироваться в зависимости от погодных условий. [18]

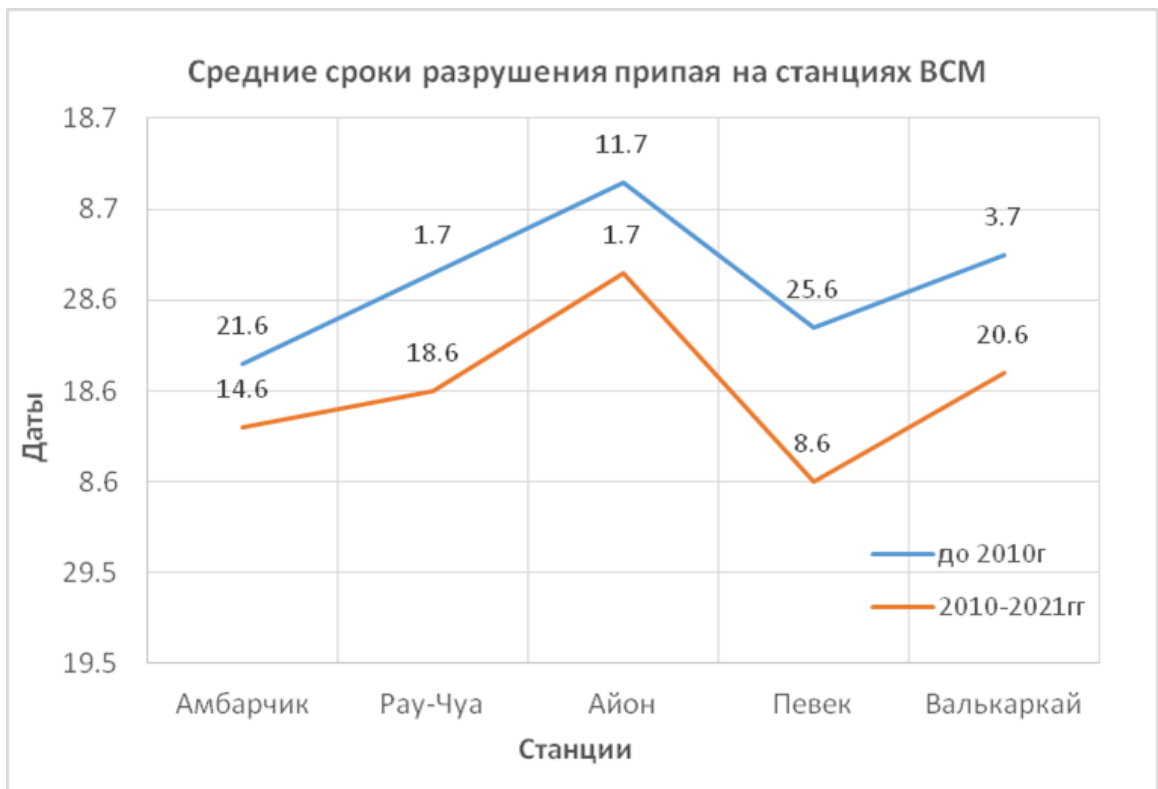


Рис. 5 средние сроки разрушения припая по данным полярных станций

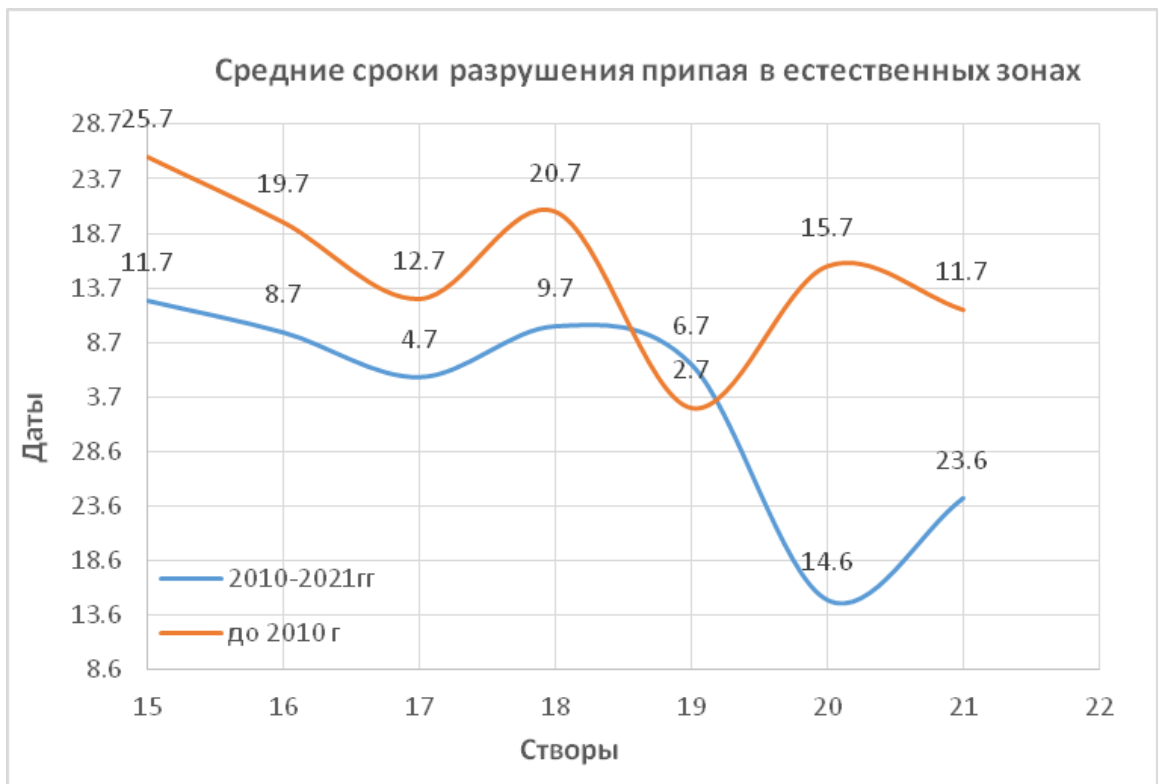


Рис. 6 средние сроки разрушения припая в естественных зонах Восточно-Сибирского моря



Образование ледяных глыб и бушей происходит в результате процессов, связанных с замерзанием воды или других жидкостей. Ледяные глыбы образуются, когда большие куски льда откалываются от ледника или айсберга.

Буши — это ледяные образования, которые появляются на реках и других потоках воды. Они образуются, когда вода замерзает на поверхности реки или озера и начинает слишком быстро течь, образуя слоистые ледяные структуры. Оба эти процесса могут быть довольно впечатляющими, но могут представлять опасность для людей и животных.

С начала июля и до конца сентября в море происходит таяние льда и очищение его от него под влиянием тепловых и динамических процессов. Очагом, где происходит очищение, являются приустьевые области рек Индигирка и Колыма, оказывающие значительное влияние на ледовый режим мелководного западного района моря. В то же время, очищение моря происходит значительно медленнее, чем в других арктических морях. В августе скорость очищения увеличивается после окончательного взлома припая.

В прикромочной зоне Восточно-Сибирского моря начинается разрушение припая в конце мая – начале июня. Постепенный взлом происходит в течение двух месяцев. Окончательно припай разрушается в конце июля или реже в начале августа, в зависимости от степени его развития в осенне-зимний период.

В западной части моря при размерах припая близких к средним (с вероятностью 50%) окончательное разрушение происходит в конце июля. При максимальной площади припая это происходит во второй декаде августа, а при минимальной – в начале июля.

Около месяца занимает период окончательного разрушения припая в районах ВСМ, который может продолжаться на протяжении нескольких лет. В соответствии с общей закономерностью разрушения припай раньше других районов припай взламывается на участке бар реки Колымы – о. Айон, это происходит в среднем почти на две недели раньше, чем в районах проливов.

Самый ранний срок разрушения припая на этом участке приходится на начало третьей декады июня, а в районах проливов – в первой декаде июля.

После взлома припая в море наблюдается дрейфующие льды различной сплоченности. В конце июля ото льда очищается только 10% акватории моря, и кромка льда располагается местами в непосредственной близости от побережья материка и островов. Восточная часть моря в течение всего периода таяния и разрушения ледяного покрова очищается почти в два раза медленнее, чем западная часть, и если перед началом ледообразования, в сентябре, в среднем более половины западной части моря освобождается ото льда, то восточная часть – менее чем на треть

## 1.6 ПЛОЩАДЬ АКВАТОРИИ В РАЙОНАХ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ, ОСВОБОЖДАЮЩИЕСЯ ОТО ЛЬДА В ПЕРИОД ТАЯНИЯ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА

Наиболее интенсивно таяния льда и очищение моря происходят в августе. В конце месяца лед отсутствует на 40% акватории западной части моря и на 20% - восточной. В среднем в августе освобождается ото льдов пролив Санникова

В сентябре процесс очищения моря ото льда завершается. Кромка льда в западной части моря располагается в 60-90 милях севернее Новосибирских островов. На востоке – проходит через пролив Лонга под южным берегом острова Врангеля. Всего 30% акватории восточной части моря и около 50% западной перед началом замерзания свободны ото льда.

В процессе таяния и разрушения ледяного покрова сокращается количество сплоченных (7-10 баллов) льдов и увеличивается количество редких и разреженных (1-6 баллов) льдов. Редкие и разреженные льды образуются как вследствие таяния и разрушения сплоченных льдов, так и из-за динамических воздействий, в результате чего льды частично выносятся за пределы моря.

Таяние льдов в Восточно-Сибирском море сопровождается рядом динамических процессов. Некоторые из них включают изменения в составе воды, волнения, течения, атмосферные явления и агрессивное действие льда на окружающую среду.

Во время таяния льдов водный состав может измениться из-за выпадания внутренних льдов и стающих глациальных вод. Эти воды могут отличаться от поверхностных вод по своим физическим и химическим свойствам, что может оказать влияние на экосистемы моря и на рыболовные ресурсы.

Из-за таяния льда могут также возникать сильные волнения в море, которые могут сопровождаться восходящими течениями. Это может привести к

повреждению или уничтожению инфраструктуры, например, прибрежных сооружений и морских объектов.

Кроме этого, таяние льда может привести к повышению уровня моря, так как вода, освобождающаяся ото льда, добавляет больше гидросферы. Это может привести к погружению побережья и изменению береговой линии.

Также, в процессе таяния льда может происходить разрушение ледяного покрова и образование ледяных глыб, которые могут стать опасными для навигации и судоходства. Они могут либо препятствовать движению судов, либо привести к их повреждению.

И наконец, таяние льда может вызывать атмосферные явления, такие как туманы и дожди, которые также могут повлиять на морские экосистемы и на жизнь на берегу.

Деление льдов по сплоченности используется, чтобы определить качество и прочность льда. Обычно лед разделяют на сплоченный (плотный) лед и разряженный (пористый) лед. Сплоченные льды обычно имеют оценку от 7 до 10 баллов, а разряженные льды имеют оценку от 1 до 6 баллов.

Характеристики сплоченных льдов включают высокую плотность и прочность. Они хорошо подходят для конструирования и строительства, таких как прокладка дороги на реке во время зимы. Они также являются хорошим источником питьевой воды, так как плотный лед может храниться без потери качества на протяжении длительного времени.

Разряженные льды характеризуются низкой плотностью и проницаемостью. Они могут быть использованы для создания ледяных фигур или для охлаждения напитков, так как им требуется меньше времени для распада. Однако из-за их низкой прочности они не подходят для строительства и конструирования.

В конце сентября около 40% акватории полностью освобождается ото льда, но не более чем на трети акватории сохраняются сплоченные льды, в основном за счет восточной части моря

Ледяные массивы. Квазистационарные скопления сплоченных льдов ВСМ образуют два ледяных массива – Новосибирский, занимающий южные районы в западной части моря, и Айонский.

Новосибирский и Айонский ледяные массивы — это громадные зоны льда на восточном побережье Сибири, которые покрывают прилегающие к морскому берегу проходы и перешеек. Эти ледяные массивы формируются за счет замораживания морской воды и иногда могут стать преградой для судов и других водных транспортных средств, которые пытаются пройти через эти зоны.

Новосибирский ледяной массив формируется из однолетних льдов местного происхождения, которые в некоторые годы могут содержать включения многолетнего льда. В период с июня по август льды Новосибирского массива могут блокировать восточные подходы к проливам Санникова и Дм. Лаптева. Обычно лед в Новосибирском массиве полностью вытаят к сентябрю, но в отдельные годы он может сохраняться до конца периода таяния. Интересно, что в некоторых случаях Новосибирский массив может быть соединен с Айонским.

В восточной части ВСМ находятся льды, которые могут блокировать центральные районы моря или пролив Лонга с запада. Этот массив формируется из местных однолетних льдов различного возрастного состава и многолетних льдов из Арктического бассейна. Льды в этом массиве имеют повышенную мощность и пониженную разрушаемость в летний период. Обычно примерно 50% льдов не успевает вытаять до начала ледообразования. Льды Айонского массива очень редко исчезают полностью, тогда как Новосибирский массив менее устойчив и может исчезнуть в любой из декад начиная с третьей декады июля.

Айонский ледяной массив — это один из крупнейших ледяных массивов на территории Восточной Арктики. Он расположен в южной части моря Лаптева и простирается на площади около 50 тыс. кв. км.

Основные характеристики Айонского ледяного массива:

- Высокий уровень глубины льда. В среднем он достигает 2-3 метров, но местами может достигать 10-12 метров.
- Разнообразие форм льда. В Айонском ледяном массиве можно найти множество форм льда: от тонкого льда-кристалла до огромных ледников.
- Периодическая активность. Массив формируется из безграничного количества мелких стихий, которые переносят и складывают лед на протяжении всего зимнего сезона.

## 2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 СЕТЬ ПОЛЯРНЫХ СТАНЦИЙ В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ

Для исследования использовались данные, подготавливаемые в ЦЛГМИ ААНИИ на основе компиляции данных ИСЗ, информации с полярных станций и судовых наблюдений за ледовой обстановкой.

Береговые станции, выбранные для измерений, расположены на припаях, толщина которых обычно превышает толщину дрейфующего льда. Формирование припая происходит в зимний период, а его максимальное развитие достигается к марту-апрелю.

Регулярные измерения толщины льда на полярных станциях начались в середине 1940-х гг. Для исследования были выбраны полярные станции в Восточно-Сибирском море (рис. 1), имеющие записи наблюдений примерно одинаковой протяженности: Айон, Амбарчик, Биллингса, Валькарнай, Певек, Раучуа, Санникова, (ст. Санникова обычно считается частью моря Лаптевых, но поскольку другой действующей наземной полярной станции с длительными сериями наблюдений в той части моря нет, она была включена в данное исследование).

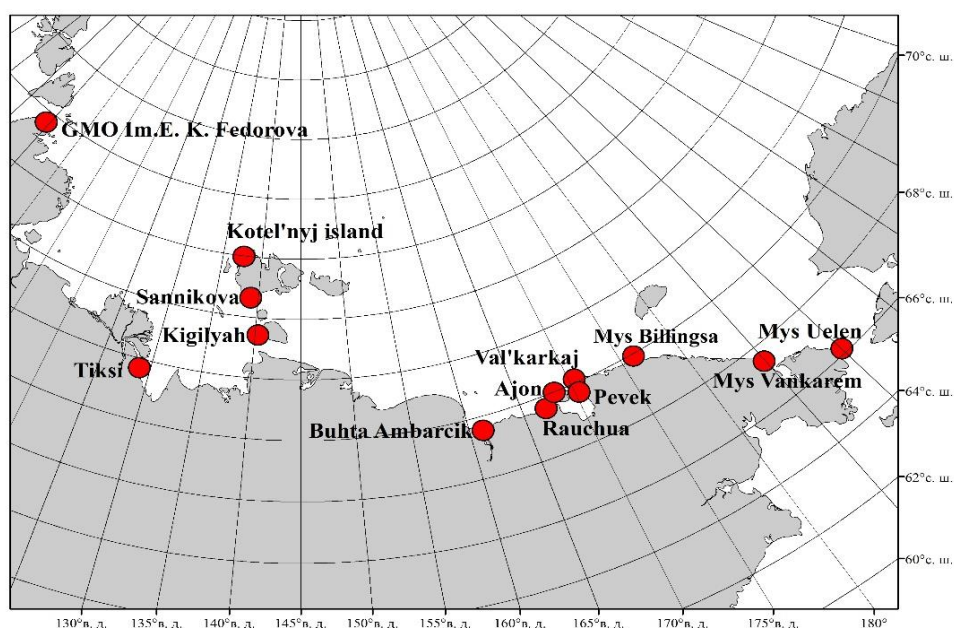


Рис. 7 Схема расположения полярных станций

Выбранные станции измеряют на береговых припаях, которые обычно толще, чем дрейфующий лед.

Максимальное формирование припая происходит зимой, а его развитие достигает пика в марте-апреле. Восточная мелководная часть моря занимает большую площадь припая, в то время как западная часть, наоборот, довольно узкая и распространяется вдоль побережья островов Северной Земли. Границы припаев в апреле представлены на рисунке 2. Летом большинство припаев полностью разрушается, но в редких случаях частично сохраняется после сезона таяния в года с суровыми метеорологическими и ледовыми условиями.



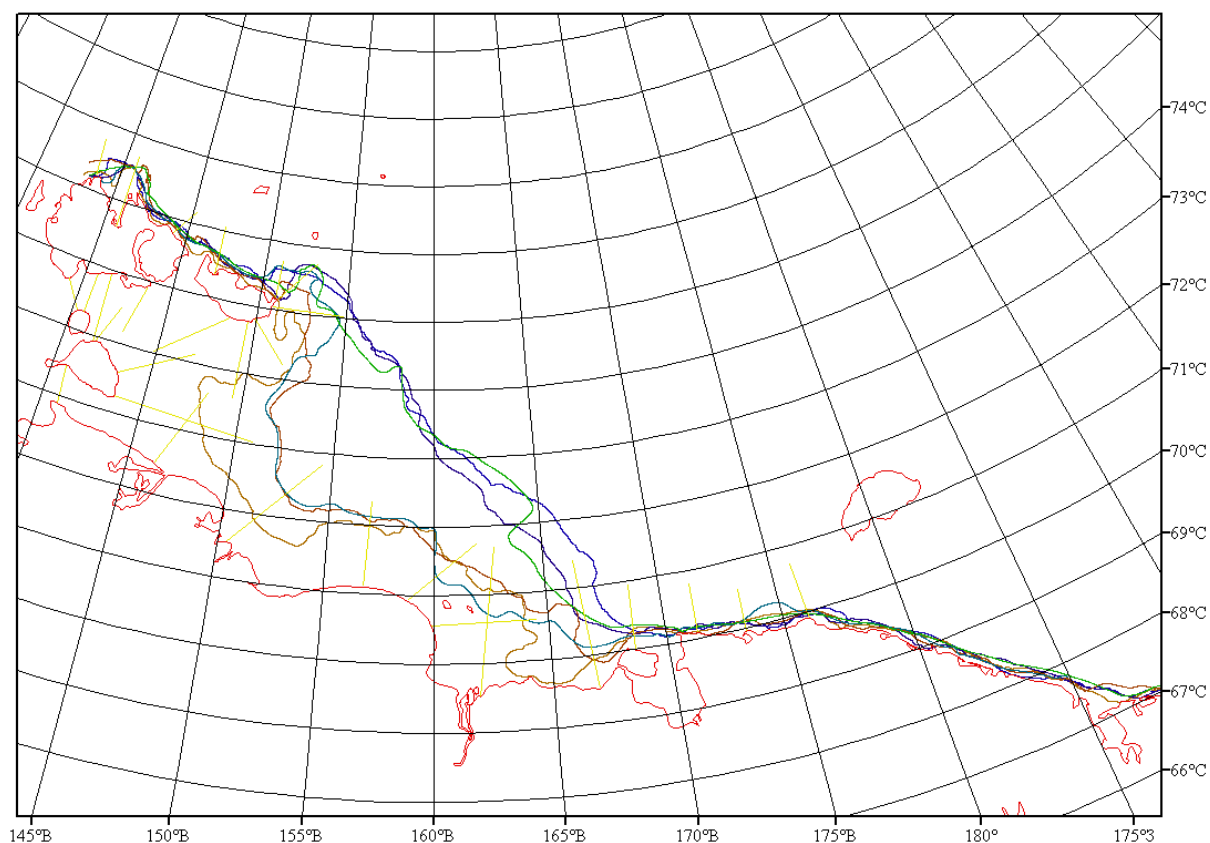


Рис. 8 Характерное распространение припая в Восточно-Сибирском море (разными линиями указано положения припая за период с 2007/2008 по 2020/2021 гг.)

Результаты измерений толщины льда согласно Наставлению представлены в данных, которые получены в постоянной точке (ПТ). Выбор ПТ производится заранее и должен быть типичным для объекта, однородным по припаю и на глубине не менее 2 метров. Измерения разрешены только после достижения льдом 12 сантиметров толщины. Для бурения используются специальные буры с бензиновыми двигателями или электрическими бурами.

Для проведения исследований на ледовых покровах, первое измерение выполняется в выбранном месте путем пробуривания лунки. Эта лунка маркируется вехой и вокруг нее выполнены последующие измерения на расстоянии в 10-15 метров, образуя круг - так называемый пункт трансформации (ПТ). Все последующие лунки для измерений засыпаются снегом и ледяной

крошкой, но таким образом, чтобы в первоначальной лунке оставались приметные метки, предотвращающие попадание в уже замеренные области. В ПТ измеряют толщину и высоту льда, и плотность снежного покрова. Для измерения толщины припайного льда используется ледемерная рейка. Если разница между толщинами льда в двух лунках составляет более 5 см, то бурится третья лунка и при необходимости четвертая.

Измерения толщины льда фиксируются, но не учитываются, если значения отличаются. Высота снежного покрова на льду определяется специальными инструментами, а плотность снега контролируется весовым снегомером. Измерения проводятся раз в 10 дней, и, если их невозможно сделать в установленный день, они проводятся в ближайшие дни в лучших условиях. Архив ААИИА содержит результаты измерений толщины льда за каждую декаду месяца, начиная с октября (иногда и с сентября) и заканчивая июлем. Некоторые данные могут отсутствовать в рядах, возможно, из-за проблем с получением информации по каналам связи, человеческого фактора или отсутствия измерений в определенные годы.

Из-за большого количества пропусков по годам, особенно в начальные десятилетия, данные о толщине за сентябрь и октябрь не учитывались в данном конкретном исследовании. Это связано с тем, что измерения толщины льда были невозможны до образования достаточной толщины. Для уменьшения погрешностей в расчетах были проверены значения наблюдений, вызвавшие сомнения, например, экстремальные значения. Это было сделано через сравнение с информацией с соседних станций при ледовых и метеорологических условиях. Иногда, если были обнаружены расхождения, значения были исключены.

Подводя итог, из исследования были исключены случаи, не соответствующие критериям наблюдения за сезонным ростом толщины льда, такие как резкие скачки толщины, не характерные для наблюдаемого периода. Они считались следствием динамических процессов и эрозии и поэтому были исключены из анализа. Из данных также исключались измерения, проведенные

после вскрытия льдин или смещения измерительных станций, поскольку они считались нетипичными. Данные о температуре использовались в дополнение к измерениям толщины льда, а для анализа использовались среднемесячные значения. Используемые для исследования данные охватывали период с ноября по июнь, начиная с конца 1930-х гг., когда начались регулярные измерения. Следует отметить, что год начала измерений может различаться на разных станциях.

Ряды данных, используемые для анализа, охватывают период с ноября по июнь 2020 года включительно. Начиная с конца 30-х годов, регулярные измерения проводились на различных станциях, год начала измерений может отличаться в зависимости от станции, что указано в таблице 1.

Таблица 1. Общая информация о рядах наблюдений на полярных станциях Восточно-Сибирского моря

| Пункт наблюдений | Характеристика              | Год начала | Число лет наблюдений | Пропуски данных, % |
|------------------|-----------------------------|------------|----------------------|--------------------|
| Айон             | Температура(среднемесячная) | 1942       | 79                   | 0                  |
|                  | Толщина льда (ежедекадная)  | 1942/1943  | 78                   | 0                  |
| Амбарчик         | Температура(среднемесячная) | 1933       | 88                   | 0                  |
|                  | Толщина льда (ежедекадная)  | 1938/1939  | 82                   | 3                  |
| Биллингса        | Температура(среднемесячная) | 1935       | 86                   | 0                  |
|                  | Толщина льда (ежедекадная)  | 1936       | 85                   | 12                 |
| Валькарнай       | Температура(среднемесячная) | 1935       | 86                   | 1                  |
|                  | Толщина льда (ежедекадная)  | 1935/1936  | 85                   | 6                  |
| Пр. Санникова    | Температура(среднемесячная) | 1942       | 79                   | 1                  |
|                  | Толщина льда (ежедекадная)  | 1942/1943  | 78                   | 4                  |
| Певек            | Температура(среднемесячная) | 1942       | 79                   | 0                  |
|                  | Толщина льда (ежедекадная)  | 1941/1942  | 77                   | 0                  |
| Раучуа           | Температура(среднемесячная) | 1941       | 78                   | 4                  |
|                  | Толщина льда (ежедекадная)  | 1941/1942  | 77                   | 5                  |

## 2.2 ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Во внутренней структуре ряда температур и площади припая отмечены одна или несколько циклических составляющих. Основная задача была - выявить в исследуемом атмосферном процессе только циклические составляющие, поэтому было принято решение воспользоваться спектральным или гармоническим анализом, не рассчитывая предварительно автокорреляционную функцию (АКФ).

В основе гармонического анализа лежит идея, что любой ряд можно разложить без остатка в ряд Фурье, т.е. на конечное число гармоник. Гармониками называются тригонометрические функции, имеющие периоды, кратные длине ряда, т.е. каждая гармоника целое число раз «укладывается» в длину исходного ряда.

Формула гармоники:  $G_k = A_k \cos(\omega_k t - \varphi_k)$ ,  $\omega_k = 2\pi/T_k$

где  $k$  - номер гармоники;  $A_k$  - амплитуда  $k$ -той гармоники;

$T_k$  - период  $k$ -той гармоники;

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \sin(\omega_k t_i)]; b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [x_i \cos(\omega_k t_i)],$$

где  $x_i$  - исходный ряд;  $N$  - длина ряда;  $\omega_k$  - частота  $k$ -той гармоники;  $t_i$  - ряд времени

$t_i = i, i = 1, 2, 3 \dots N$ . Характеристики гармоники определяются по формулам:

Амплитуда гармоники  $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$

Фаза гармоники  $\varphi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k} \pm \pi$

Дисперсия гармоники  $D_k = \frac{A_k^2}{2}$

Вклад гармоники в общую дисперсию ряда  $V_k = \frac{D_k}{D_y}$

где  $D_y$  — дисперсия исходного ряда.

Множество современных статистических программ, таких как «Statistica» и «SPSS», используют метод БПФ для расчета разложения Фурье. Однако, необходимо учитывать, что при использовании данного метода возможна потеря информации о некоторых характеристиках гармонических составляющих.

Кроме того, стоит отметить, что периодограмма (или спектр), получаемая в результате обработки данных, показывает зависимость дисперсии гармонических составляющих от их частоты. Таким образом, это позволяет более подробно изучить структуру данных и выявить скрытые закономерности.

Таким образом, использование метода БПФ и анализ спектра данных являются эффективным инструментом в исследовании и анализе статистических данных. Однако, необходимо учитывать возможность потери информации и выбирать методы обработки данных в зависимости от задачи и характеристик исходных данных.

Для определения гармонических составляющих, вносящих наибольший вклад в общую дисперсию исследуемых данных, в научных исследованиях часто необходимо выявлять частоты, на которых отмечаются пики периодограммы. Но при использовании современных статистических программ и методов анализа данных, следует учитывать потенциальные ограничения и потери информации, чтобы получить наиболее точное представление о характеристиках исследуемых данных.

Кроме того, при обработке данных может возникнуть потребность восстановить исходный процесс по нескольким значимым гармоникам. Для этого необходимо произвести дополнительные расчеты и анализы, чтобы получить полную картину исследуемых данных.

Важно отметить, что выбор методов анализа данных должен быть обоснован и основан на характеристиках исследуемых данных. Неправильный выбор методов может привести к искажению результатов и потере ценной информации. Поэтому, при работе с данными, необходимо проявлять осторожность и внимательность, чтобы не допустить ошибок и получить максимально точный результат.

Проведение гармонического анализа на основе периодограммы может быть необходимо во многих случаях. Однако, чтобы получить точный восстановленный ряд, необходимо правильно выбрать значимые гармоники и иметь качественные исходные данные.

Первый шаг в проведении гармонического анализа - определение периодов для пиков спектра, а затем рассчитываются характеристики гармоник и формулируются уравнения для них. Следующий шаг - расчёт рядов гармоник и их сложение, чтобы получить восстановленный ряд.

Однако, важно учитывать, что при проведении гармонического анализа необходимо учесть влияние различных факторов на результаты исследования. Например, шумы в данных или нелинейность процесса могут оказать существенное влияние на точность восстановленного ряда.

Таким образом, гармонический анализ является мощным инструментом в анализе временных рядов, но требует аккуратности и внимательности при проведении, чтобы получить правильные и точные результаты.

Гармонический анализ — это один из наиболее востребованных методов для анализа спектра сигнала, который используется в различных областях, начиная от физики и заканчивая медициной. Он позволяет исследовать различные

характеристики сигнала, такие как частоту, амплитуду и фазу, а также определять компоненты сигнала, которые могут быть скрыты от обычного анализа.

Кроме того, благодаря прорыву в компьютерных технологиях, гармонический анализ стал более точным и быстрым, что значительно повысило его эффективность и позволило сократить время исследования. Благодаря этому, сейчас проведение гармонического анализа доступно для широкого спектра специалистов, и это привело к еще более широкому применению метода в различных сферах науки и техники.

Важно отметить, что гармонический анализ имеет множество применений в музыке, где его используют для анализа звуковых волн и создания музыкальных композиций. Он также широко применяется в медицине, где его используют для анализа электроэнцефалограмм и электрокардиограмм, что позволяет врачам быстро и точно определять наличие отклонений в работе органов.

В целом, гармонический анализ — это мощный инструмент для анализа спектра сигнала, который находит широкое применение в различных областях. С развитием компьютерных технологий, его возможности стали еще более широкими, что позволяет ускорить процесс исследования и повысить его эффективность.



### 3 МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТОЛЩИНЫ ПРИПАЯ В МОРЯХ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ ПО ДАННЫМ ПОЛЯРНЫХ СТАНЦИЙ

В последние 15 лет в среднем отмечается повышение температуры во всех морях восточной Арктики на  $2,6^{\circ}\text{C}$ .

Наибольшие изменения  $3,7-6,4^{\circ}\text{C}$ , наблюдаются в осенние месяцы (октябре-декабрь). На фоне положительного тренда температуры толщина льда в морях восточной Арктики уменьшается.

Начиная с 2005 года и до 2020 года произошли значительные изменения на станциях морей. Особенно выделяются изменения произошли на станции Челюскин в море Лаптевых, где уровень моря снизился на 21 см. Также, в море Восточно-Сибирском на станции м. Биллингса наблюдалось уменьшение уровня моря на 37 см. В Чукотском море толщина льда приблизилась к среднемноголетним значениям.

Анализ многолетней изменчивости толщины припая на всех станциях показал ее уменьшение на 6-12%. Это свидетельствует о том, что процессы в морских водах не остаются незамеченными и требуют постоянного наблюдения и анализа.

Изучая подекадные значения толщины льда, было выявлено, что на всех станциях процесс нарастания происходит значительно медленнее, чем ранее. Сроки перехода в следующую возрастную градацию сместились на 1-2 декады позднее, чем в предыдущем периоде измерений. Это может говорить о том, что процессы изменения климата влияют на морские воды и их состояние.

Таким образом, необходимо продолжать изучение морских вод и их состояния, а также постоянно анализировать изменения, чтобы прогнозировать возможные последствия и принимать меры для их предотвращения.

В последние годы стало актуальным изучение суровости зимнего периода в различных регионах. Для этого используется показатель СГДМ, который

показывает сумму градусо-дней мороза. Расчеты, проведенные на нескольких метеостанциях, показали, что ни на одной из них не было зимы, которая отвечала бы критериям суровости.

Однако, при сравнении значений по разным регионам, можно заметить разницу. Так, в море Лаптевых последние 15 зим были отнесены к мягким, что снижает уровень опасности для животных и людей в этом регионе. В то же время, в Восточно-Сибирском и Чукотском регионах наблюдались умеренные и мягкие зимы в одинаковом процентном соотношении.

Эти данные могут быть полезными для планирования экспедиций, а также для принятия мер по защите населения и животных от возможных негативных последствий зимних условий.

### 3.1 МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ

Межгодовая изменчивость толщины льда — это феномен, который может сильно варьировать от года к году. Как показывают данные, средние толщины льда на момент максимального нарастания и по станциям в восточной части моря колеблются в пределах 209-221 см. Однако, на станции м. Челюскин средняя толщина немного ниже, составляя 192 см.

Это может быть связано с разными факторами, включая изменения климата и гидрологических условий, таких как температура воды и движение ледовых массивов. На всех станциях наблюдается значительная амплитуда колебаний толщины льда, которая может достигать от 55 до 92 см.

Понимание межгодовой изменчивости толщины льда имеет важное значение для научных исследований и понимания глобальных климатических трендов. Кроме того, это может иметь практическое значение для различных отраслей, связанных с морской деятельностью, таких как судоходство, рыболовство и добыча нефти и газа. Поэтому, наблюдение за изменениями толщины льда на протяжении времени является крайне важным.

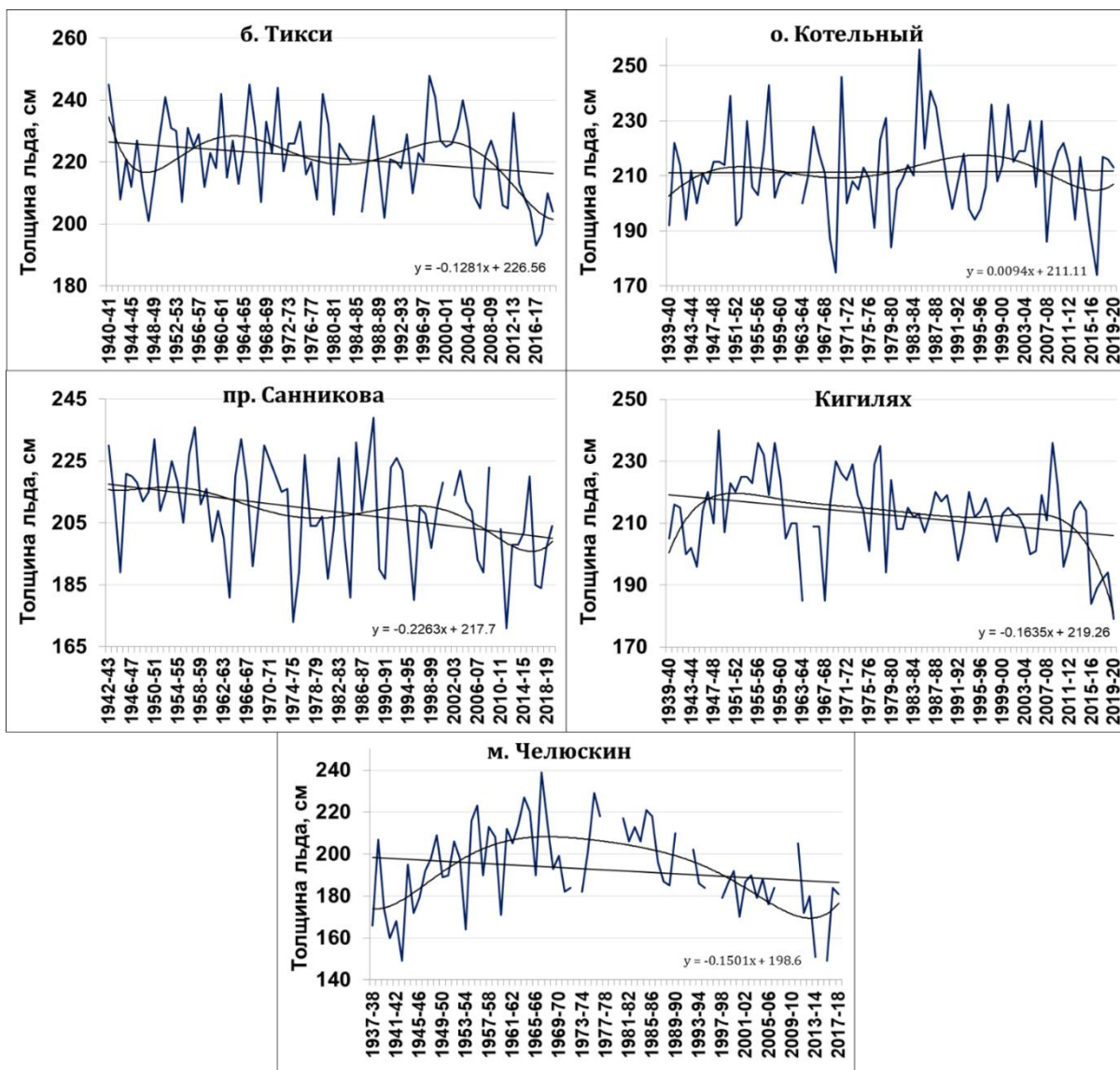


Рис. 9 межгодовая изменчивость толщины льда по данным полярных станция моря Лаптевых

Таблица 2 Общая информация о рядах наблюдений на полярных станциях моря Лаптевых

|   | м. Челюскин<br>(с 1937/1938) | б. Тикси<br>(с 1940/1941) | о. Котельный<br>(с 1939/1940) | пр.Санникова<br>(с 1942/1943) | Кигилях<br>(с 1939/1940) |
|---|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Весь ряд наблюдений                           |                              |                           |                               |                               |                          |
| Среднее, см                                   | 191                          | 220                       | 210                           | 208                           | 212                      |
| Максимум,<br>см                               | 238                          | 247                       | 255                           | 238                           | 239                      |
| Минимум, см                                   | 146                          | 192                       | 173                           | 170                           | 178                      |
| Размах, см                                    | 92                           | 54                        | 81                            | 67                            | 60                       |
| СКО   | 20                           | 11                        | 15                            | 15                            | 12                       |
| Период по сезон 2004/2005                     |                              |                           |                               |                               |                          |
| Среднее, см                                   | 195                          | 223                       | 211                           | 210                           | 213                      |
| Максимум,<br>см                               | 237                          | 247                       | 255                           | 238                           | 239                      |
| Минимум, см                                   | 149                          | 200                       | 173                           | 172                           | 184                      |
| Размах, см                                    | 39                           | 46                        | 81                            | 65                            | 54                       |
| СКО   | 18                           | 10                        | 15                            | 15                            | 14                       |
| Период с сезона 2005/2006 по сезон 2020/2021  |                              |                           |                               |                               |                          |
| Среднее, см                                   | 169                          | 210                       | 208                           | 197                           | 203                      |
| Максимум,<br>см                               | 203                          | 235                       | 229                           | 222                           | 235                      |
| Минимум, см                                   | 145                          | 192                       | 173                           | 170                           | 178                      |
| Размах, см                                    | 55                           | 42                        | 55                            | 51                            | 56                       |
| СКО   | 16                           | 10                        | 14                            | 12                            | 10                       |
| Изменение средней толщины за последние 15 лет |                              |                           |                               |                               |                          |
| Разница, см                                   | -20                          | -12                       | -2                            | -13                           | -10                      |

## Сезонное изменение толщины льда в температуры воздуха в море Лаптевых

За последние 15 лет наблюдалось повышение среднемесячной температуры на протяжении годового цикла на  $0,1-5,1^{\circ}\text{C}$  по сравнению со средней за предыдущий период до 2004 года. Осенние месяцы (октябрь, ноябрь) и апрель являются периодами, когда наблюдаются наибольшие изменения температуры на  $3,7-5,1^{\circ}\text{C}$ . С увеличением температуры на  $0,1-2,4^{\circ}\text{C}$  наименьшие изменения происходят с мая по август. В осенне-зимний сезон характерно повышение температуры на  $1,6-3,4^{\circ}\text{C}$ .

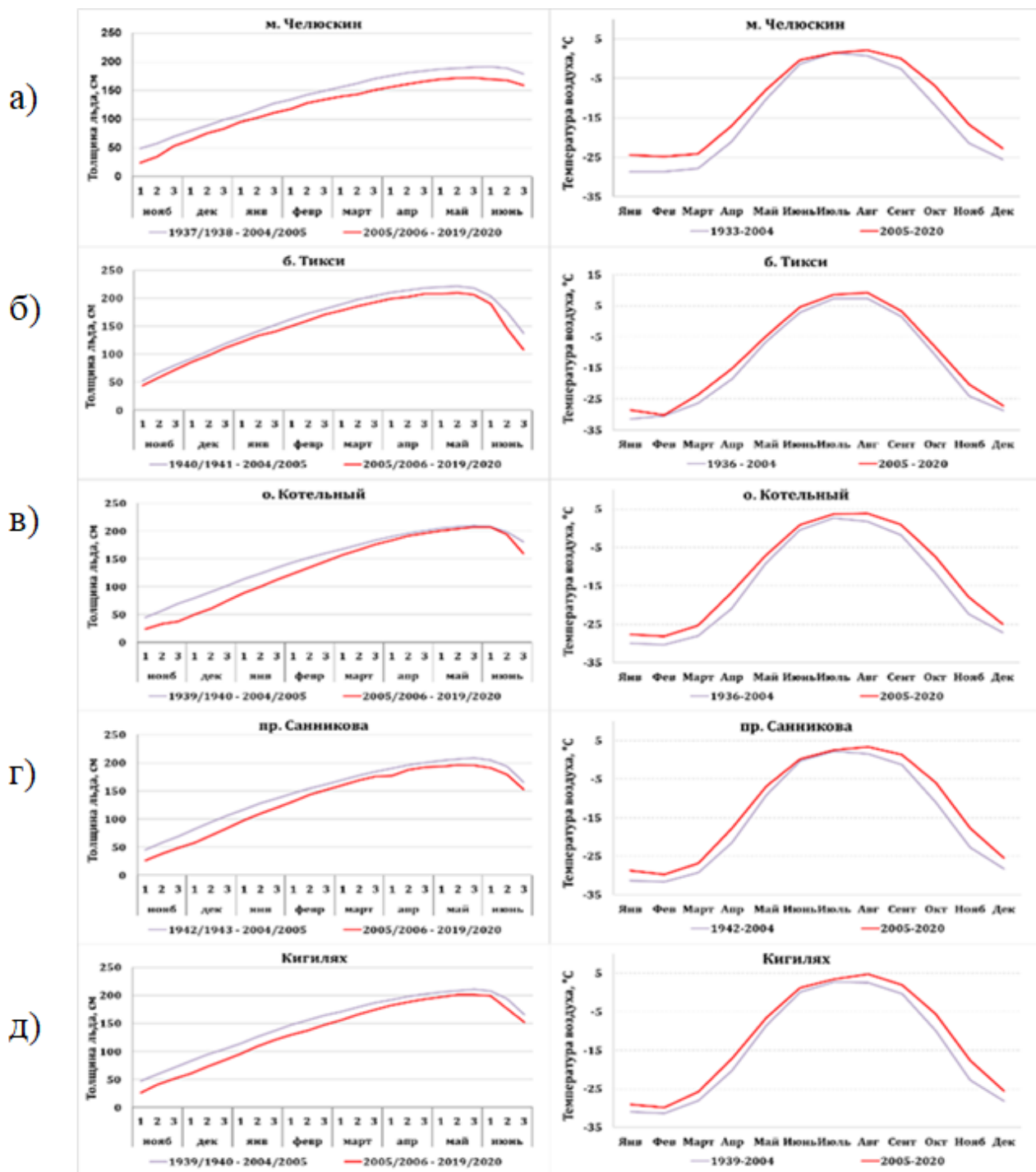


Рис. 10 графики сезонного нарастания толщины льда (подекадно) и годовой ход среднемесячной температуры воздуха: с года начала наблюдений по станциям до 2004 года и за последние 15 лет. а) - м. Челюскин; б) - б. Тикси; в) - о. Котельный; г) - пр. Санникова; д) – Кигилях

На рисунке 10 можно увидеть два графика: сезонное нарастание толщины льда (подекадно) и годовой ход среднемесячной температуры воздуха. Графики

представлены за период с года начала наблюдений по станциям в период с 1930/1940 гг. по 2004/2005 гг. года и за период 2005/2006 – 2019/2020 гг. Из графиков видно, что нарастание толщины льда в последние 15 лет происходит значительно медленнее на всех станциях, за исключением о. Котельный. На этой станции к концу апреля-мая толщина льда приближается к среднемноголетним значениям за последние 15 лет.

Более значительные изменения на большинстве станций наблюдаются в начале периода нарастания и уменьшаются, начиная с января. Станция м. Челюскин показывает наибольшие изменения в течение всего сезона. Например, достижение толщины льда в 100 см на этой станции происходит на 1-2 декады позднее, чем в предыдущем периоде измерений.



### 3.2 МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ

Изучая данные по максимальной толщине льда за весь ряд наблюдений, мы выявили основные статистические характеристики, которые представлены в таблице. Однако, если рассмотреть последний 15-летний период, то можно отметить интересные отличия. Например, средние толщины льда на момент максимального нарастания составляют 170-185 см, а максимальные толщины по морю - 177-219 см.



Рис. 11 Максимальная толщина нарастания льда по данным полярной станции Айон



Рис. 12 Максимальная толщина нарастания льда по данным полярной станции Амбарчик



Рис. 13 Максимальная толщина нарастания льда по данным полярной станции Биллингса



Рис. 14 Максимальная толщина нарастания льда по данным полярной станции Валькаркай



Рис. 15 Максимальная толщина нарастания льда по данным полярной станции Певек



Рис. 16 Максимальная толщина нарастания льда по данным полярной станции Раучуа

Важно отметить, что на всех станциях наблюдения показали неоднородность толщины льда с значительными амплитудами колебаний в пределах 50-70 см. Причины такой неоднородности могут быть различными, например, изменение температуры воды, ветровые условия, а также другие природные факторы.

Дополнительно, стоит отметить, что на многих станциях наблюдения были замечены всплески толщины льда, которые не соответствовали общей тенденции. Это может свидетельствовать о местных факторах, таких как течения и подводные геологические образования, влияющие на формирование толщины льда.

В целом, изучение толщины льда является важным аспектом при изучении климатических изменений и может помочь в прогнозировании будущих изменений в Арктике.

Регулярные наблюдения и анализ данных являются важной задачей для научной и промышленной сферы, потому что изменения толщины льда могут иметь серьезные последствия для морских перевозок и экосистемы. На эту

проблему необходимо обращать внимание, так как она влияет на многие аспекты нашей жизни.

Помимо того, что толщина льда оказывает влияние на морские перевозки и экосистему, она также может повлиять на климат. Это связано с тем, что ледяные покровы отражают солнечное излучение, влияя на количество тепла, которое попадает в атмосферу. Поэтому, мониторинг изменения толщины льда является не только важной задачей, но и одним из ключевых аспектов изучения климата.

Таблица 3 Общая информация о рядах наблюдений на полярных станциях Восточно-Сибирского моря

| Станция  | Амбарчик<br>1938/1939 | Раучуа<br>1941/1942 | Айон<br>1942/1943 | Певек<br>1941/1942 | Валькаркай<br>1935/1936 | Биллингса<br>1935/1936 |
|--|-----------------------|---------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|------------------------|
| Весь ряд наблюдений                                |                       |                     |                   |                    |                         |                        |
| Среднее, см  | 211                   | 185                 | 179               | 153                | 185                     | 169                    |
| Максимум,<br>см                                    | 240                   | 245                 | 216               | 186                | 239                     | 221                    |
| Минимум,<br>см                                     | 178                   | 136                 | 120               | 104                | 103                     | 83                     |
| СКО  | 12                    | 17                  | 16                | 20                 | 26                      | 23                     |
| Период по сезон 2004/2005                          |                       |                     |                   |                    |                         |                        |
| Среднее, см  | 213                   | 185                 | 181               | 158                | 187                     | 175                    |
| Максимум,<br>см                                    | 240                   | 245                 | 216               | 186                | 239                     | 221                    |
| Минимум,<br>см                                     | 178                   | 136                 | 146               | 114                | 129                     | 139                    |
| СКО  | 12                    | 17                  | 13                | 16                 | 22                      | 16                     |
| Период с сезона 2004/2005 по 2020/2021             |                       |                     |                   |                    |                         |                        |
| Среднее, см  | 211                   | 184                 | 168               | 113                | 170                     | 138                    |
| Максимум,<br>см                                    | 240                   | 213                 | 192               | 176                | 218                     | 195                    |
| Минимум,<br>см                                     | 178                   | 156                 | 120               | 104                | 103                     | 84                     |
| СКО  | 12                    | 16                  | 18                | 19                 | 40                      | 30                     |
| Изменение средней толщины (см) за последний период |                       |                     |                   |                    |                         |                        |
|  | -8                    | -1                  | -13               | -25                | -17                     | -36                    |

За последние десятилетия существенно изменились климатические условия, и с этим связано множество проблем, включая изменение толщины льда. На рисунке 17 отчетливо видно, что нарастание толщины льда замедлилось в последние 15 лет на всех станциях. На графиках представлены сезонное нарастание толщины льда и годовой ход среднемесячной температуры воздуха за период с начала наблюдений до 2004 года и за последние 15 лет. Это говорит о том, что достижение определенной толщины льда происходит на 1-2 декады позднее, чем в предыдущие годы.

Однако, не стоит забывать, что медленное нарастание толщины льда не означает, что проблемы с ледниковым покровом решены. Наоборот, это может привести к ускоренному таянию льда в более теплых месяцах года и, как следствие, к повышению уровня мирового океана.

Чтобы более точно понять причины изменения толщины льда, необходимо проводить систематические наблюдения и анализировать полученные данные. Это позволит установить связь между изменением климата и состоянием ледникового покрова и разработать меры, направленные на защиту окружающей среды и сохранение природных ресурсов.

На станциях Амбарчик, Райчуа и Айон в последние 15 лет к концу апреля-мая толщина льда приближается к среднемноголетним значениям. Наибольшие изменения на протяжении всего периода отмечаются на станции Биллингса, Певек и Валькаркай. На момент нарастания в среднем толщина льда меньше на 10-15 см в последний 15-тилетний период.

За последние 15 лет наблюдается тревожная тенденция - среднемесячная температура на планете увеличивается. В сравнении с предыдущим периодом до 2004 года, она выше на 2,5-3 °С. Но это не самое печальное - наибольшие изменения температуры происходят именно в те месяцы, когда природа готовится к долгой зиме. Осенние месяцы октябрь и ноябрь, а также февраль — это периоды,

когда среднемесячная температура возрастает на 3,8-6,2°C. А вот с апреля по август наименьшие изменения - всего на 0,1-2,4°C.

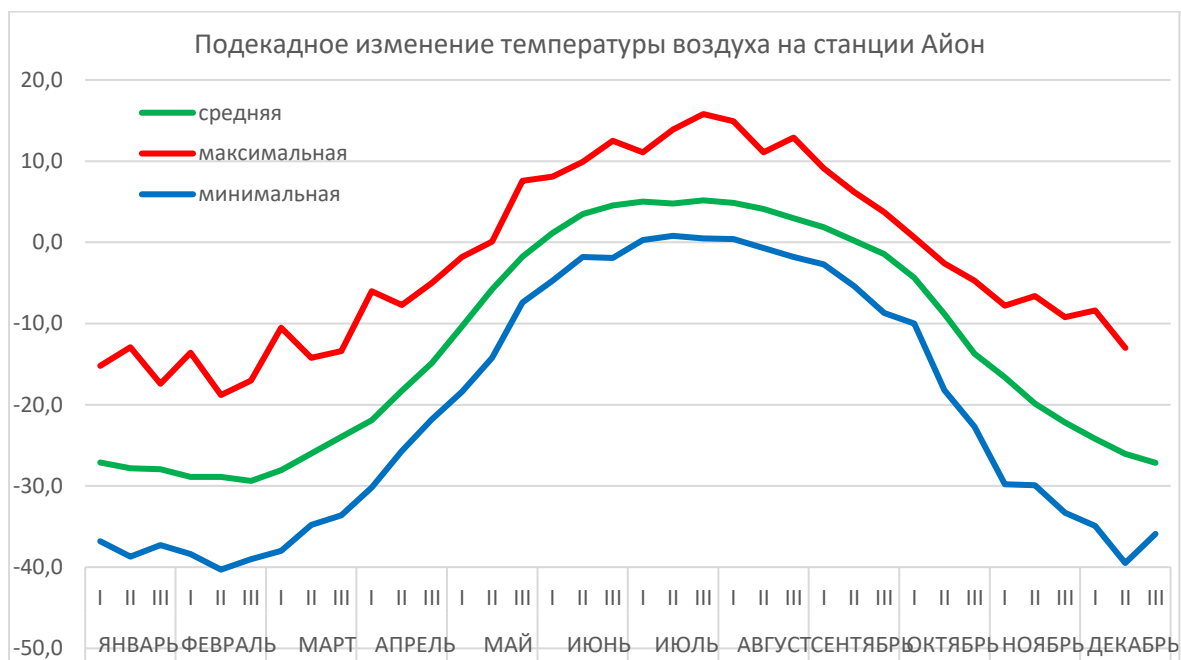


Рис. 17 график сезонного нарастания толщины льда (подекадно) за период с 1941/1942 по 2020/2021 гг. на станции Айон

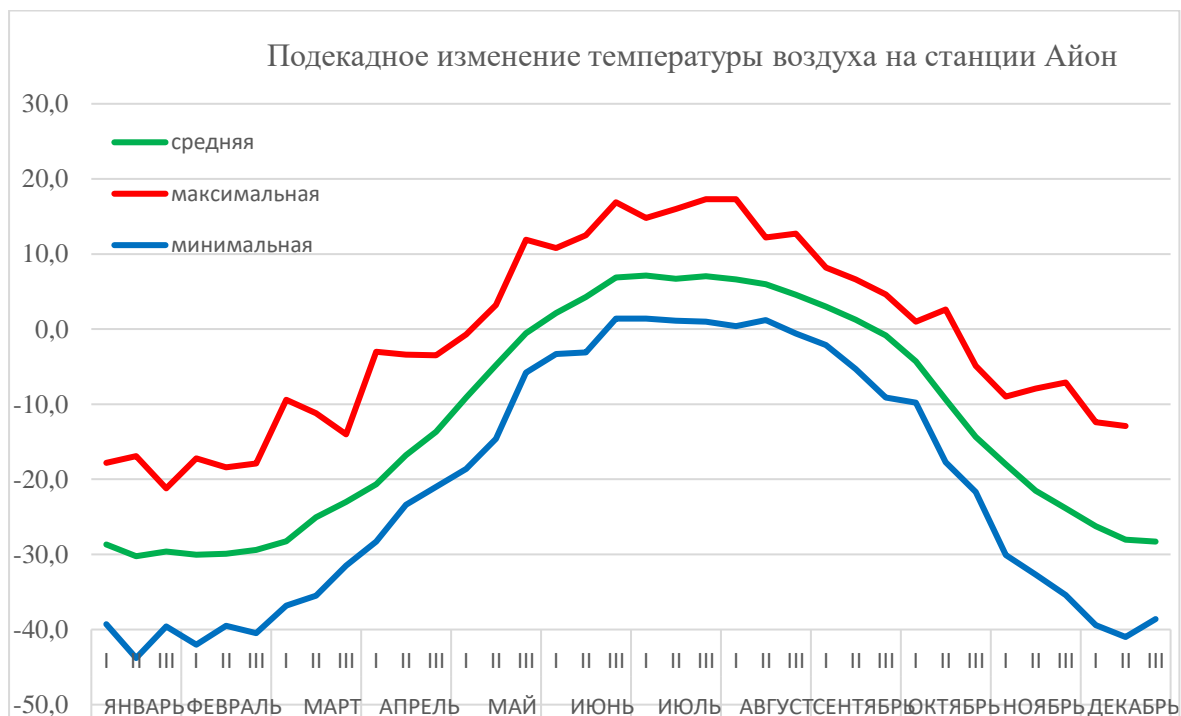


Рис. 18 график сезонного нарастания толщины льда (подекадно) за период с 1941/1942 по 2020/2021 гг. на станции Амбарчик

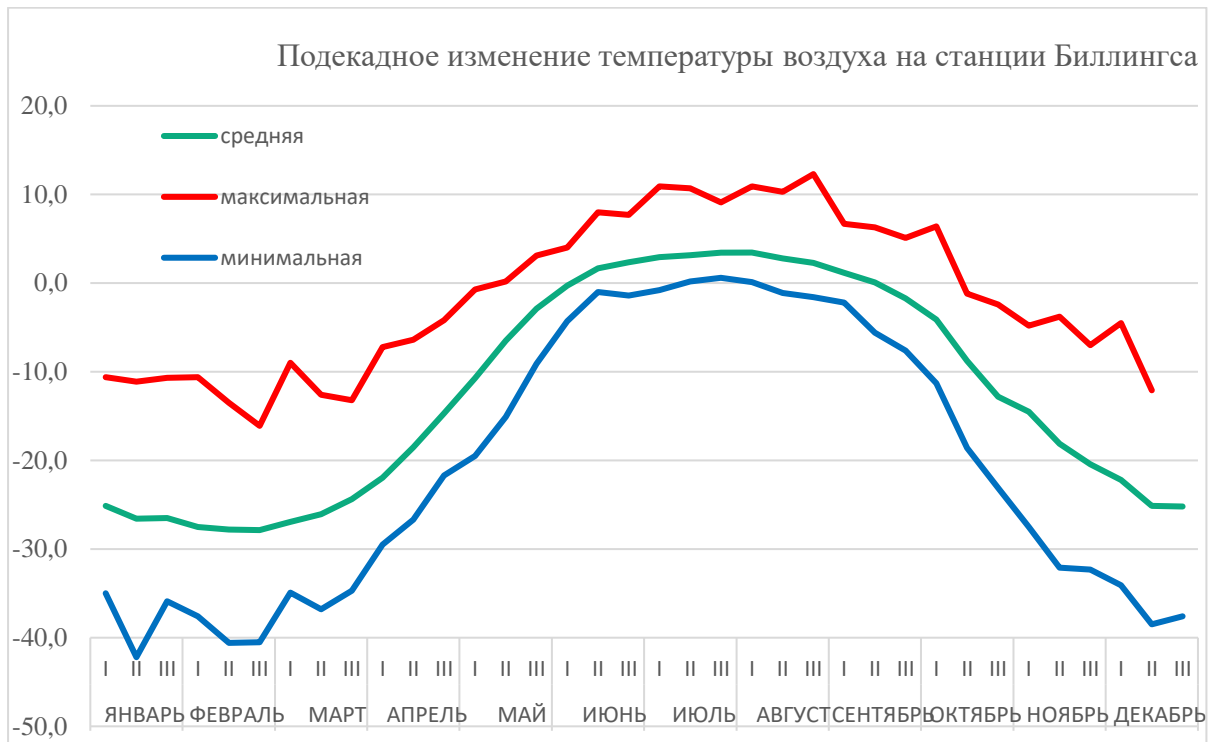


Рис. 19 график сезонного нарастания толщины льда (подекадно) за период с 1941/1942 по 2020/2021 гг. на станции Биллингса

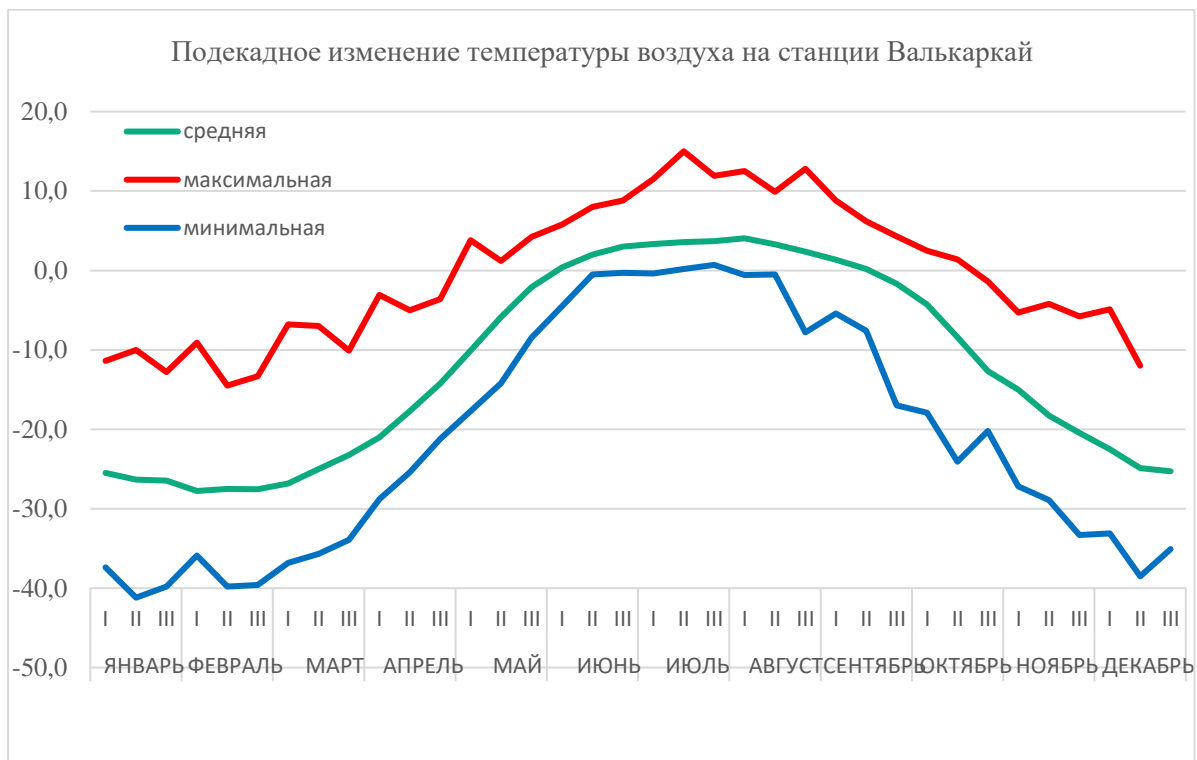


Рис. 20 график сезонного нарастания толщины льда (подекадно) за период с 1941/1942 по 2020/2021 гг. на станции Валькаркай



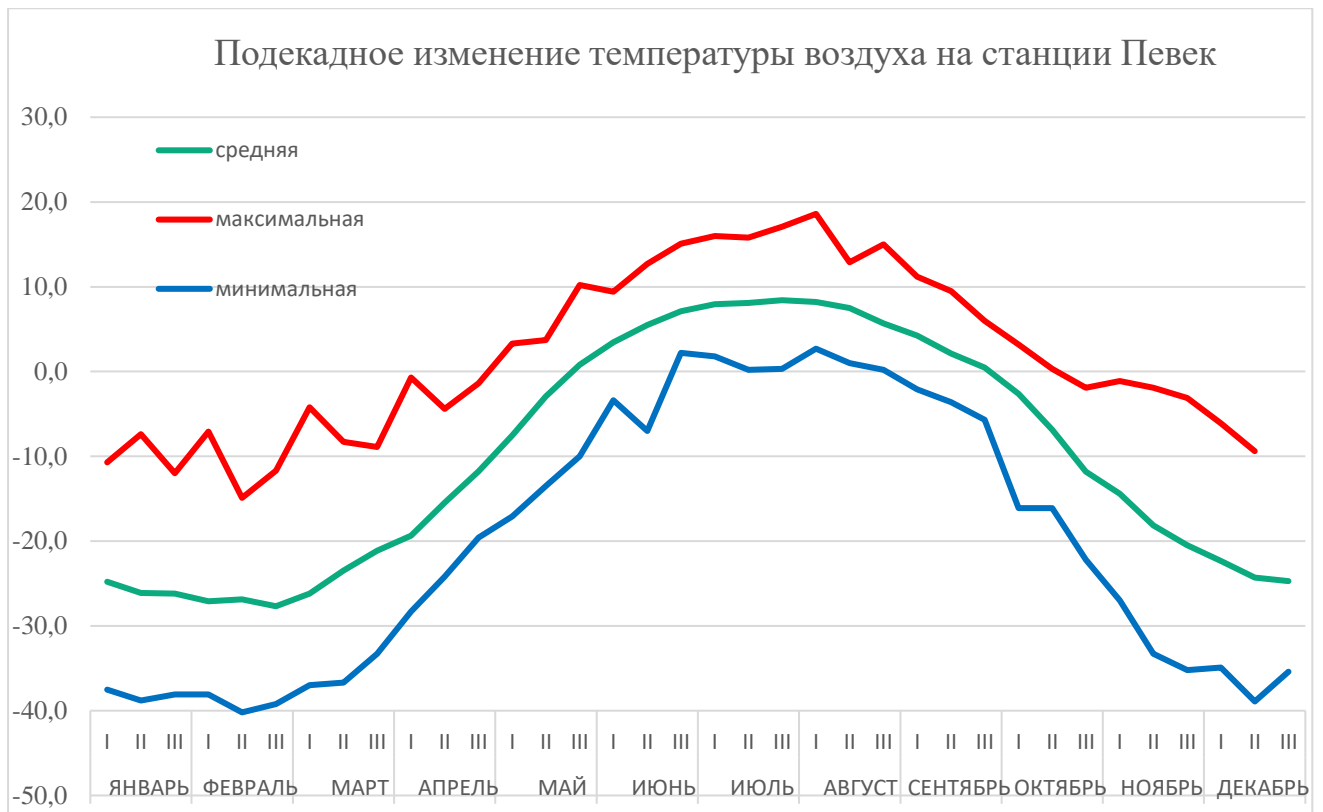


Рис. 21 график сезонного нарастания толщины льда (подекадно) за период с 1941/1942 по 2020/2021 гг. на станции Певек

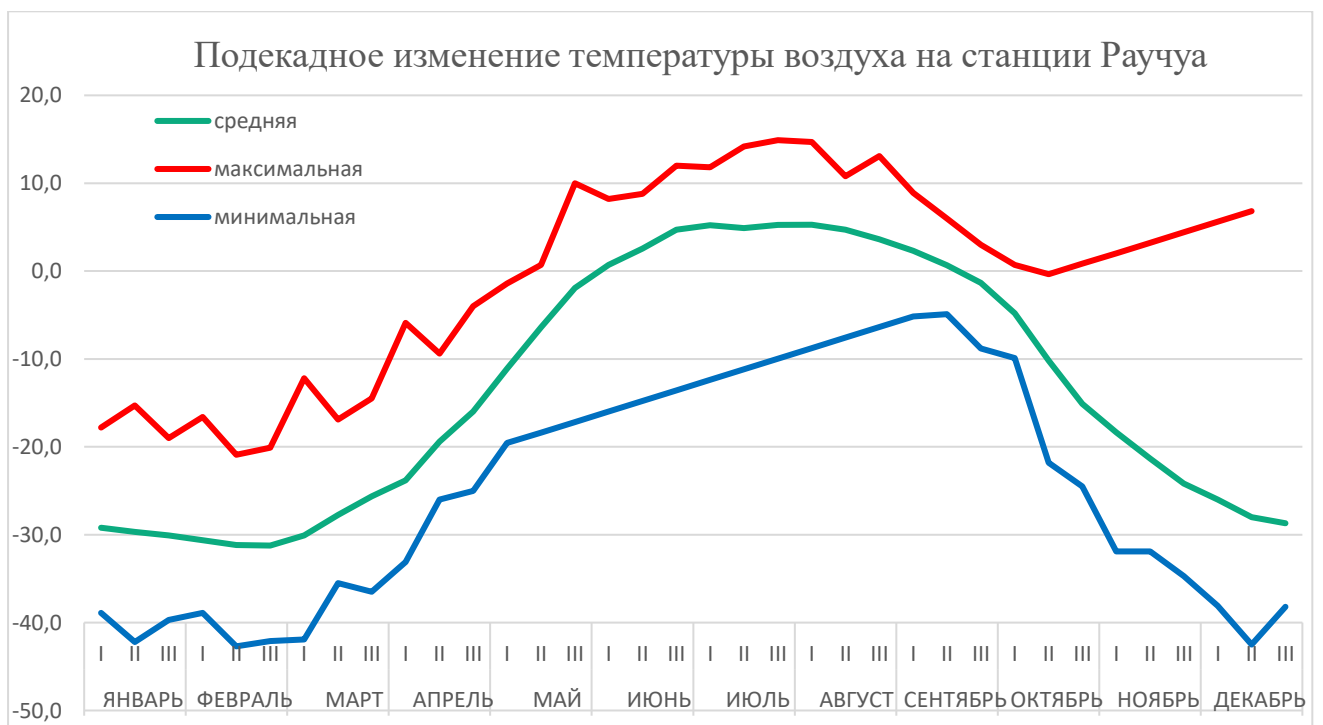


Рис. 22 график сезонного нарастания толщины льда (подекадно) за период с 1941/1942 по 2020/2021 гг. на станции Раучуа

За последние 15 лет произошли существенные изменения в сезонном нарастании толщины льда и годовом ходе среднемесячной температуры воздуха, что отражено на рисунках 17 - 22. На всех станциях нарастание толщины происходит значительно медленнее, чем в предыдущем периоде измерений. Это можно заметить, например, по тому, что достижение толщины 100 см происходит на 1-2 декады позднее, чем раньше. Однако, необходимо учитывать и другие факторы, такие как аномальные погодные условия, изменения в географическом положении станций и другие влияющие факторы. Поэтому, для понимания происходящих изменений, необходимо проводить более детальные исследования, учитывающие все возможные факторы влияния.

На станциях Амбарчик, Райчуа и Айон в последние 15 лет к концу апреля-мая толщина льда приближается к среднемноголетним значениям. Наибольшие изменения на протяжении всего периода отмечаются на станции Биллингса, Певек и Валькаркай. На момент нарастания в среднем толщина льда меньше на 10-15 см в последний 15-тилетний период.

В течение последних 15 лет наблюдается значительное изменение температуры в течение года. Среднемесячная температура на 2,5-3 °С выше средней за предыдущий период до 2004 года. Это явление имеет серьезные последствия для климата и экологии.

Прежде всего, стоит отметить, что наибольшие изменения температуры наблюдаются в осенние месяцы, особенно в октябре и ноябре. В этих месяцах температура может увеличиваться на 3,8-6,2 °С, что является очень значительным изменением. Изменения температуры также наблюдаются в феврале, однако в меньшей степени, чем в осенние месяцы.

С другой стороны, наименьшие изменения температуры наблюдаются в период с апреля по август. Здесь температура может увеличиваться на 0,1-2,4 °С, что является гораздо меньшей величиной, чем в осенние месяцы.

Таким образом, изменение температуры имеет серьезные последствия для климата и экологии. Это может привести к изменению растительного и животного мира, а также к изменению погодных условий и климата в целом. Поэтому важно принимать меры для снижения выбросов парниковых газов и бережного отношения к окружающей среде.

### 3.3 МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА В ЧУКОТСКОМ МОРЕ

Межгодовая изменчивость толщины льда может значительно варьировать от года к году. На м. Ванкарем амплитуда толщины составляет около 60 см. Измерения проводятся регулярно.

Средние толщины на момент максимального нарастания и по 2 –м станциям колеблются в пределах 134-205см.

На м.Уэлен в последние годы измерения льда проводятся не регулярно. Кривая имеет много пропусков. Амплитуда составляет 20- 40 см.

На всех станциях средняя толщина льда составляет 150 см, максимальная 170 см. В период с 2005 г на м. Ванкарем зафиксирована положительная аномалия толщины припая 8 см.

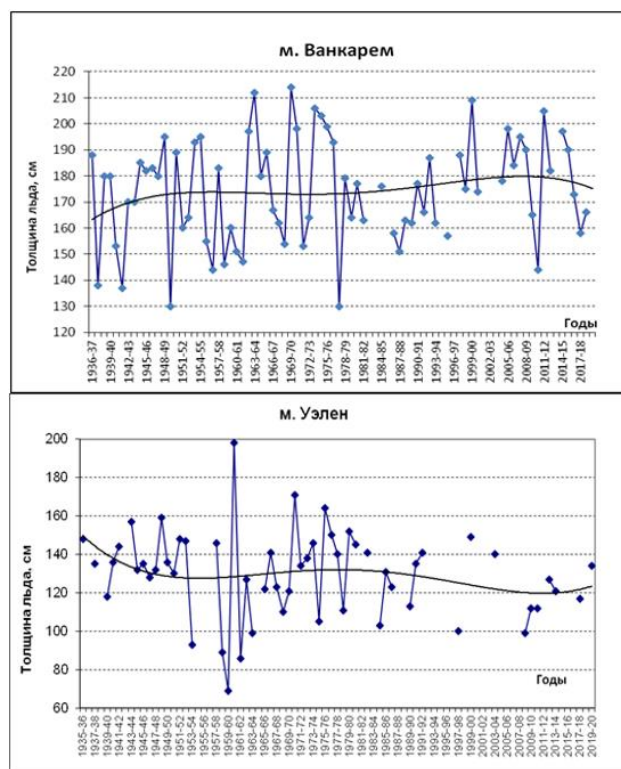


Рис. 23 межгодовая изменчивость толщины льда по данным полярных станция Чукотского моря

Таблица 4 Общая информация о рядах наблюдений на полярных станциях Чукотского моря

| Станция  | Ванкарем<br>1936/1937 | Уэлен<br>1936/1937 |
|--|-----------------------|--------------------|
| Весь ряд наблюдений                                |                       |                    |
| Среднее, см  | 173                   | 129                |
| Максимум, см                                       | 213                   | 197                |
| Минимум, см  | 129                   | 68                 |
| СКО  | 19                    | 21                 |
| Период с сезона 2004/2005 по 2020/2021             |                       |                    |
| Среднее, см  | 172                   | 130                |
| Максимум, см                                       | 213                   | 197                |
| Минимум, см  | 129                   | 68                 |
| СКО  | 19                    | 22                 |
| Период по сезон 2004/2005                          |                       |                    |
| Среднее, см  | 180                   | 116                |
| Максимум, см                                       | 204                   | 133                |
| Минимум, см  | 143                   | 97                 |
| СКО  | 17                    | 10                 |
| Изменение средней толщины (см) за последний период |                       |                    |
|  | 8                     | -14                |

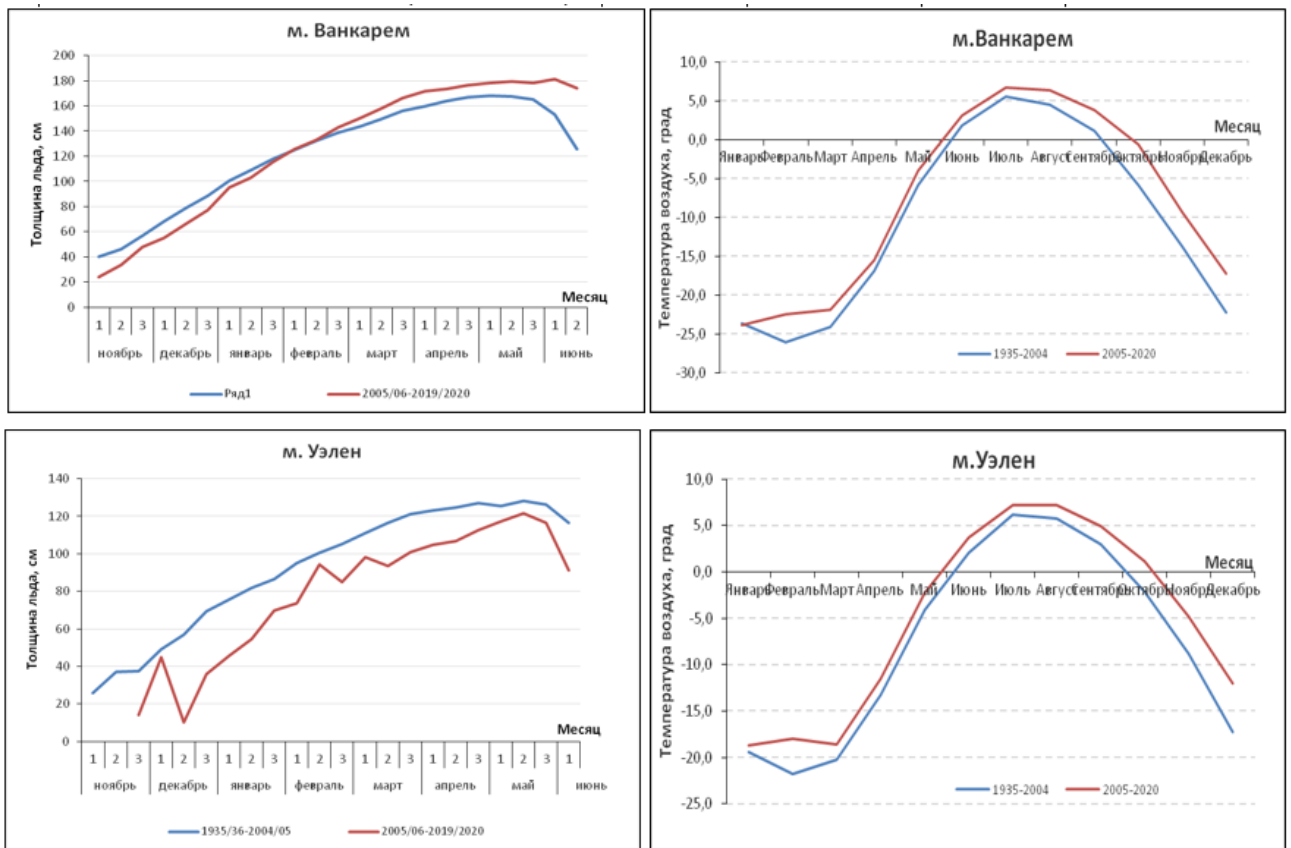


Рис. 24 графики сезонного нарастания толщины льда (подекадно) и годовой ход среднемесячной температуры воздуха: с года начала наблюдений по станциям до 2004 года и за последние 15 лет

### 3.4 СУММА ГРАДУСО-ДНЕЙ МОРОЗА

В последние годы все больше людей обращают внимание на погоду и стараются предсказать, насколько суровым будет зимний период. Одним из показателей, который помогает в этом, является СГДМ (сумма градусо-дней мороза). Этот показатель используется для определения того, сколько времени температура воздуха ниже нуля градусов Цельсия.

В одной из работ [3], посвященной данной теме, были разработаны критерии, которые позволяют определить, насколько зима может быть мягкой, умеренной или суровой на основе значения СГДМ до 2015 года. При этом самые холодные и самые теплые зимы были исключены из расчета, так как они наименее характерны для данного региона.

Зимы, соответствующие умеренной суровости, обладают СГДМ в диапазоне от значения "среднее плюс 20 % амплитуды" до значения "среднее минус 20 % амплитуды". Однако, следует помнить, что данная методика не является абсолютной и может иметь свои ограничения. Например, она не учитывает изменение климатических условий и возможные экстремальные погодные явления, которые могут влиять на характер зимы.

Тем не менее, знание показателя СГДМ может быть полезным при планировании графика работ на зимний период, выборе теплового оборудования и принятии решений о мерах по сохранению тепла в жилых и промышленных помещениях.

Благодаря постоянным изменениям в климате, мы приняли решение повторить расчет по методике, учитывая данные до 2020 года. Этот подход позволил продлить наблюдения за температурой и получить более точные данные. Теперь мы можем более объективно оценить суровость зимних периодов. Использование критериев суровости зим на основе СГДМ является важным инструментом для прогнозирования погодных условий и принятия

соответствующих мер для их предотвращения. Эти критерии помогают нам понимать, какие условия могут быть в следующем году и как мы можем подготовиться к ним заранее.

Точность данных и объективность оценки суровости зимних периодов являются ключевыми элементами в принятии решений в области градостроительства, дорожного строительства, ландшафтного дизайна и других отраслях. Использование критериев суровости зим на основе СГДМ помогает спланировать необходимые меры для предотвращения негативного влияния суровых зим на нашу жизнь и экономику. Кроме того, этот инструмент помогает улучшить качество жизни людей, уменьшить возможные потери и повысить эффективность работы государственных структур.

Таким образом, использование критериев суровости зим на основе СГДМ является необходимым элементом в прогнозировании погодных условий и принятии соответствующих мер для их предотвращения

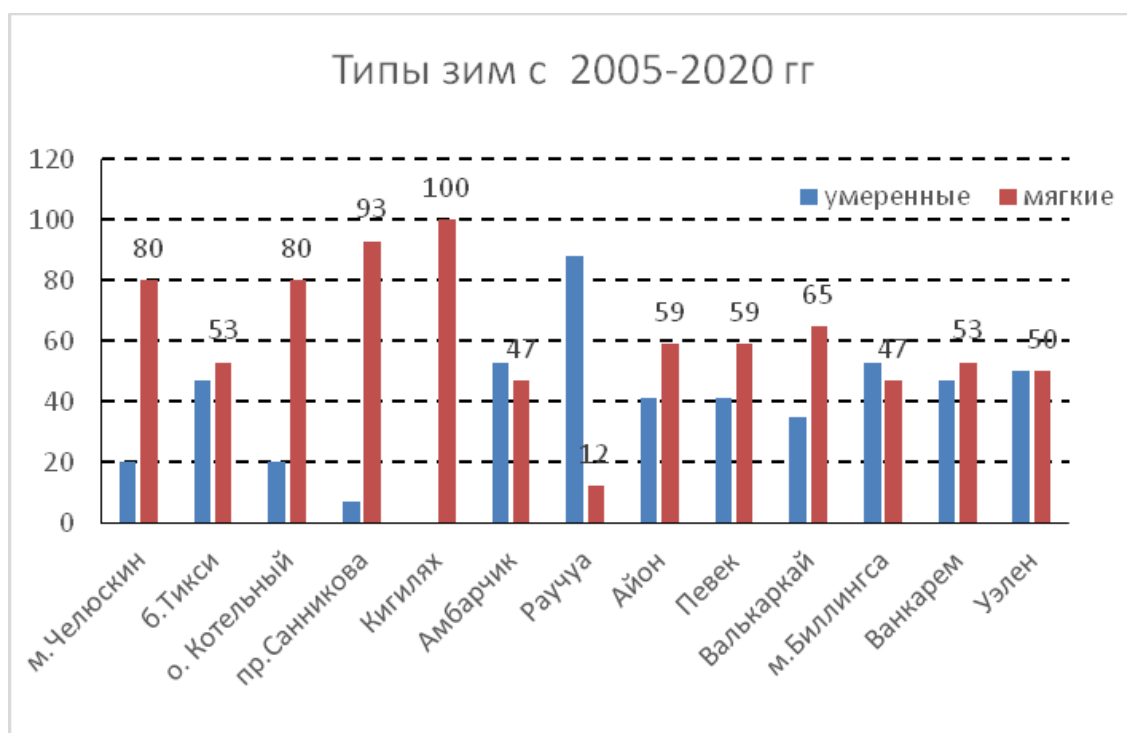


Рис. 25 Типы зим по суровости по данным полярных станций



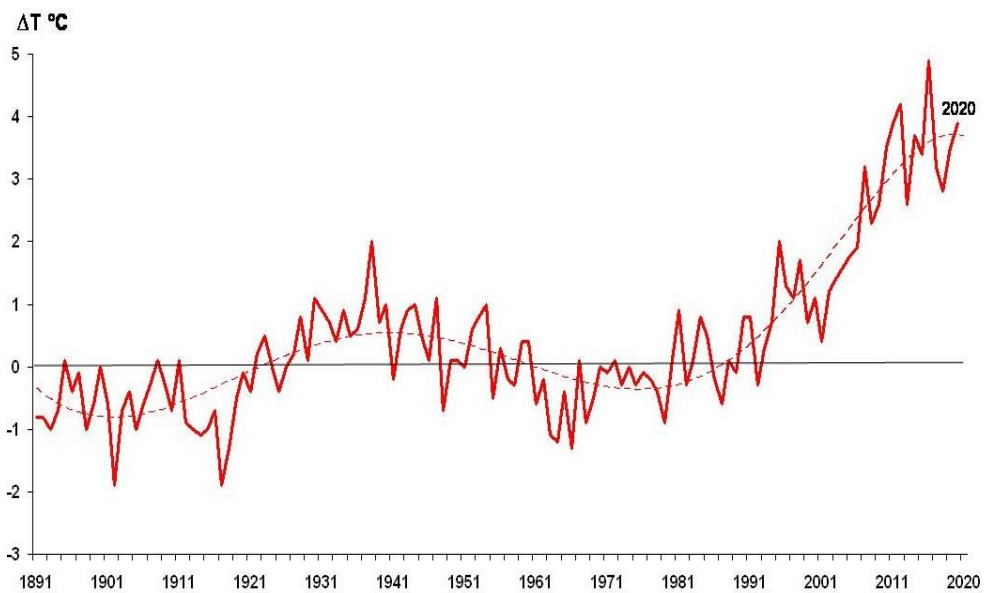


Рис. 26 Межгодовая изменчивость аномалии осредненной температуры воздуха в широтной зоне 70-85 с.ш.

### 3.5 ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Для исследования основных закономерностей в формировании режимных характеристик припая в Восточно-Сибирском море в зимний период и выявления причин межгодовых и многолетних изменений статистических характеристик и показателей, использовались данные, подготавливаемые в ЦЛГМИ ФГБУ «ААНИИ». Компиляция данных с искусственных спутников Земли, информации с полярных станций и судовых ледовых наблюдений была использована в качестве основы. Припайные льды являются важным элементом ледового режима Восточно-Сибирского моря в зимний период, поэтому целью работы является описание их основных закономерностей. [24]

В период с 1940 по 2020 год была проведена работа по обобщению наблюдений за изменениями толщины льда на полярных станциях, ширины на опорных створах и площади припая Восточно-Сибирского моря. В результате анализа были получены следующие данные:

- На всех полярных станциях происходит медленный процесс нарастания льда в последние годы, при этом сроки перехода в следующую возрастную градацию увеличились на 1-2 декады. Тенденция к уменьшению толщины льда в среднем на 10% также наблюдается.

- Анализ ширины припая на момент его максимального развития за период 2010-2021 годов выявил годы с минимально развитым припаем (2011, 2017, 2020) и с максимальным (2010, 2018, 2021).

- Тенденция к сокращению площади припая прослеживается в западной и восточной частях Восточно-Сибирского моря.

В западной части уменьшение площади происходит в марте в среднем на 24 тыс. км<sup>2</sup>, в октябре на среднем на 4 тыс. км<sup>2</sup>.

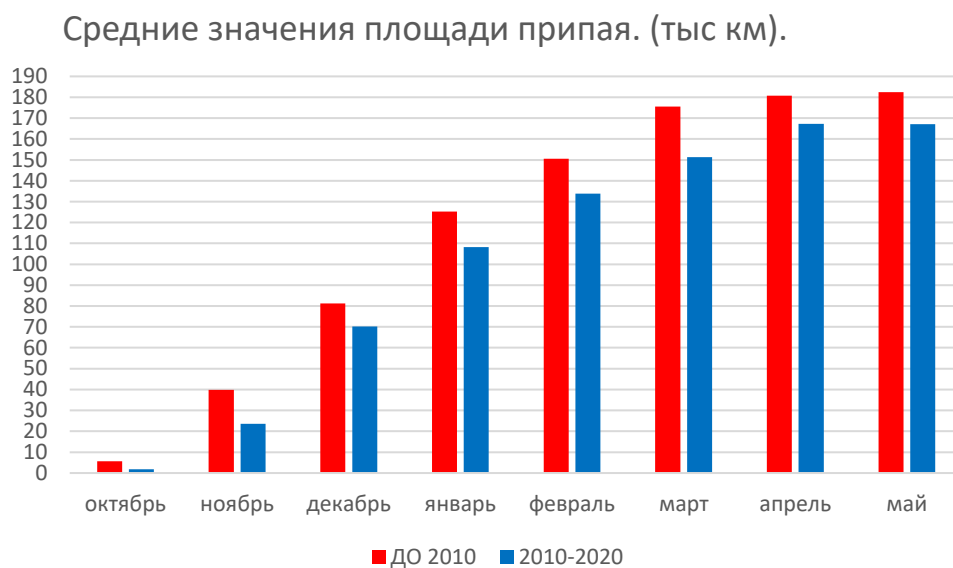


Рис. 27 Среднемесячные значения площади припая

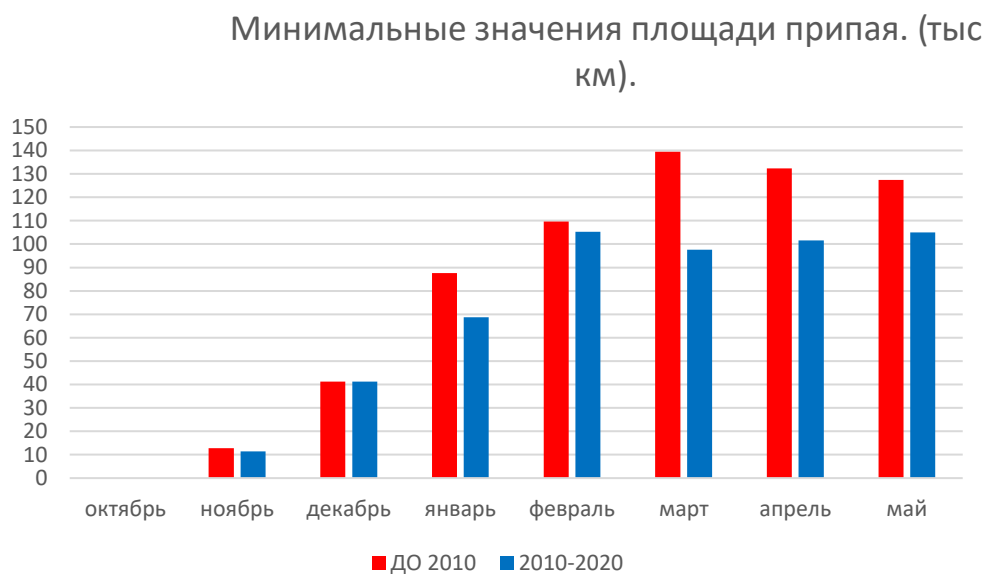


Рис. 28 Минимальные значения площади припая

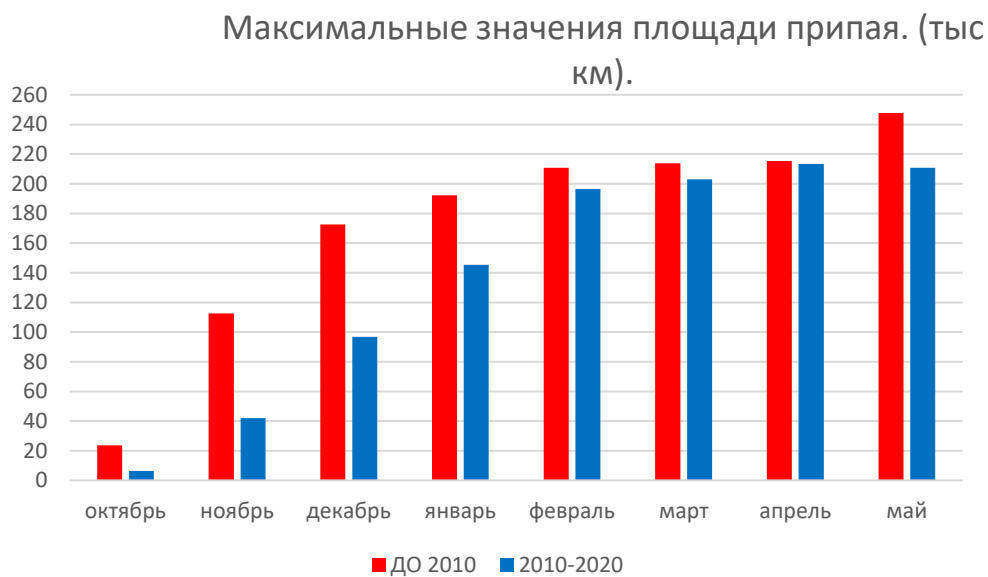


Рис. 29 Максимальные значения площади припая

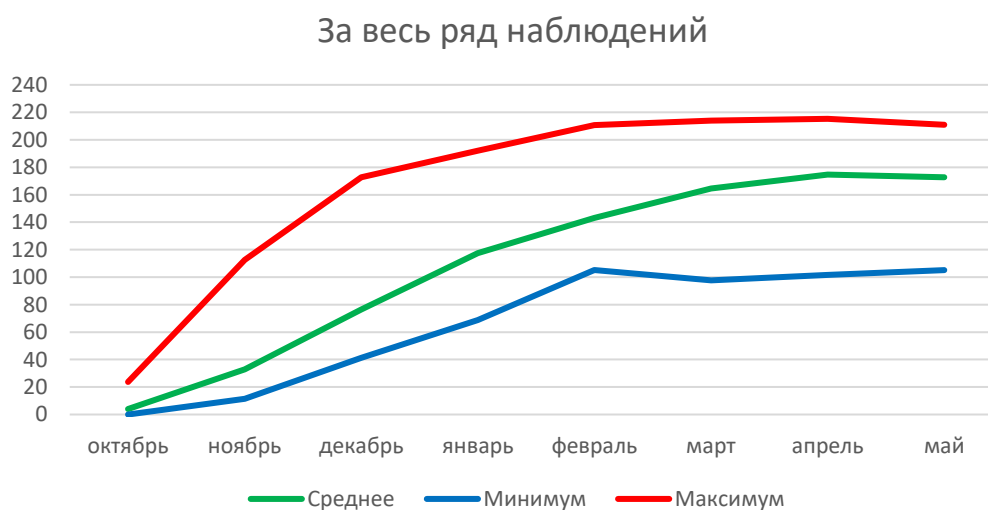


Рис. 30 Среднее, минимальные, максимальные значения площади припая за весь ряд наблюдений

В восточной части моря произошли меньшие изменения. Наибольшее значение уменьшения площади припая приходится на январь (около 10 тыс. км<sup>2</sup>), наименьшее – в октябре (около 1 тыс. км<sup>2</sup>).

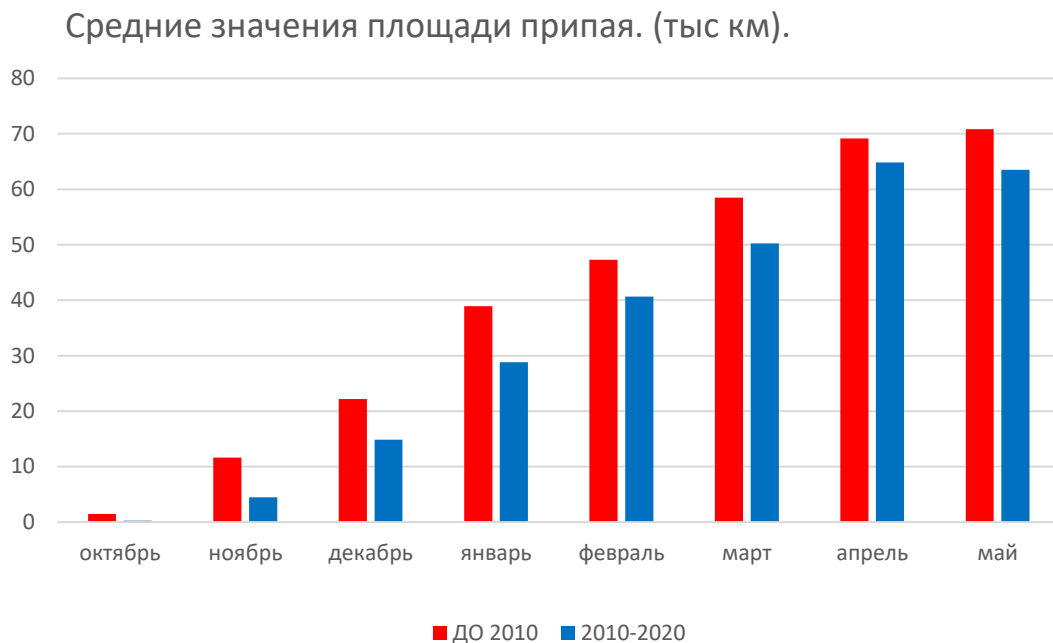


Рис. 31 Средние значения площади припая

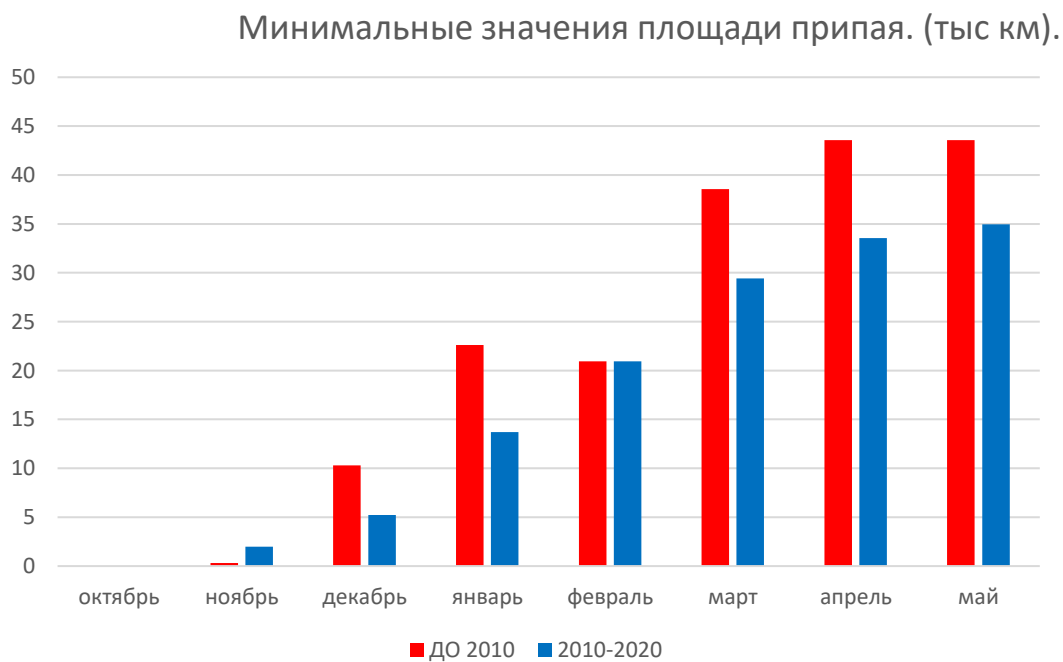


Рис. 32 Минимальные значения площади припая

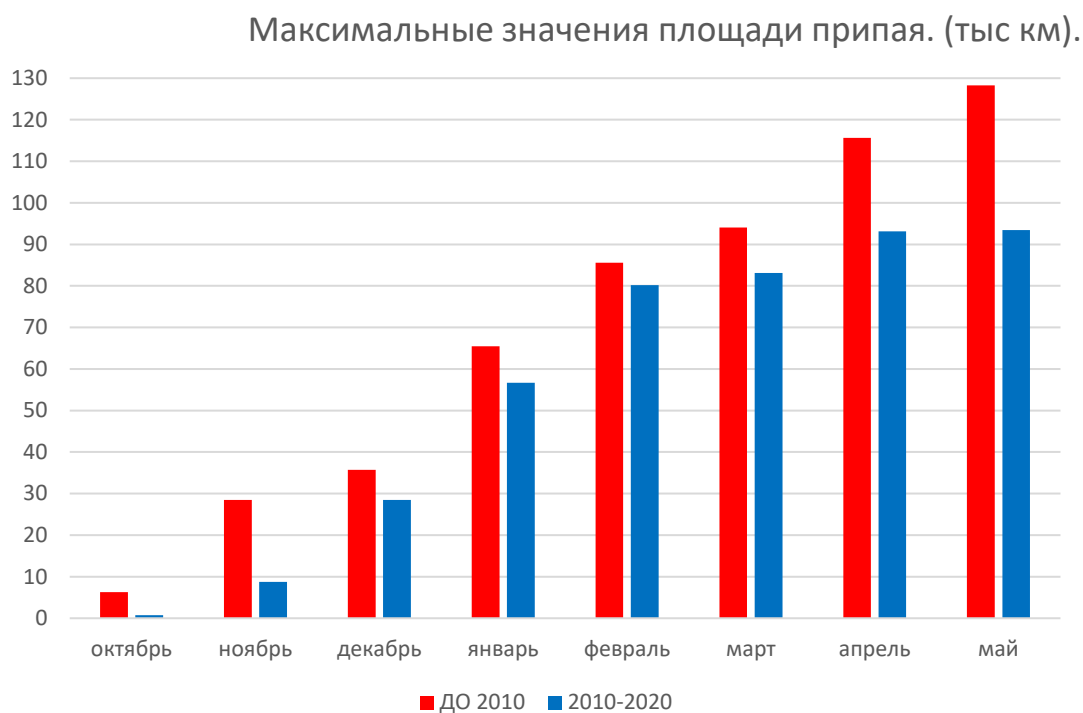


Рис. 33 Максимальные значения площади припая

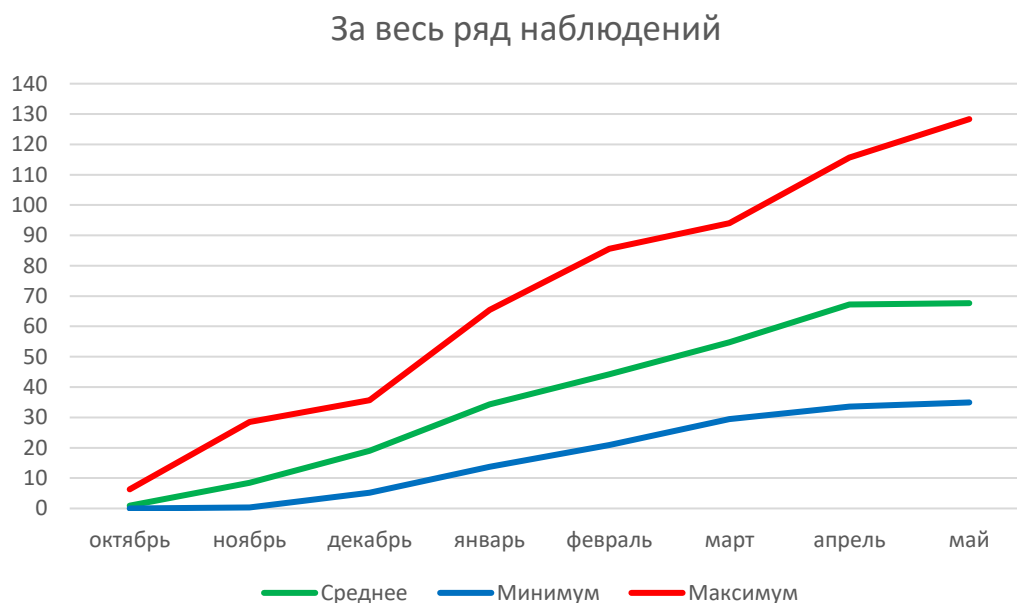


Рис. 34 Среднее, минимальные, максимальные значения площади припая за весь ряд наблюдений

Восточно-Сибирское море в зимний период подвержено разрушению припая, вызванному специфическими гидрометеорологическими условиями в этом районе. Из года в год этот процесс остается неизменным, и уже разработаны

схемы разрушения припая в арктических морях. Однако, в последние 10 лет были замечены изменения. Средние сроки разрушения припая сместились на более ранние даты, а размах сроков окончательного взлома припая уменьшился до одного месяца.

Эти изменения могут быть связаны с климатическими изменениями, происходящими в регионе. Появление более теплых зим и изменение направления ветра могут сказаться на формировании льда и вызвать более раннее разрушение припая. Также, влияние теплых течений и распространение глобального потепления могут иметь свои последствия на этот процесс.

Однако, необходимо провести более детальные исследования, чтобы точно определить причины этих изменений. Может быть, это явление является частью естественных колебаний климата, но также может быть связано с антропогенными воздействиями на окружающую среду. В любом случае, эти изменения могут иметь значительное влияние на экосистему Восточно-Сибирского моря и требуют дальнейшего изучения.

В зимний период Восточно-Сибирское море подвержено изменениям в толщине, площади и ширине припая. Статистический анализ этих изменений позволяет отражать текущий климатический период и устанавливать связь между процессами разрушения припая и изменением климата.

Тем не менее, важно отметить, что разрушение припая может оказать серьезное влияние на экосистему моря. Особенно это касается морских млекопитающих, которые используют припай как путь для передвижения. В связи с этим, исследования в этой области и мониторинг состояния морской природы невероятно важны.

Такие исследования могут помочь предотвратить возможные последствия для миграции животных и сохранить природу моря в неповрежденном состоянии. Полученные результаты анализа толщины, площади и ширины припая в зимний

период Восточно-Сибирского моря позволяют более детально изучить процессы изменения климата и их влияние на морскую природу.

Рассмотрение ледовых условий в конце зимнего периода играет важную роль в прогнозировании будущих изменений. Одним из ключевых факторов, учитываемых при оценке ледовых условий, является максимальная толщина льда. Максимальные толщины льда наблюдаются в середине-конце мая на большинстве станций [4].

Для получения более точной картины, необходимо рассчитать основные статистические характеристики по толщине льда за разные периоды. Это было сделано в таблицах 5 и 6.

Однако, стоит отметить, что наиболее существенные изменения по толщине льда произошли на станции Челюскин (-21 см) в море Лаптевых и на станции м. Биллингса (-37см) в Восточно-Сибирском море за период с 2005 по 2020 годы.

Интересно, что в Чукотском море толщины льда близки к среднемноголетним значениям. Таким образом, изучение изменения толщины льда на разных станциях может дать более полное представление о ледовых условиях в регионе.

В регионах, связанных с ледовым покровом, происходят изменения, которые могут повлиять на экосистемы и климат. Анализ многолетней изменчивости толщины припая на всех станциях морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского показал уменьшение толщины на 6-12%. Это важно учитывать при изучении данных об этих регионах и принятии мер по их защите.

Уменьшение толщины припая может быть связано с различными факторами, такими как изменение температуры воды и воздуха, атмосферных условий, а также изменениями в океанской циркуляции. Эти изменения в свою очередь могут повлиять на миграцию животных, рыболовство и другие виды деятельности, связанные с этими регионами.



Важно отметить, что ледовый покров выполняет важную функцию в регулировании климата, а также обеспечивает жизненное пространство для многих видов животных. Поэтому, уменьшение толщины припая может привести к значительным последствиям для этих регионов и их экосистем.

В связи с этим, необходимо проведение более детального исследования и мониторинга изменений в этих регионах, а также принятие мер для снижения воздействия антропогенных факторов на эти регионы и их экосистемы.

### 3.6 МЕЖГОДОВАЯ И СЕЗОННАЯ ЦИКЛИЧНОСТЬ ПЛОЩАДИ ПРИПАЯ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ.

Цикличность представляет собой сезонные колебания в имеющемся ряду наблюдений. Главная цель была – разложить длинный временной ряд с сезонными колебаниями на несколько функций с определенной длиной волны. В исследуемом атмосферном процессе только циклические составляющие, поэтому было принято решение воспользоваться спектральным или гармоническим анализом, не рассчитывая предварительно автокорреляционную функцию (АКФ).

Важно отметить, что на рисунке 35 периодограммы ряда более высокие амплитуды представлены в виде «пиков». Это позволяет более наглядно представить распределение частотных характеристик, а так как были взяты ежегодные наблюдения – были сделаны выводы о наличии многолетних циклов

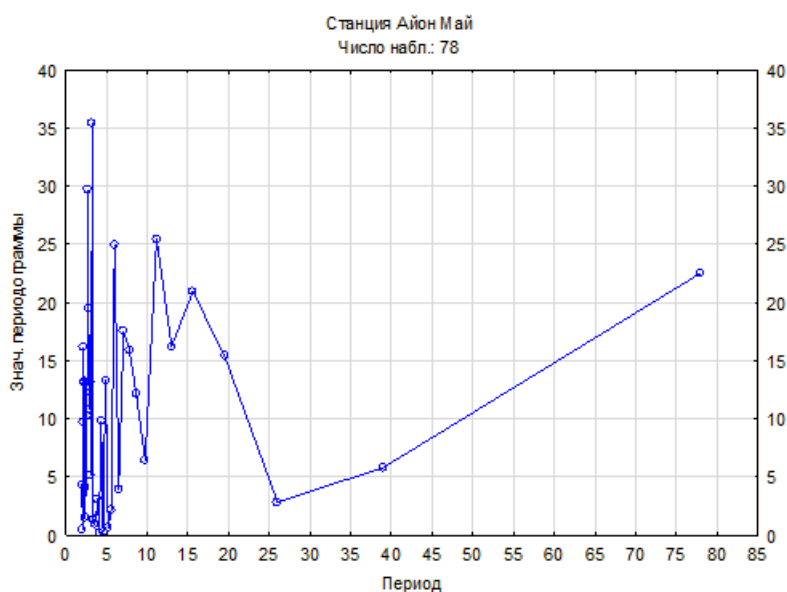


Рис. 35 Циклы температур на станции Айон в период максимального нарастания

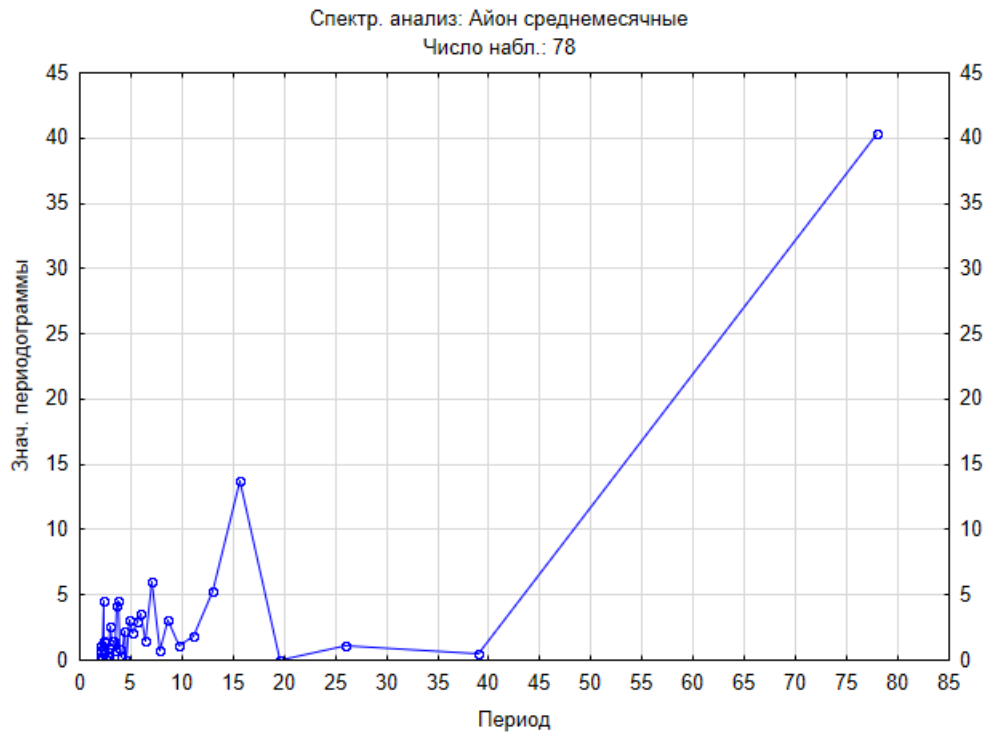


Рис. 36 Среднемесячные циклы температур на станции Айон

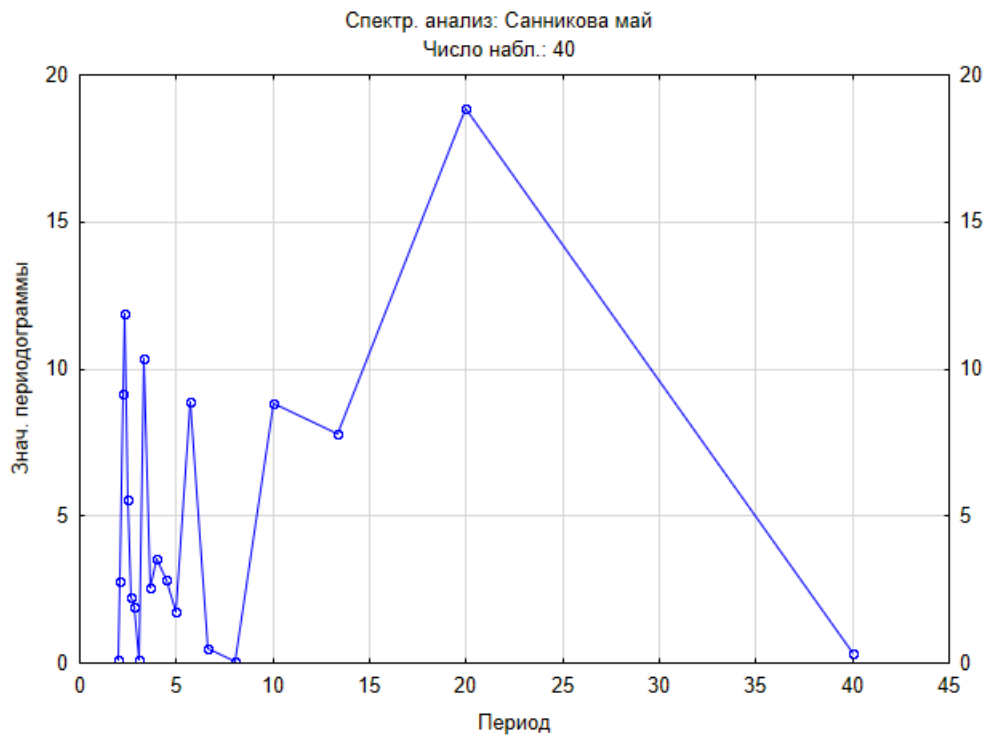


Рис. 37 Циклы температур на станции Санникова в период максимального нарастания

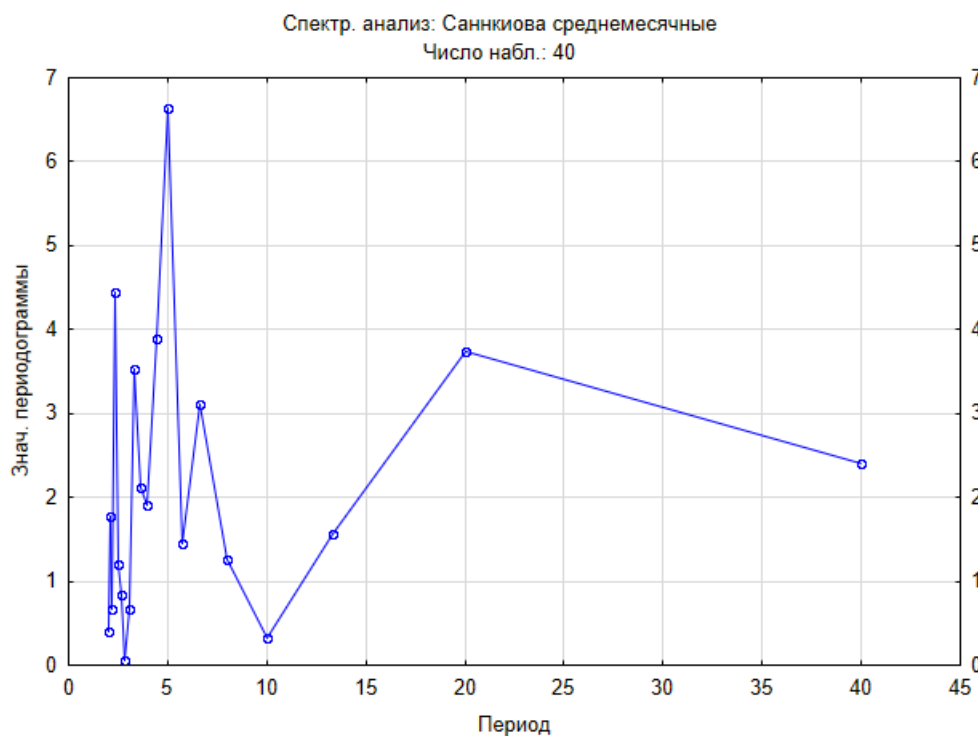


Рис. 38 Среднемесячные циклы температур на станции Санникова

В результате спектрального анализа были выделены и проверены на значимость гармоники временных рядов площади припая и температуры воздуха для двух полярных станций пр. Санникова и Айон. Для станции Айон были выделены основные циклы температур: 2, 5, 7, и 13 лет.

Таблица 5 повторяемости нарастания площади припая

| АЙОН ТЕМПЕРАТУРЫ |                |
|------------------|----------------|
| Октябрь          | 7, 2           |
| Ноябрь           | 5, 2           |
| Декабрь          | 4, 2           |
| Январь           | 8, 2           |
| Февраль          | 13, 4          |
| Март             | 7, 5, 2        |
| Апрель           | 13, 6, 4, 2    |
| Май              | 7, 3           |
| Весь ряд         | 13, 7, 5, 4, 2 |

Для станции Санникова отмечается наличие циклов по температуре: 2, 3, 5, 7, и 14 лет

Таблица 6 повторяемости нарастания площади припая

| САННИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ |                        |
|----------------------|------------------------|
| Октябрь              | 14, 4, 2               |
| Ноябрь               | 5, 4, 3, 2             |
| Декабрь              | 21, 5, 3, 2            |
| Январь               | 7, 5, 3, 2             |
| Февраль              | 8, 6, 3, 2             |
| Март                 | 7, 3, 2                |
| Апрель               | 5, 3, 2                |
| Май                  | 14, 5, 4, 3, 2         |
| Весь ряд             | 21, 14, 10, 7, 5, 3, 2 |

Для западной части моря выделены повторяемости нарастания площади припая: 2, 3, 4, 7, 13, и 20 лет (таблица 7)

Для восточной части моря выделены повторяемости нарастания площади припая: 2, 4, 7, 13, и 20 лет (таблица 7)

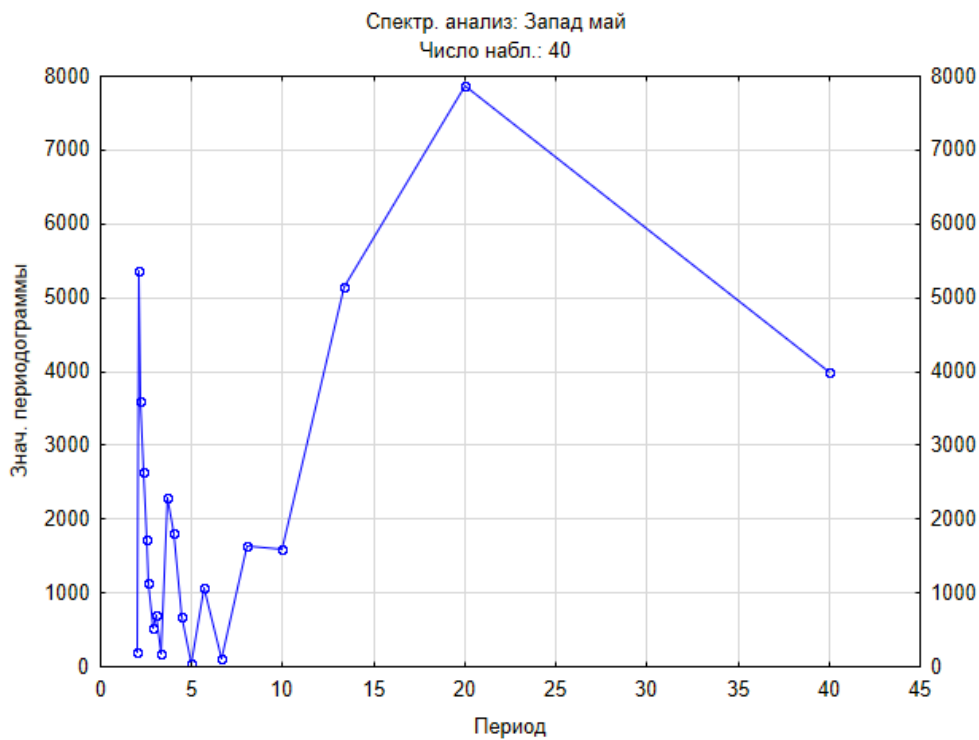


Рис. 39 Циклы нарастания площади припая в западной части ВСМ в период максимального нарастания

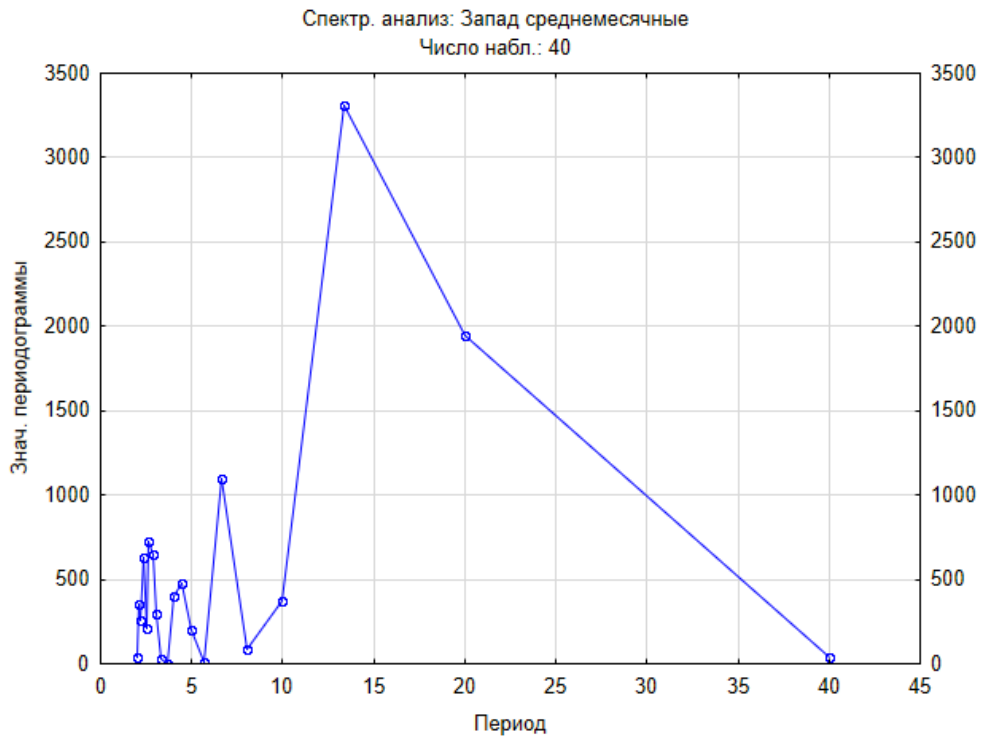


Рис. 40 Среднемесячные циклы нарастания площади припая в западной части ВСМ

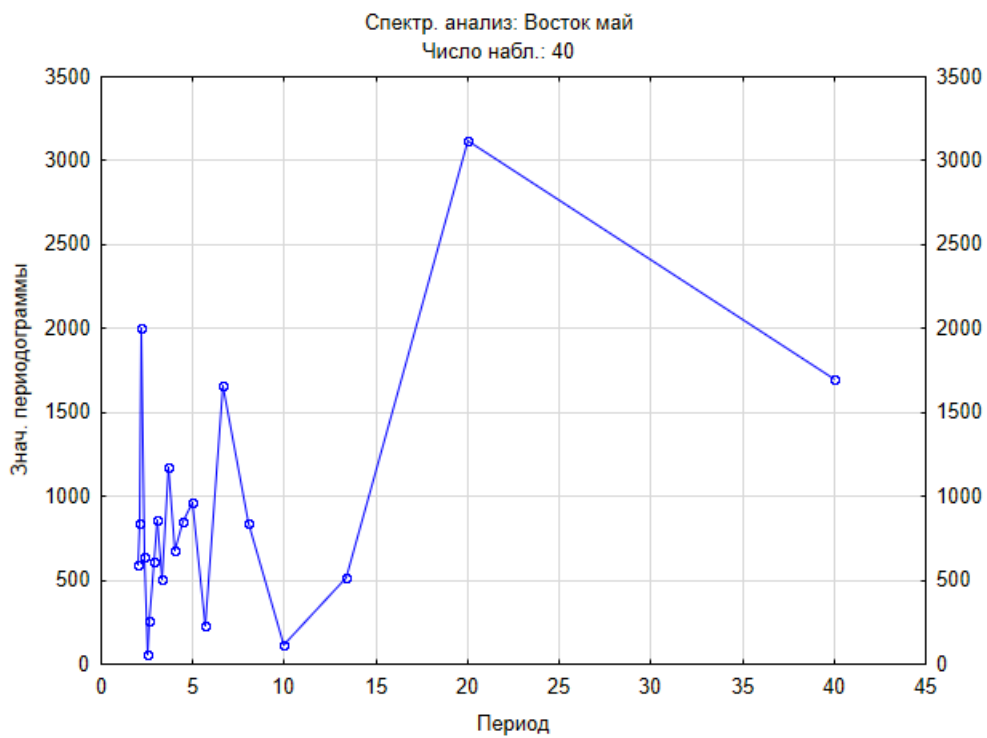


Рис. 41 Циклы нарастания площади припая в восточной части ВСМ в период максимального нарастания

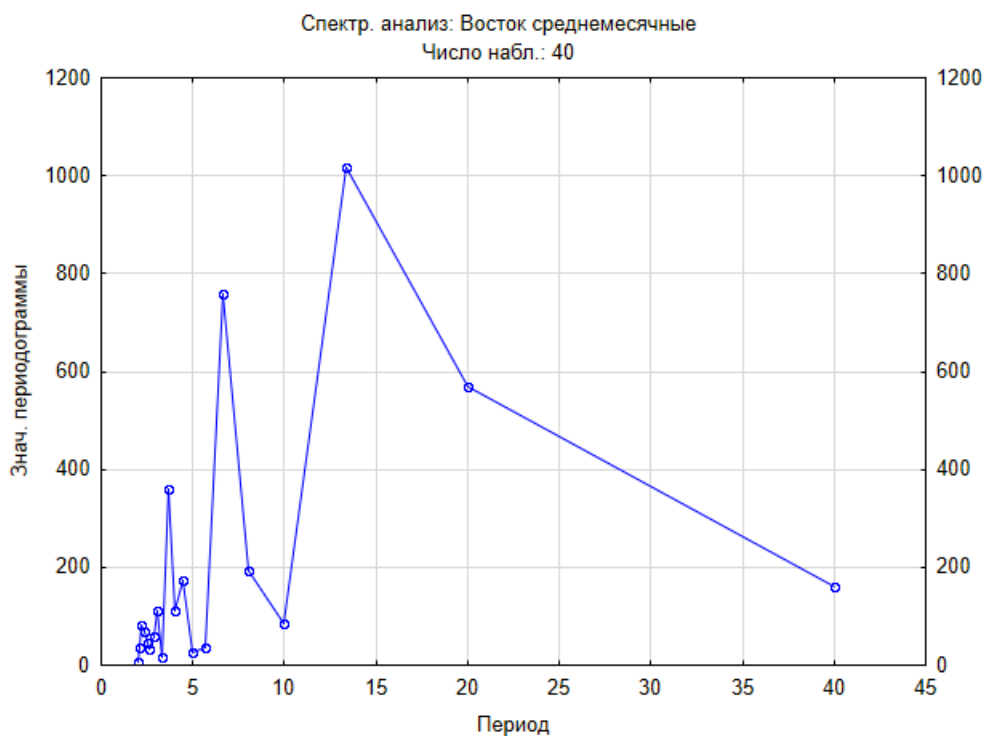


Рис. 41 Среднемесячные циклы нарастания площади припая в восточной части ВСМ

Таблица 7 повторяемости нарастания площади припая

| ПЛОЩАДЬ ПРИПАЯ |              |          |
|----------------|--------------|----------|
|                | Запад        | Восток   |
| Октябрь        | 20, 8, 6     | 8, 5, 3  |
| Ноябрь         | 20, 7        | 13, 8, 2 |
| Декабрь        | 20, 4,       | 8, 4, 2  |
| Январь         | 13 5, 4      | 13, 3, 2 |
| Февраль        | 13, 7, 5     | 13, 7    |
| Март           | 20, 7, 4, 2  | 13, 7, 4 |
| Апрель         | 20, 13, 4, 3 | 20, 4, 2 |
| Май            | 20, 4, 2     | 20, 7, 2 |
| Весь ряд зима  | 13, 8, 4     | 20, 7, 4 |
| Весь ряд весна | 20, 7        | 20, 4, 2 |



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были получены следующие результаты:

Была разработана база данных по площади припая для западной и восточной частей Восточно-Сибирского моря. Были получены статистические характеристики по площадям припая.

Определены сроки окончательного взлома припая на полярных станциях и в естественных припайных зонах. Выполнен статистический и сравнительный анализ за разные периоды.,

Створы 15,16 характеризующие состояние припая в юго-западной части моря. И являются самыми важными в навигационном отношении т.к. это подходы к проливам Санникова и Лаптева Створы 18-припай в проливе Дмитрия Лаптева, 19-21 припай вдоль материкового побережья от Хромской губы до Медвежьих островов. Размах сроков окончательного взлома припая составляет около одного месяца. Исключением являются районы 17 и 19. В этих прикромочных районах взлом припая может начаться под влиянием динамических факторов (ветер, дрейф льда) до начала таяния льда.

Анализ данных на полярных станциях показал, что средние сроки разрушения припая в последние 10 лет сместились на более ранние даты от 7 до 14 суток.

Получены основные статистические характеристики по максимальной толщине льда, площади льда, СГДМ, цикличности температур по данным полярных станций, и цикличности нарастания за весь ряд наблюдений, а также отдельно за последний 15-летний:

- Средние толщины на момент максимального нарастания 170-185 см. Максимальные толщины по морю составляют 177-219 см. На всех станциях толщина льда имеет значительные амплитуды колебаний (50-70 см).

- В последние 15 лет нарастание толщины происходит значительно медленнее на всех станциях. Так, достижение толщины, например, 100 см, происходит на 1-2 декады позднее, чем в предыдущем периоде измерений.

- На станциях Амбарчик, Райчуа и Айон в последние 15 лет к концу апреля-мая толщина льда приближается к среднемноголетним значениям. Наибольшие изменения на протяжении всего периода отмечаются на станции Биллингса, Певек и Валькаркай. На момент нарастания в среднем толщина льда меньше на 10-15 см в последний 15-тилетний период.

- В последние 15 лет среднемесячная температура в течение всего годового цикла была на 2,5-3 °С выше средней за предыдущий период до 2004г. Наибольшие изменения температуры на 3,8-6,2°С, наблюдаются преимущественно в осенние месяцы (октябре, ноябре), а также в феврале. Наименьшие- с увеличением температуры на 0,1-2,4°С, с апреля по август, также стоит заметить, что в период с 2004 по 2020 не было ни одной суровой зимы

Определены гармоника временных рядов ширины припая и температуры воздуха.

Для станции Айон были выделены основные циклы температур: 2, 5, 7, и 13 лет.

Для станции Санникова отмечается наличие циклов по температуре: 2, 3, 5, 7, и 14 лет

Для западной части моря выделены повторяемости нарастания площади припая: 2, 3, 4, 7, 13, и 20 лет

Для восточной части моря выделены повторяемости нарастания площади припая: 2, 4, 7, 13, и 20 лет

Что хорошо коррелирует с Североатлантическим колебанием (пик между 6 и 13 годами), которое представляет собой изменение атмосферного давления от южных до северных широт Атлантики, циклом солнечной активности Швабе в 11 лет, и квазипериодичных процессах земли, выраженных в орбитальном диссонансе из за положения земли к Марсу, Венере, и Луне, что вызывает изменения в приходящей на поверхность солнечной радиацией.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Карелин И.Д., Карклин В.П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века. СПб. Изд. ААНИИ. 2012. 180 с. 16.
2. Тимофеева А.Б., Шаратунова М.В. Многолетняя изменчивость толщины припая в море Лаптевых по данным полярных станций// Российская Арктика. - 2021.-12-с.62-76.
3. Миронов Е.У., Степанов В.В. Наблюдение за ледовой обстановкой: Учебное пособие. – СПб.: ГУ «ААНИИ», 2009. – 360с.
4. Дуванин А.И. р модели взаимодействия между макропроцессами в океане и атмосфере // Океанология. 1968 Т.8, №4. С. 524-569
5. NOAA NCEP-NCAR CDAS-1 MONTHLY Diagnostic surface/ IRI/LDEO Climate Data Library. URL:<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Diagnostic/.surface/>. Дата обращения: 25.05.2022
6. NOAA NCEP-DOE Reanalysis-2 Monthly flx: NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (Reanalysis-2). / IRI/LDEO Climate Data Library. URL: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-DOE/.Reanalysis-2/.Monthly/.flx/.flx/> Дата обращения 17.04.2023
7. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017.640с
8. Alexander M. A.: The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air–sea interaction over the global oceans / Alexander, M. A., I. Bladé, M. Newman, J. R. Lanzante, N. C. Lau, and J. D. Scott // Climate. – 2002. – No. 15. – Pp. 2205–2231
9. Barnett T.P.: Origins of the midlatitude Pacific decadal variability / Barnett, T. P., D. W. Pierce, R. Saravanan, N. Schneider, D. Dommenges, and M. Latif // Geophys. – 1999. – No. 26. – Pp. 1453–1456.

10. Покровский О.М. Изменения температуры поверхности океана в Северной Атлантике и колебания климата Европы // Исследование Земли из космоса. – 2005. – № 4. – С. 24-34.
11. Моря российской Арктики в современных климатических условиях / под ред. И.М. Ашика. СПб. : Изд-во ААНИИ, 2021.
12. Александров В.Ю., Йоханнессен О.М. Изменения толщины льда в Арктике с конца XIX века // Проблемы Арктики и Антарктики. № 4 (94), С. 63 – 73. 2012
13. Алексеев, Г. В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике. Фундаментальная и прикладная климатология, 2015, 1(1), 11-26
14. Волков В.А., Мушта А.В., Демчев Д.М. Закономерности изменения крупномасштабной структуры поля дрейфа морского льда в Северном Ледовитом океане (на основе спутниковых данных 1978–2017 гг.) // Доклады Российской Академии наук. 2019. Т. 488 №4. С. 437-439
15. Гудкович З.М., Захаров В.Ф., Аксенов Е.О., Позднышев С.П. Взаимосвязь современных климатических изменений в атмосфере, океане и ледяном покрове // Тр. ААНИИ. 1997. Т. 437. С. 7-17.
16. Радионов В.Ф., Брызгин Н.Н., Александров Е.И. Снежный покров в Арктическом бассейне. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 124 с
17. Сочнев О.Я., Корнишин К.А., Ефимов Я.О., Миронов Е.У., Порубаев В.С. Межгодовая изменчивость продолжительности безледного периода в юго-западной части Карского моря. Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. 65(3). С. 239-254
18. Юлин, А.В., Вязигина, Н.А., Егорова, Е.С. Межгодовая и сезонная изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений // Российская Арктика. - 2019. - № 7. - С. 28-40.
19. AMAP A. Climate Change Update 2019: An Update to Key Findings of Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017 // Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. - 2019. - P. 12

20. Hendricks, S., Ricker, R. Product User Guide & Algorithm Specification — AWI CryoSat2 Sea Ice Thickness version 2.2. AWI. 2019. P. 54.
21. Onarheim, I. H., Smedsrud, L. H., Ingvaldsen, R. B., and Nilsen, F. Loss of sea ice during winter north of Svalbard. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2014, 66(1), 23933
22. Polyakov, I. V., Walsh, J., & Kwok, R. Recent changes of arctic multiyear sea ice coverage and the likely causes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(2), 145– 151
23. Proshutinsky A.Y., Johnson M.A. Two circulation regimes of the wind-driven arctic ocean // *Journal of geophysical research*. 1997. Vol. 102. №. C6. P. 12493–12514
24. <http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi> – Мировой центр данных по морскому льду Арктического и Антарктического Научно-Исследовательского Института (МЦД МЛ ААНИИ)- Глобальный банк данных по морскому льду.
25. Yulin A.V., Timofeeva A.B., Pavlova E.A., Sharatunova M.V., Hotchenkov S.V. Interannual and seasonal changes the ice cover in the Russian Arctic seas in the modern climatic period. *Trudy GOIN № 220: 44-60*. M. 2019 ISSN: 0371-7119 (in Russ.)
26. Rothrock, D., Zhang, J. & Yu, Y. The Arctic Ice Thickness Anomaly of the 1990s: A Consistent View from Observations and Models. *J. Geophys. Res.* 108, 2003, doi:10.1029/2001JC001208
27. Karklin V. P., Karelin I. D., Yulin A.V., Ivanov N.E., Usoltseva E. A. Landfast ice formation features in the Laptev Sea. *Arctic and Antarctic Research*. 2013. № 3(97):5-14
28. Egorov A.G. The Russian Arctic seas ice age composition and thickness variation in winter periods at the beginning of the 21st century. *Arctic and Antarctic Research*. 2020;66(2):124-143. (In Russ.) <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>