



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра океанологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

«Динамика ледяного покрова в Восточно-Сибирском море по
спутниковым данным в период летней навигации.»

Исполнитель: Януш Николай Александрович

Научный руководитель: к. ф.-м. и., доцент, Фролова Наталия Сергеевна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Густоев Дмитрий Владимирович

(фамилия, имя, отчество)

« » 20 г.

г. Санкт-Петербург

2023



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра океанологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

«Динамика ледяного покрова в Восточно-Сибирском море по
спутниковым данным в период летней навигации.»

Исполнитель: Януш Николай Александрович

Руководитель: к. ф.-м. н., Фролова Наталия Сергеевна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Густоев Дмитрий Владимирович

(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

г. Санкт-Петербург

2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1.....	5
Физико-географические особенности Восточно-Сибирского моря.....	5
1.1 Метеорологическая характеристика.....	9
1.2 Гидрологическая характеристика.....	10
1.2 Ледовый режим.....	14
<i>Процесс нарастания морского льда.....</i>	<i>14</i>
<i>Таяние льда.....</i>	<i>18</i>
ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ.....	20
2.1 Описание съёмочной аппаратуры спутников TERRA/AQUA.....	23
ГЛАВА 3. МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ.....	27
3.1 Анализ тренда временного ряда площади ледяного покрова.....	27
ГЛАВА 4 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ДИНАМИКА ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ.....	31
4.1 Западная часть Восточно-Сибирского моря.....	39
<i>Припай.....</i>	<i>40</i>
<i>Дрейфующий лёд.....</i>	<i>40</i>
4.2 Восточная часть Восточно-Сибирского моря.....	41
<i>Припай.....</i>	<i>44</i>
<i>Дрейфующий лёд.....</i>	<i>44</i>
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	44
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	45

Введение

Особую сложность для плавания судов в летний период представляют сплоченные льды, или ледяные массивы. Ледяными массивами называются квазистационарные скопления сплоченных льдов (сплоченностью в 7–10 баллов), которые локализуются в определенных районах Восточно-Сибирского моря и имеют важное навигационное значение для обеспечения безопасного судоходства. Положение кромки льдов в летний период очищения Восточно-Сибирского моря является одной из базовых характеристик, описывающих состояние ледяного покрова в высоких широтах, которое определяет не только сложности проведения морских операций по трассам Северного морского пути, но и может служить надежным индикатором многолетних изменений, происходящих в Арктике. Характеристики дрейфующего льда в сочетании с метеорологическими данными в Восточно-Сибирском море обеспечивают достаточными знаниями и информацией, чтобы, опираясь на нее, сделать выводы и принять решение, исходя из поставленных задач навигации.

Целью выпускной квалификационной работы является анализ динамики ледяного покрова в Восточно-Сибирском море по спутниковым данным в период летней навигации.

Решаемые задачи:

1. Проанализировать исходные данные и спутниковые системы, используемые для достижения цели работы.

2. Рассмотреть основные методы преобразования спутниковой информации при использовании в задачах информационного обеспечения такого труднодоступного района Арктики, как Восточно-Сибирское море.

Динамика ледяного покрова в Восточно-Сибирском море вызвана влиянием различных факторов, включая климатические условия, течения, ветры и т.д. В зимний период Восточно-Сибирское море замерзает и покрывается льдом, который расщепляется на поля и дрейфует под воздействием течений и ветров. Весной и летом происходит таяние льда, которое может быть спровоцировано повышением температуры воздуха и/или поверхности воды, а также наличием положительного воздействия солнечного излучения.

Одним из важных факторов, влияющих на динамику ледяного покрова в Восточно-Сибирском море, являются течения, в том числе прибрежные течения в Лаптевых и Восточно-Сибирских морях, а также Аляскальское течение и сибирское проточное течение. Эти течения определяют направление движения льда и могут способствовать его скоплению и образованию полюса холода в районе острова Среднего. Ветры также оказывают влияние на динамику льда, вызывая его дрейф и перемещение.

В целом, динамика ледяного покрова в Восточно-Сибирском море является сложным процессом, который продолжает изучаться учеными.

Восточно-Сибирское море расположено в северо-восточной части России и является частью Арктического бассейна. Ледяной покров в этом районе меняется в зависимости от сезона и года.

Весной и летом покров почти полностью растает, оставляя только небольшие кусочки льда в отдельных районах. В осень и зиму ледяной покров вновь начинает формироваться, простираясь в площади до 3 миллионов квадратных километров. В январе-феврале ледяной покров достигает своего максимального размера.

Однако, в последние годы наблюдается уменьшение площади ледяного покрова в Восточно-Сибирском море. К примеру, в 2019 году площадь льда

была на 28% меньше, чем среднее значение за период с 1981 по 2010 годы. Причиной таких изменений является глобальное потепление, в результате которого таяние льда происходит быстрее, чем его образование.

Это явление может иметь негативные последствия для морской фауны и флоры, а также для традиционного промысла коренных народов, зависящих от ледяной навигации. Кроме того, уменьшение площади ледяного покрова может усугубить процесс глобального потепления, так как ледяной покров отражает солнечную радиацию и помогает сохранять холод, что предотвращает дополнительное нагревание Земли.

Глава 1. Физико-географические особенности Восточно-Сибирского моря

Восточно-Сибирское море является одним из окраинных морей, омывающих северные берега Восточной Сибири (рисунок 1). Его границы определены как естественными, так и условными линиями. Западная граница проходит от северной оконечности острова Котельный до северной оконечности этого острова (м. Анисий) и далее вдоль восточной границы моря Лаптевых. Северная граница простирается от края материковой отмели до точки с координатами 76° с. ш., 180° в. д. Восточная граница проходит по меридиану 180° до острова Врангеля, а затем вдоль его северо-западного берега до материка, и южная граница проходит по материковому берегу от местности Якан до местности Святой Нос [1].

Восточно-Сибирское море имеет размеры в принятых границах: площадь около 913 тыс. км², объем около 49 тыс. км³. Средняя глубина моря составляет около 54 м, а его наибольшая известная глубина достигает 915 метров.

По географическому положению и гидрологическим условиям, отличным от океана, с которым море свободно сообщается, Восточно-Сибирское море относится к типу материковых окраинных морей.

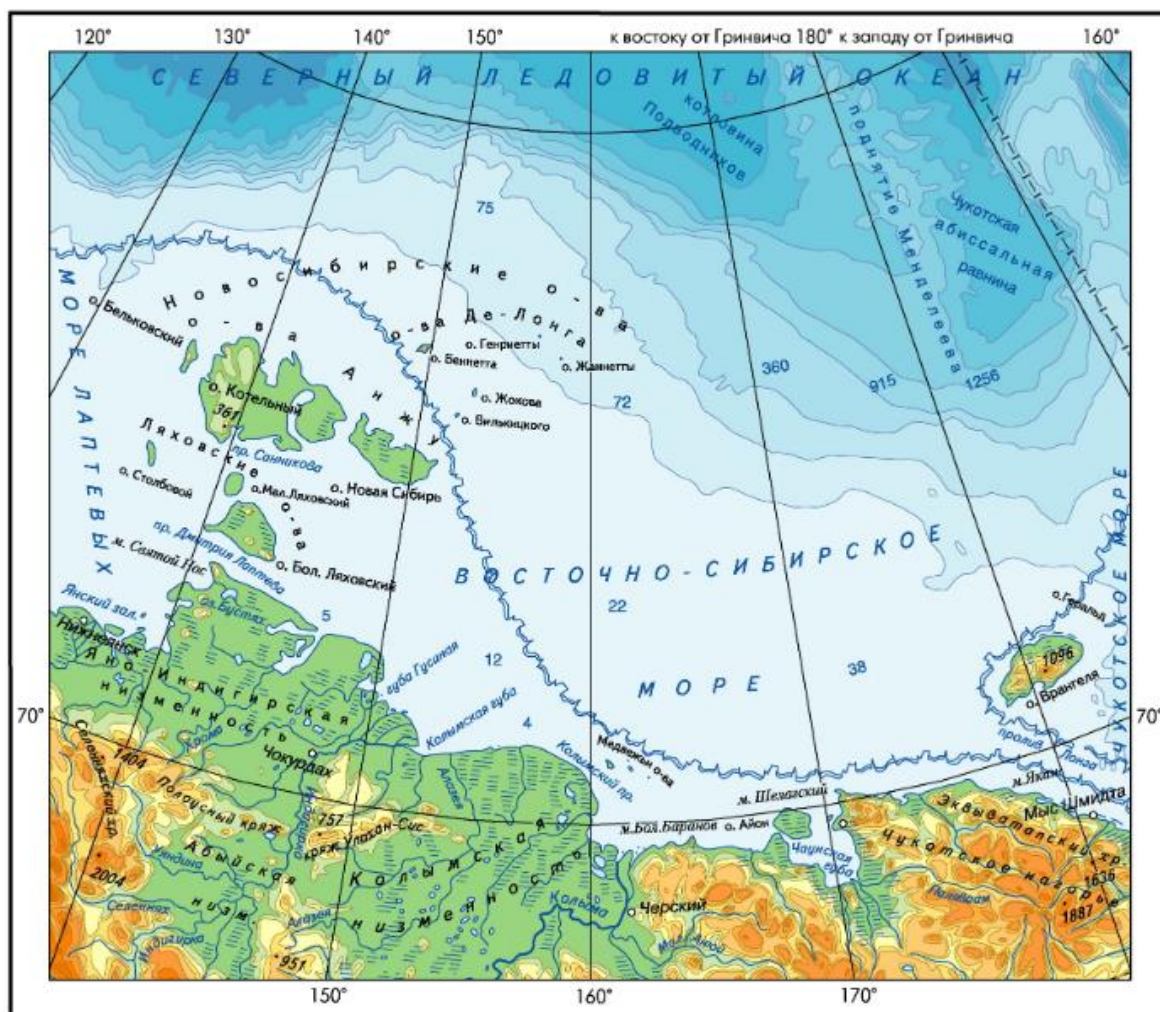


Рисунок 1 – Расположение Восточно-сибирского моря

Восточно-Сибирское море характеризуется бедностью островами. Береговая линия моря образует крупные изгибы, иногда проникающие глубоко в сушу, а иногда выступающие в море. Местами берега имеют ровную линию, а мелкие извилины встречаются редко и чаще всего связаны с устьями рек. Западная часть побережья Восточно-Сибирского моря значительно отличается от восточной (рисунок 2). От Новосибирских островов до устья Колымы берега однообразны и заболоченная тундра простирается до моря. Берега низменны и пологи. На восточном побережье Колымы ландшафт становится гористым и разнообразным. От устья Колымы до острова Айон к воде подходят невысокие холмы, местами круто обрывающиеся. Чаунская губа окружена невысокими, но крутыми и ровными

берегами. Различные участки побережья Восточно-Сибирского моря имеют разные морфологические типы берегов [1].



Рисунок 2 – Границы и районы Восточно-Сибирского моря. 1- западная часть 2- восточная часть [2].

Шельф Восточно-Сибирского моря в основном представляет собой склонную равнину, скатывающуюся на северо-восток. В большинстве своем дно моря не имеет значительных отличий в высоте, преобладают глубины до 20-25 метров. Однако, в северо-восточной части моря можно наблюдать относительно крупные желоба, которые, по предположениям ученых, являются следами затопленных речных долин. Новосибирская отмель находится в западной части моря, где глубины минимальны. Наиболее глубокие места находятся в северо-восточной части моря, но нигде не превышают 100 метров. Резкое увеличение глубин происходит только в диапазоне от 100 до 200 метров [1] [2].

Восточно-Сибирское море является частью Арктического бассейна и расположено на северо-востоке России. Оно омывает берега Чукотки на востоке и граничит с Морем Лаптевых на западе. Общая площадь моря составляет около 962 000 квадратных километров, а самое глубокое место находится в центре моря и достигает глубины в 3 494 метра.

Климат в Восточно-Сибирском море можно определить как арктический морской климат, с длительными и морозными зимами, а также короткими и приятными летними месяцами. Многие ученые в своих исследованиях подчеркивают, что характерной чертой ландшафта этого моря являются обильные ледовые образования, прибрежные оледенения и ограниченные возможности рыболовства в тех районах, где лед преобладает на протяжении большей части года. Максимально низкие показатели температуры воды также характерны для данной территории моря. Фазовый состав обильного льда может изменяться в зависимости от текучести акватории моря и является еще одной характерной чертой климата Восточно-Сибирского моря. Обратим внимание на тот факт, что реки Лена, Индигирка и Колыма являются наиболее значимыми притоками в море. Кроме того, следует упомянуть о том, что Восточно-Сибирское море имеет важное значение для миграции морских млекопитающих, таких как киты и тюлени, которые часто используют его в качестве маршрута. [1].

Воды Восточно-Сибирского моря подвержены глубинным циркуляциям, которые смешивают различные слои вод и обогащают их питательными веществами. Это обеспечивает экосистему морских организмов и поддерживает рыболовство - важную отрасль экономики региона.

Несмотря на значительные трудности, связанные с уединенным расположением и сложным климатом, Восточно-Сибирское море является уникальным объектом изучения для биологов и экологов и обитает множество видов рыб, млекопитающих, птиц и других живых организмов.

Благодаря своему стратегическому расположению в бассейне Арктики, Восточно-Сибирское море является ключевым транспортным узлом региона, обеспечивая связь между Российским Дальним Востоком и Северной Европой. Оно также является важным источником вылова рыбы и поддержания экологического баланса в этом регионе.

Однако природные и человеческие воздействия могут причинить серьезный вред экосистеме морской жизни, загрязнить морские воды и нарушить баланс питания рыб в этом регионе. Поэтому понимание физико-географических особенностей Восточно-Сибирского моря является ключевым фактором для сохранения уникального биоразнообразия в этом регионе и обеспечения экономической устойчивости его побережья. [2]

1.1 Метеорологическая характеристика

В холодный сезон на Восточно-Сибирское море оказывает влияние Сибирский максимум, который достигает побережья моря, тогда как гребень Полярного антициклона не столь явно выражен. Из-за этого над морем сильнее всего дуют юго-западные и южные ветры со скоростью 6-7 м/с, которые приносят с собой холодный воздух с континента и вызывают значительное понижение температуры воздуха в январе до отметки -28-30°. Зимний период характеризуется особым спокойствием и ясной погодой, только иногда поколебанным циклоническими вторжениями. [1].

На западе моря циклоны из Атлантики усиливают ветер и приводят к нескольким градациям температуры, тогда как циклоны из Тихого океана, сопровождаемые студеным континентальным воздухом, лишь усиливают скорость ветра, облачность и вызывают снежные бури в юго-восточной части моря. В горных районах побережья при прохождении тихоокеанских циклонов могут появляться местные ветры, которые называются фенем и обычно достигают штормовой силы, вызывая некоторое повышение температуры и снижение влажности воздуха.

В летний период давление на континенте Азии понижается, тогда как на Восточно-Сибирском море повышается, что ведет к доминированию ветров северных направлений. В начале сезона они слабые, но к концу лета скорость ветра увеличивается до 6-7 м/с, а западная часть Восточно-Сибирского моря становится одним из самых бурных участков Северного морского пути, часто со скоростью ветра до 10-15 м/с. Юго-восточная часть моря значительно более спокойная. Усиление ветра в этом районе связано с появлением фенів. Постоянные северные и северо-восточные ветры способствуют пониженной температуре воздуха, в июле она составляет только 0-1° на севере моря и +2-3° в прибрежных районах. Понижение температуры от юга к северу объясняется охлаждением льдов и прогревом континента. Летом чаще всего встречается пасмурная погода с мелким морозящим дождем, реже с мокрым снегом. Осенью характерно почти полное отсутствие возвратов тепла, что объясняется удаленностью моря от Атлантического и Тихого океанов и их слабым влиянием на атмосферные процессы в этот сезон. Осенью в окраинных районах моря наблюдается бурная погода, а в центральной части моря – затишье. В целом осенью характерны относительно холодные температуры и бурные условия, в сочетании с прохладным летом. [1].

Период летней навигации в Восточно-Сибирском море начинается в июне и продолжается до сентября. В этот период ледяной покров на море существенно сокращается, что позволяет судам, работающим на море, проходить обходные пути между портами, осуществлять доставку грузов и различных видов эксплуатации. [2].

1.2 Гидрологическая характеристика

В отличие от других арктических морей, как Карского, так и моря Лаптевых, гидрологические характеристики Восточно-Сибирского моря отличаются невысоким уровнем материкового стока воды, который составляет примерно 250 км³ речной воды в год. Это не более 10% от общего

объема речных стоков всех арктических морей. Ведущую роль при этом играет река Колыма, которая привносит в море около 132 км³ воды, за ней следует река Индигирка с показателем в 59 км³. Остальные реки вносят в море около 35 км³ воды. Основное количество речной воды поступает в южную часть моря, а около 90% стока приходится на летние месяцы, что также типично для других арктических морей.

Не смотря на значимость Восточно-Сибирского моря, речной сток не сильно влияет на его гидрологический режим. Порой, мощность потоков рек оказывается недостаточная, чтобы речная вода распространялась далеко от устьев, даже в период наибольшего стока. Тем не менее, река в значительной степени влияет на гидрологические особенности прибрежных участков, особенно летом.

Восточно-Сибирское море является крайне просторным, имеет свободное сообщение с Центральным Арктическим бассейном, большой ледовитостью и небольшим речным стоком. В холодные сезоны температура воды на поверхности снижается от юга к северу. Зимой температура близка к точке замерзания, около устьев рек достигает примерно -0,2-0,6°, в то время как на северной границе моря показатели опускаются до -1,7-1,8°. Летом распределение температуры воды зависит от ледовой обстановки. В заливах и бухтах температура достигает +7-8°, в открытых районах без льда – всего лишь +2-3°, на границе льда близко к нулю.[1]

Температура воды Восточно-Сибирского моря остается стабильной зимой и весной, за исключением некоторых устьев крупных рек, где она может быть ниже. Летом температура воды медленно понижается от поверхности до дна на западной прибрежной зоне, но в восточной части моря наблюдается изменение на глубине 3-5 метров с последующим снижением до дна. В местах, где реки вливаются в море, температура воды охватывает слой до 7-10 метров, а затем резко падает на глубине 10-15-20 метров. Однако в

целом Восточно-Сибирское море можно отнести к самым холодным арктическим морям в России. [1]

Соленость на поверхности моря увеличивается с юго-запада на северо-восток. Зимой и весной она меняется в зависимости от места нахождения и может быть как 4-5 ‰, так и достигать значений до 32 ‰ на северных окраинах моря. Летом соленость снижается из-за притока речных вод и таяния льда. В глубине моря соленость увеличивается и приобретает свойство повышаться на горизонтах 5-7-10 метров.

Осенью Восточно-Сибирское море характеризуется прохладными температурами и бурными условиями, особенно на окраинах моря. В центральной части моря же можно наблюдать затишье.

В период с июня по сентябрь в море наступает летняя навигация, когда ледяной покров заметно уменьшается, позволяя судам безопасно перемещаться между портами и доставлять грузы. Важным параметром для гидродинамики моря является плотность воды, которая на Восточно-Сибирском море имеет более высокие значения осенью и зимой, особенно на севере и востоке. Однако, различия в плотности между районами небольшие.

Летом мощные ветры перемешивают воду на глубинах до 20-25 метров, особенно на открытых пространствах, свободных ото льда, а также в районах со слабой плотностной структурой. В местах, где воды резко различаются по плотности, вертикальное перемешивание ограничивается глубиной 10-15 метров.

В зимний период в море возникает вертикальная конвекция, которая проникает на глубину 40-50 метров, занимая большую часть площади. В конце зимы вертикальное движение воды распространяется до глубин 70-80 метров, ограниченных дном или устойчивой плотностью.

Это связано с мелководностью и отсутствием глубоких желобов, выходящих за пределы моря. Поэтому характеристики поверхностных арктических вод сохраняются в большинстве пространства от поверхности до дна. В дельтах рек происходит смешение речной и морской воды, формируя водный столб с повышенной температурой и низкой соленостью.

На поверхности Восточно-Сибирского моря циркуляция воды слабо проявляется и вызвана постоянными течениями. Часть воды движется вдоль материкового побережья с запада на восток, а затем направляется на север и северо-запад, входя в поток, который движется к западу. Ветровые и приливные течения не оказывают значительного влияния на движение воды[1].

В море наблюдаются приливы длительностью полдня, вызванные приливной волной, направляющейся к побережью материка с севера. Наиболее сильные приливы происходят на северо-западе и на севере Восточно-Сибирского моря, слабея по мере движения на юг.

Метеорологические условия также оказывают влияние на изменение уровня моря на побережье материка.

Уровень моря в море имеет годовой цикл с максимальным положением в июне-июле при обильном притоке речных вод, понижением в августе из-за сокращения стока и подъемом в октябре из-за нагонных ветров. В зимние месяцы уровень моря снижается и достигает минимального значения в марте-апреле. [1]

На свободных ото льда пространствах Восточно-Сибирского моря наблюдается значительное волнение, особенно при сильных северо-западных и юго-восточных ветрах. Высота волн может достигать 5 м, но чаще составляют 3-4 м. Конец лета и начало осени характеризуются бурным волнением, когда кромка льда отступает к северу. Западная часть моря более волновая, чем восточная, а центральные районы моря относительно спокойны.

1.2 Ледовый режим

Процесс нарастания морского льда

Восточно-Сибирское море уникально своим сильным замерзанием, которое начинается в октябре-ноябре и заканчивается только в июне-июле. Особенностью льда этого моря является то, что большая его часть формируется в Центральном Арктическом бассейне, откуда дрейфует к берегам Восточной Сибири.

Зимой Восточно-Сибирское море становится местом развития припая, особенно заметного в мелководной западной части моря. Ширина припая может достигать до 500 км на западе и связывается с припаем моря Лаптевых. Толщина припая достигает 2 м в конце зимы, причем к востоку от м. Шелагского его ширина уменьшается[2].

За припаем можно наблюдать дрейфующие одно- и двухлетние льды толщиной 2-3 м, а на севере моря многолетний арктический лед. Зимой преобладающие ветры южных направлений часто относят дрейфующие льды от северной кромки припая, что приводит к образованию пространств чистой воды и молодых льдов. На западе моря обычно формируется Новосибирский ледяной массив, состоящий из однолетних льдов, который разрушается в конце лета. В течение всего года отрог ледового массива Айонского океана, состоящий в основном из тяжелых многолетних льдов, приближается к материковому берегу, что усугубляет ледовую обстановку в море.

С октября-ноября по июнь-июль море полностью покрывается льдом. Зимой преобладающими ветрами являются южные румбы, которые перемещают дрейфующие льды от северной кромки припая. В результате образуются пространства чистой воды и молодых льдов, а также стационарные заприпайные полыньи, такие как Новосибирская на западе и Заврангелевская на востоке.

Толщина припая к концу зимы достигает примерно 2 метров, при этом от запада к востоку толщина припая уменьшается. За припаем располагаются дрейфующие льды, преимущественно однолетние и двухлетние льды

толщиной 2–3 метра. На севере моря также встречается многолетний арктический лед[2].

В начале лета, после вскрытия и разрушения припая, кромка льдов изменяет свое положение под воздействием ветров и течений. Однако льды всегда присутствуют к северу от полосы островов Врангеля и Новосибирских островов[2].

Западная часть моря характеризуется формированием обширного Новосибирского ледяного массива, который состоит преимущественно из

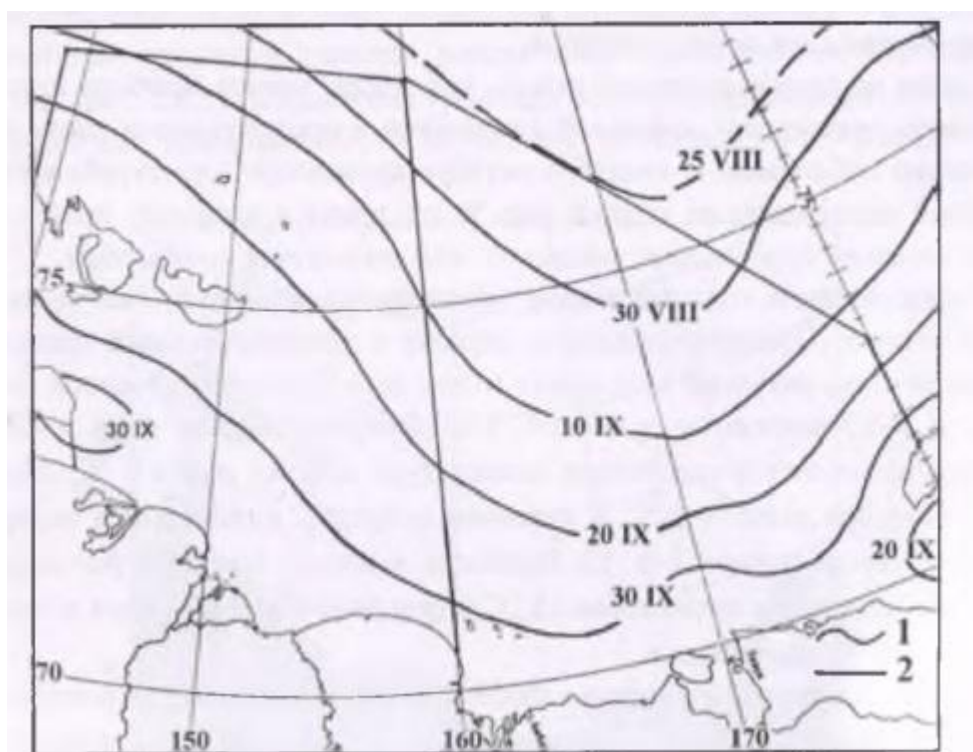


Рисунок 3 Изохроны средних сроков устойчивого ледообразования в Восточно-Сибирском море 1 — изохроны, 2 — границы моря и районов [2]

однолетних льдов и обычно разрушается к концу лета. На востоке моря большую часть пространства занимает отрог Айонского океанического ледяного массива, состоящего в значительной мере из тяжелых многолетних льдов.

В течение 8-9 месяцев в году Восточно-Сибирское море полностью покрывается льдом, начиная от северной границы моря в августе и

распространяясь к югу в сентябре. Около 35 дней море замерзает практически полностью[2].

В западной части моря и в Новосибирских проливах образуется преимущественно местный лед. Иногда в этих районах сохраняются льды, которые не успели вытаять в летний период и остаются двухлетними. В восточной части моря лед состоит из молодых и старых образований, включая многолетние, которые находятся в центральных и северных районах.

Толщина льда в море растет очень быстро, и к октябрю в море представлены все возрастные категории льда, за исключением однолетнего толстого льда. Большая часть моря занята молодыми льдами толщиной до 30 см, а 6% составляют однолетние льды различной толщины. В Восточно-Сибирском море сохраняется до 24% льдов, включая многолетние, после летнего сезона. Большинство этих льдов (в примерно 30%) находится в восточной части моря.

К февралю на большей части акватории Восточно-Сибирского моря образуется тонкий однолетний лед, в то время как количество двухлетних и многолетних льдов остается примерно неизменным. К концу зимнего периода лед состоит из припайных льдов из однолетних толстых, тонких, и многолетних. Припай в Восточно-Сибирском море является самым обширным из всех арктических морей и находится главным образом в западной мелководной части моря, обычно формирующийся на чистой воде, но в некоторые годы включая в себя остаточные льды, не вытаявшие летом.

Время образования припая в разных районах Восточно-Сибирского моря варьируется на протяжении 5-6 декад и зависит от климатических и ледовых условий. Припай обычно появляется в октябре, однако точные даты зависят от толщины льда, необходимой для его образования. Процесс образования припая начинается через 10-20 дней после начала образования льда[2].

Различные районы моря имеют свою специфику в образовании припая. Так, в Новосибирских островах и проливах Санникова и Дм. Лаптева чаще всего припай возникает в третьей декаде октября, тогда как вдоль чукотского побережья припай может появиться в любую декаду месяца.

[2]

По опыту наблюдений можно сказать, что Восточно-Сибирское море является одним из самых ледовитых и холодных морей в Российской Арктике. Граница между западной и восточной частями моря проходит по меридиану 160° восточной долготы, и общая площадь моря составляет 770000 квадратных километров. В западной части моря, размером в 363000 квадратных километров, наблюдается локальное образование льда. А восточная часть моря, занимающая площадь в 407000 квадратных километров, состоит из покрывающих многолетних и новообразовавшихся льдов, которые не растают летом. В зависимости от метеорологических и ледово-географических условий каждый год сроки устойчивого ледообразования могут значительно варьироваться. Обычно это происходит в течение 5-6 декад. Процесс ледообразования в море начинается в конце августа и продолжается до конца мая. В прибрежной зоне формирование

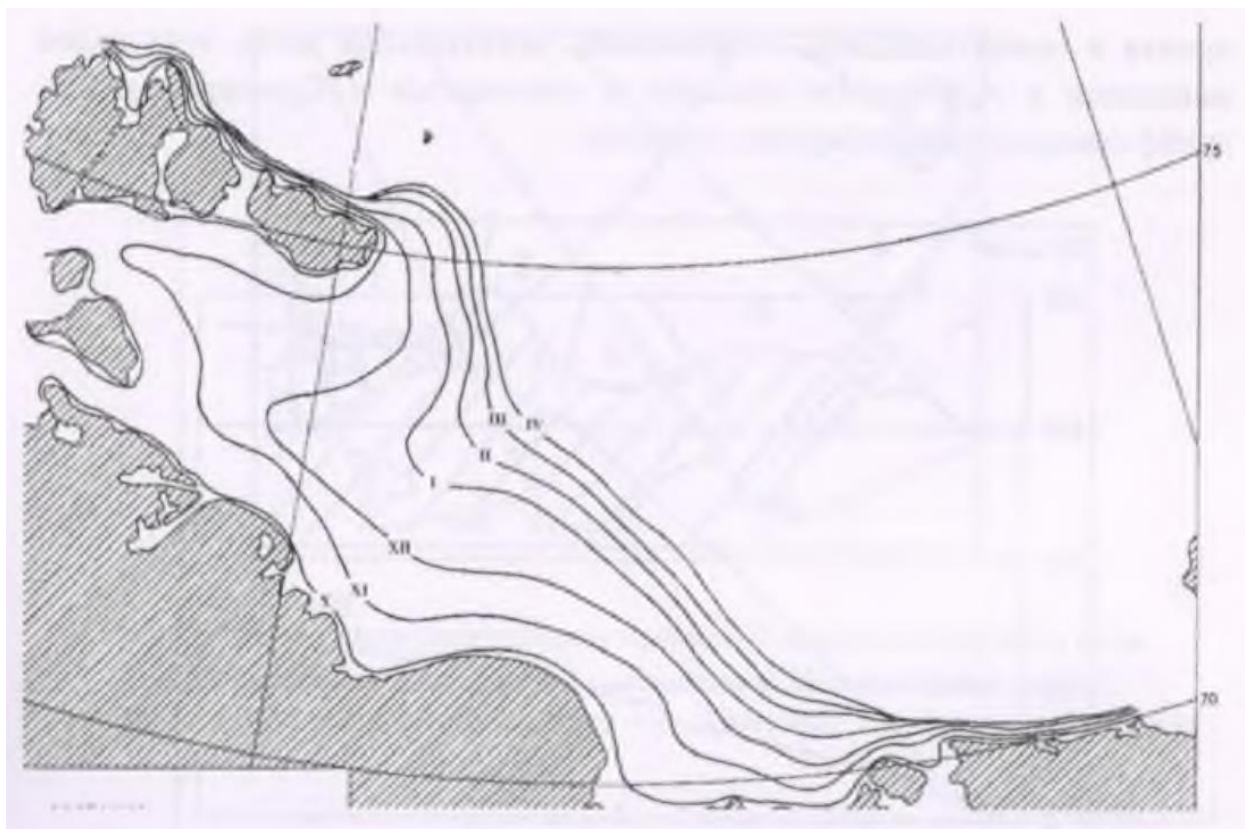


Рисунок 4 Положение границ припая при различных условиях его формирования [2]

припая обычно начинается в первых декадах октября. С течением времени он покрывает всю акваторию моря до меридиана 150° восточной долготы. Максимальное развитие припая с толщиной до 210 см достигается к апрелю, причем около 2/3 этого припая располагается в западной части моря.

Положение границ припая при различных условиях его формирования представлено на рисунке 4

На территории морей имеет место непостоянство сроков образования припая, которое может изменяться на протяжении целого года на 5-6 декад. Ранние сроки формирования припая наблюдаются в первой декаде октября, а поздние - на последней декаде ноября. В рамках 70-90% случаев, припай формируется в октябре. Тем не менее, время с максимальной повторяемостью образования припая внутри месяца, может отличаться в каждом регионе, таблица 1[2]

Таблица 1. [2] Вероятность сроков образования устойчивого припая в районах Восточно-Сибирского моря по данным ИСЗ за 1980-2007 гг., %

Районы моря	октябрь			Ноябрь		
	Декады					
	1	2	3	1	2	3
Новосибирские о-ва, проливы Санникова, Дм.Лаптева	15	19	48	11	5	2
южный берег Западной части моря	41	28	23	6	2	
колыма-о.Айон	16	34	38	5	7	
Чукотское побережье	21	21	29	19	7	3

**Та
ян
ие
льд
а**

С начала июля до конца сентября происходит процесс таяния ледяного покрова и очищения Восточно-Сибирского моря от льда, который происходит медленнее, чем в других арктических морях. Очаг очищения

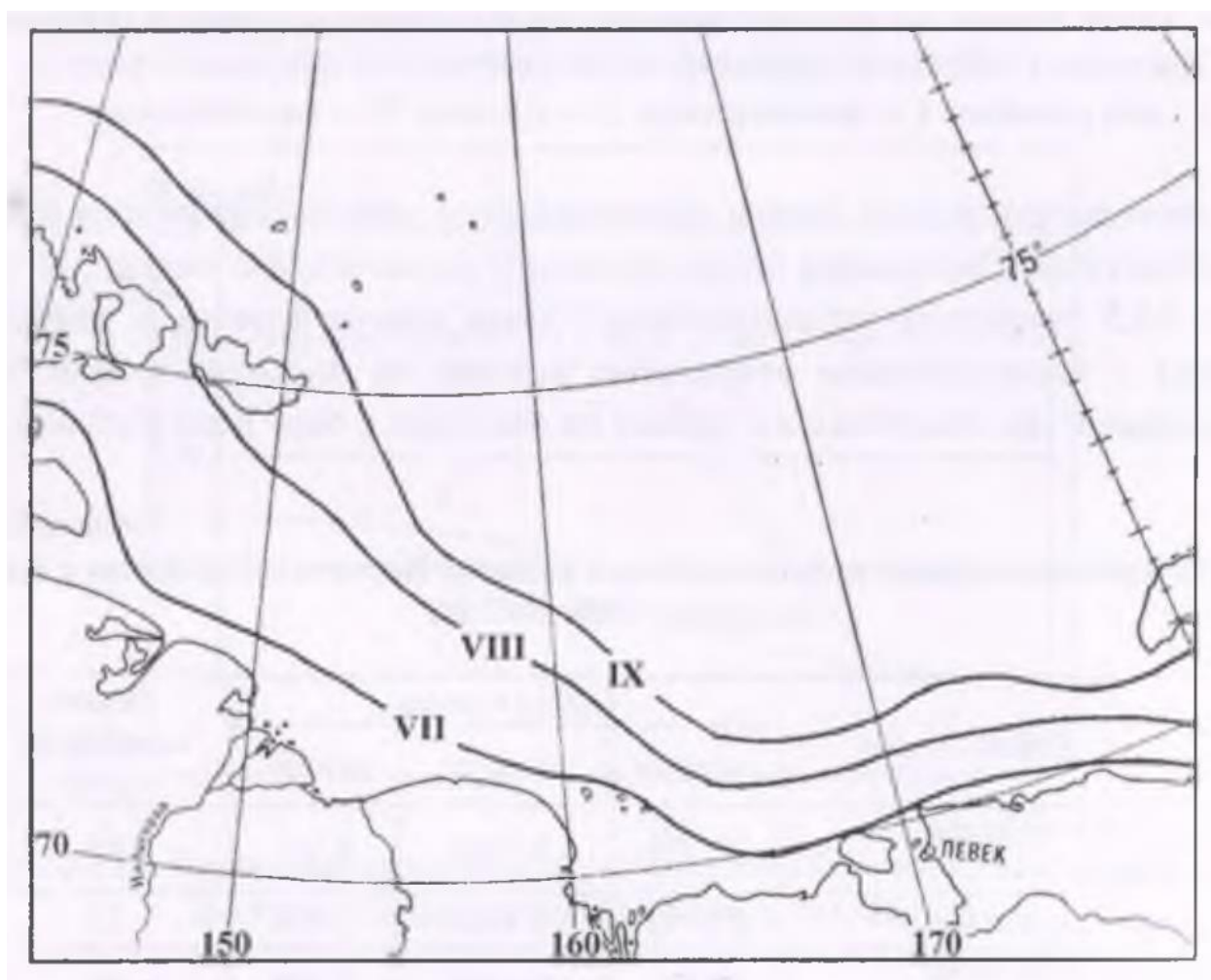


Рисунок 5 Положение кромок льда в Восточно-Сибирском море в конце июня — сентябре [2]

находится в приустьевой зоне рек Индигирка и Колыма, которые оказывают значительное влияние на ледовый режим западного региона моря. В прикромочной зоне в конце мая или начале июня начинается процесс разрушения припая, который происходит постепенно в течение двух месяцев, а окончательно припай разрушается в конце июля или в начале августа. На рисунке 5 представлены изохроны, отображающие среднее положение границ припая в период его разрушения[2]. Скорость очищения увеличивается незначительно в августе после окончательного взлома припая. В течение июня граница припая отступает от берегов относительно медленно, и большая его часть разрушается и становится дрейфующим льдом в течение июля.

Глава 2. Характеристика используемых спутниковых данных

Спутниковые методы дистанционного зондирования широко применяются для изучения ледяного покрова в Восточно-Сибирском море. Различные типы данных и диапазоны электромагнитного спектра используются для получения информации о льде, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения[13].

Измерения в микроволновом диапазоне особенно полезны, так как они не зависят от солнечного освещения и могут быть интерпретированы даже в условиях облачности. Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) позволяют измерять удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР), которая различается для воды и разных типов льда. Это позволяет разделять лед и воду и классифицировать типы льда. РСА-данные используются для построения карт морского льда и его детальной классификации, а также для расчета полей дрейфа льда.

Скаттерометры используются для создания карт протяженности ледяного покрова низкого пространственного разрешения. Данные РСА позволяют изучать динамику и изменчивость морского льда, его трансформацию, дрейф, замерзание и таяние. Они также обеспечивают высокое разрешение и точность визуального анализа изображений, позволяя отчетливо определять особенности ледяных полей и различать лед и воду.

Данные спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B с РСА-аппаратурой, предоставляемые Европейским космическим агентством (ESA), открывают широкие возможности для изучения морского льда в регионе Восточно-Сибирского моря. Однако они не обеспечивают ежедневное полное покрытие Арктического региона, и ресурсоемкость алгоритмов обработки данных РСА может быть ограничивающим фактором для оперативного мониторинга.

Таким образом, спутниковые методы дистанционного зондирования позволяют получать ценные сведения о ледяном покрове в Восточно-Сибирском море, включая динамику, свойства и классификацию морского льда. Однако требуется дальнейшее развитие алгоритмов обработки данных и автоматизации для более эффективного использования этих методов в оперативном мониторинге[13].

Спутниковые методы дистанционного зондирования предоставляют разнообразные данные для анализа ледяного покрова в Восточно-Сибирском море. Некоторые из этих методов включают спектральные радиометры, которые измеряют интенсивность отраженного солнечного света. Эти данные позволяют получать высокодетальные изображения поверхности и близкие к визуальному восприятию человеческого глаза. Разделение льда и воды основано на различиях альбедо (отражательной способности) этих сред.

Однако в Арктике существуют ограничения для проведения таких измерений. Во-первых, во время полярной ночи данные недоступны. Во-вторых, ясная погода в полярных районах бывает редким явлением. В связи с этим, данные в инфракрасном диапазоне (ИК) не имеют ограничений,

связанных с длиной светового дня, но присутствие облаков также может препятствовать получению информации о поверхности[14].

Физическая основа разделения льда и воды на основе ИК-измерений основана на разнице в температуре их поверхности. Однако использование ИК-снимков для картирования морского льда ограничено из-за больших погрешностей.

Существует множество спутниковых платформ с спектральными радиометрами, включая американский Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), который проводит регулярные съемки земной поверхности в различных спектральных каналах. Для повышения информативности данных в условиях облачности НАСА создает продукты с разным временным осреднением, что позволяет получать почти безоблачные изображения поверхности и применять их при картировании морского льда.

Измерения микроволновых радиометров предоставляют возможность оценивать параметры морского льда, такие как его сплоченность и тип. Эти данные обладают широким пространственным охватом, регулярностью, независимостью от облачности и продолжительностью калиброванных измерений, что делает их ценным инструментом для изучения изменений климата.

Таким образом, спутниковые методы дистанционного зондирования позволяют получать информацию о ледяном покрове в Восточно-Сибирском море с высоким разрешением, что способствует изучению его динамики и изменчивости.

Использование спутниковых данных позволяет получить информацию о площади ледяного покрова с высоким пространственным разрешением и широким охватом территории. Данные о площади льда могут быть получены из различных источников, включая данные радиолокационных спутников, которые позволяют определить границы ледяного покрова и классифицировать типы льда. Данные скаттерометров используются для

создания карт протяженности ледяного покрова с низким пространственным разрешением[14].

2.1 Описание съёмочной аппаратуры спутников Terra/Aqua

Спутник Terra / Aqua (спектрорадиометр Modis)

Спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) - это прибор, установленный на спутниках NASA, который используется для измерения энергии, отраженной от поверхности Земли, а также измерения температуры и геометрических параметров облаков и атмосферных составляющих. Он состоит из двух приборов: модуля визуального тумана и термального изображения (VIIRS) и модуля изображений среднего разрешения (M Bands). Каждый модуль состоит из 36 спектральных каналов, которые позволяют измерять множество параметров поверхности и атмосферы. Результаты измерений спектрорадиометра MODIS используются в многих областях, включая картографию, анализ климатических изменений, дистанционное зондирование и мониторинг экологии окружающей среды.

Благодаря непрерывному режиму работы и широкой полосе съемки (2 330 км) любая территория в пределах зоны видимости станции ежедневно снимается, как минимум, один раз. Это позволяет использовать данные MODIS для решения разнообразных задач по регулярному мониторингу природных явлений в пределах крупного региона (контроль ледовой обстановки, наблюдение динамики снежного покрова, мониторинг лесных пожаров, паводковой ситуации, состояния посевов на с/х полях и т.п.).

Для доступа пользователей к данным MODIS, постоянно передаваемым со спутников в открытом широковещательном режиме DV на бесплатной основе, необходимо лишь наличие приемной станции X-диапазона.

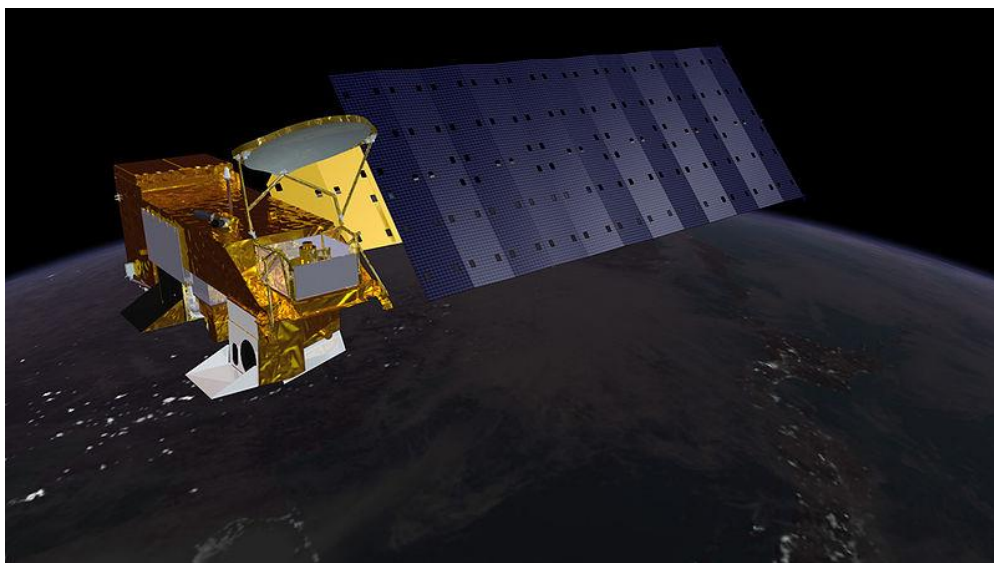


Рисунок 6 спутник Terra

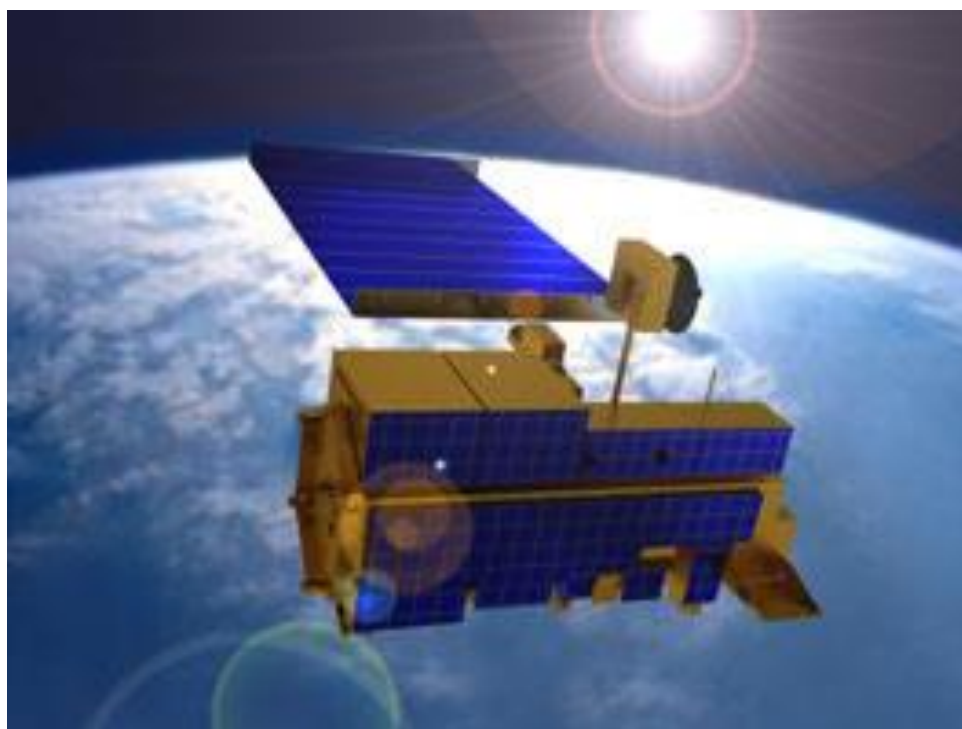


Рисунок 7 спутник Aqua

Таблица 2. Характеристики спектрорадиометра Modis

Номера каналов	Спектральный диапазон (мкм)	Пространств. разрешение (м)	Полоса обзора (км)	Повторяемость съемки одной территории (для одного спутника)
1-2	0,62 - 0,88	250	2300	1-2 раза в сутки, в зависимости от широты места съемки
3-7	0,46 - 2,16	500	2300	
8-19	0,41 - 0,97	1000	2300	
20-25	3,66 - 4,55	1000	2300	
26	1,36 - 1,39	1000	2300	
27-36	6,54 - 14,39	1000	2300	

За основу для статистического анализа были взяты данные о площади ледяного покрова за период с *1978 года по 2023 год* в Восточно-Сибирского моря с сайта NOAA, рисунок 8.

<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/regional-sea-ice/extent/ESiberian/0> [9]

Данные получены с помощью сенсоров SMMR, SSM/I, SSMIS.

Микроволновые радиометры, такие как SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer), SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) и SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder), являются спутниковыми инструментами, предназначенными для измерения электромагнитного излучения в микроволновом диапазоне. Эти инструменты используются для

наблюдения атмосферы, океана, ледяного покрова и других поверхностей Земли.

Микроволновые радиометры работают на основе принципа измерения микроволнового излучения, которое взаимодействует с объектами на поверхности. Различные частоты и каналы микроволновых радиометров позволяют получать информацию о различных параметрах, таких как температура поверхности, содержание влаги в атмосфере, концентрация льда и снега, а также другие геофизические параметры.

SMMR был установлен на спутнике Nimbus-7 и работал с 1978 по 1987 год. Он измерял микроволновое излучение в пяти каналах и предоставлял информацию о ледяном покрове и океанской поверхности.

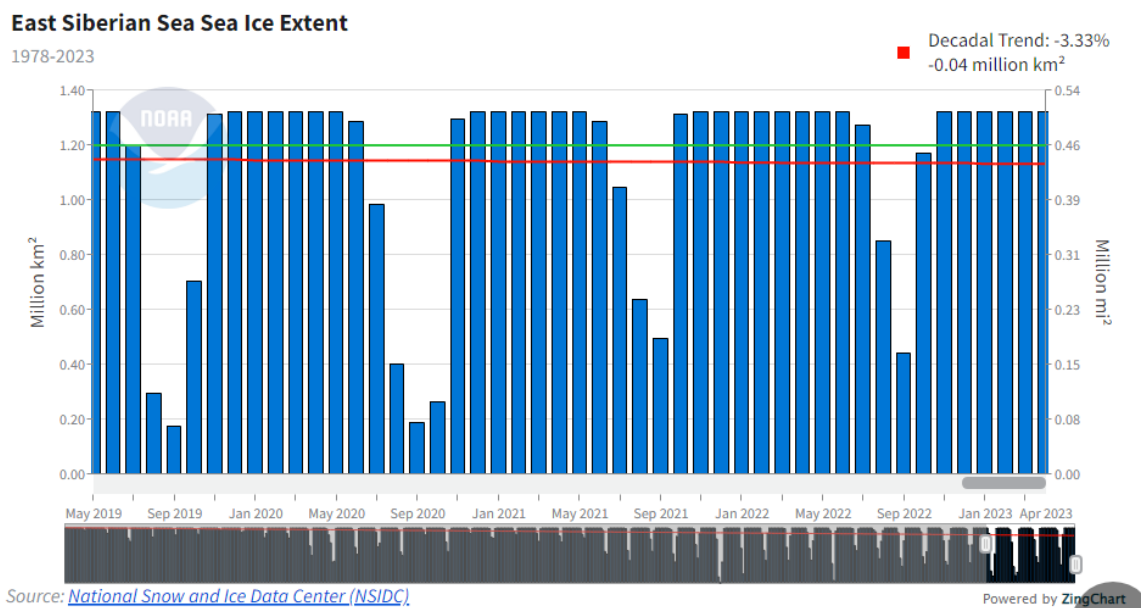
SSM/I был установлен на спутниках серии Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) и работал с 1987 по 2008 годы. Этот инструмент имел более высокое пространственное разрешение и включал восемь каналов для измерения параметров атмосферы, океана и ледяного покрова.

SSMIS является последней версией микроволнового радиометра, который был разработан для использования на спутниках серии DMSP и других спутников, таких как NOAA-19 и NOAA-20. Он включает 22 канала и обеспечивает более точные измерения температуры, влажности, облачности и других параметров атмосферы и поверхности Земли.

Данные, полученные с помощью этих микроволновых радиометров, широко используются в исследованиях ледяного покрова, климата, морских и атмосферных процессов. Они предоставляют ценную информацию о динамике изменений в ледяном покрове, а также о погодных условиях и климатических трендах в Арктике и других регионах.

Глава 3. Многолетние изменения площади ледяного покрова Восточно-Сибирского моря

Многолетние изменения площади ледяного покрова Восточно-Сибирского моря могут быть изучены с использованием доступных данных о ледяном покрове, включая спутниковые наблюдения и климатические



архивы. Эти данные позволяют анализировать тренды и изменения в площади ледяного покрова на протяжении нескольких лет или десятилетий.

Рисунок 8 Вид представленных данных наблюдений с сайта NOAA

3.1 Анализ тренда временного ряда площади ледяного покрова

Были собраны временные ряды данных о площади ледяного покрова в Восточно-Сибирском море из различных источников [9]. Данные были проверены на наличие выбросов, пропущенных значений и других аномалий. Пропущенные значения были заполнены с использованием подходящих методов, таких как интерполяция или среднее заполнение. Были устранены выбросы и аномалии, если они были обнаружены.

Для анализа тренда был сформирован дополнительный исходный ряд времени $t_i = i$, где $i = 1, 2, 3 \dots N$, где N – длина исходной реализации, а также ряд t_i^2 .

Рассчитаны характеристики линейного тренда как линейной регрессии: коэффициенты регрессии, коэффициент детерминации, коэффициент корреляции. Рассчитаны характеристики нелинейного тренда как множественной регрессии: коэффициенты регрессии и корреляционное отношение, его квадрат.

Оценена значимость каждого вида тренда путем оценки значимости коэффициента корреляции r или корреляционного отношения η .

Рассчитана величина тренда.

Построен график временного хода исходного ряда. На график нанесены рассчитанные значения линейного тренда.

Таблица 3 Регрессионная статистика для ряда t_i .

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0.42
R-квадрат	0.18
Нормированный R-квадрат	0.17
Стандартная ошибка	0.28
Наблюдения	132

Таблица 4. Дисперсионный анализ для ряда t_i .

Дисперсионный анализ				
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>
Регрессия	1	2.15	2.15	28.21
Остаток	130	9.89	0.08	
Итого	131	12.03		

Таблица 5. Коэффициенты регрессионной модели и t-критерии для среднемесячного ряда t_i .

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t- статистика
a(1)	1.20	0.05	24.96
a(2)	-0.0033	0.00063	-5.31

Проверка коэффициента корреляции на значимость.

Нулевая гипотеза $H_0: r = 0$; альтернативная $H_1: r \neq 0$. Для проверки этой гипотезы выбирается критерий Стьюдента, определяется его критическое значение $t_{кр}(\alpha, \nu) = 1,97$, где уровень значимости α принимается равным 5%, а число степеней свободы $\nu = N - 2$, где N - длина ряда.

Сравниваем t_1^* с $t_{кр}$, $t_1^* = 5.31 > t_{кр}$ нулевая гипотеза отвергается, коэффициент корреляции значим, т.е. линейный тренд вносит значительный вклад в формирование ряда.

Проверка коэффициентов регрессии на значимость:

Для линейного тренда, таблица 5., $t^*(a_1) = 24,96$ получилось больше $t_{кр}$ это значит, что нулевая гипотеза отвергается соответствующий коэффициент регрессии, значим.

Для линейного тренда, таблица 5., $t^*(a_2) = 5.31$ получилось больше $t_{кр}$ это значит, что нулевая гипотеза отвергается соответствующий коэффициент регрессии, значим. Исходя из этого, линейный тренд есть

Были построены графики временного ряда площади ледяного покрова для визуальной оценки наличия трендов или сезонных колебаний, см. рис. 9.

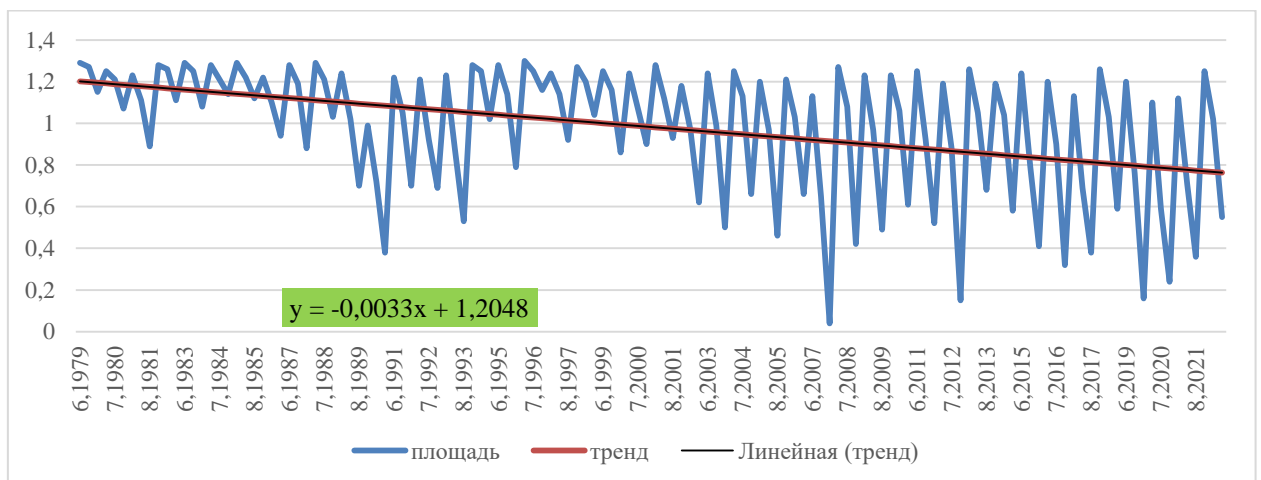


Рисунок 9 – Временная изменчивость площади льда в Восточно-Сибирском моря в период летней навигации с 1979 по 2023 год

Уравнение линейного тренда: $Tt = -0,0033ti + 1.2048$. На основании проверки на значимость коэффициента корреляции r , коэффициент детерминации $r^2 = 0,18$ характеризует значительный вклад тренда в общую дисперсию ряда. Характер тренда отрицательный, то есть происходит уменьшение площади ледяного покрова.

Статистическая значимость тренда: *Была проведена статистическая проверка значимости тренда с использованием t-теста. Это позволило определить, является ли тренд статистически значимым.*

Полученные результаты позволяют сделать выводы о характере тренда площади ледяного покрова в Восточно-Сибирском море. Коэффициент наклона отрицательный и статистически значимый, это указывает на уменьшение площади ледяного покрова.

Аналогичная проверка была произведена для ряда за весь период наблюдений результат которой представлен на рисунке 10.

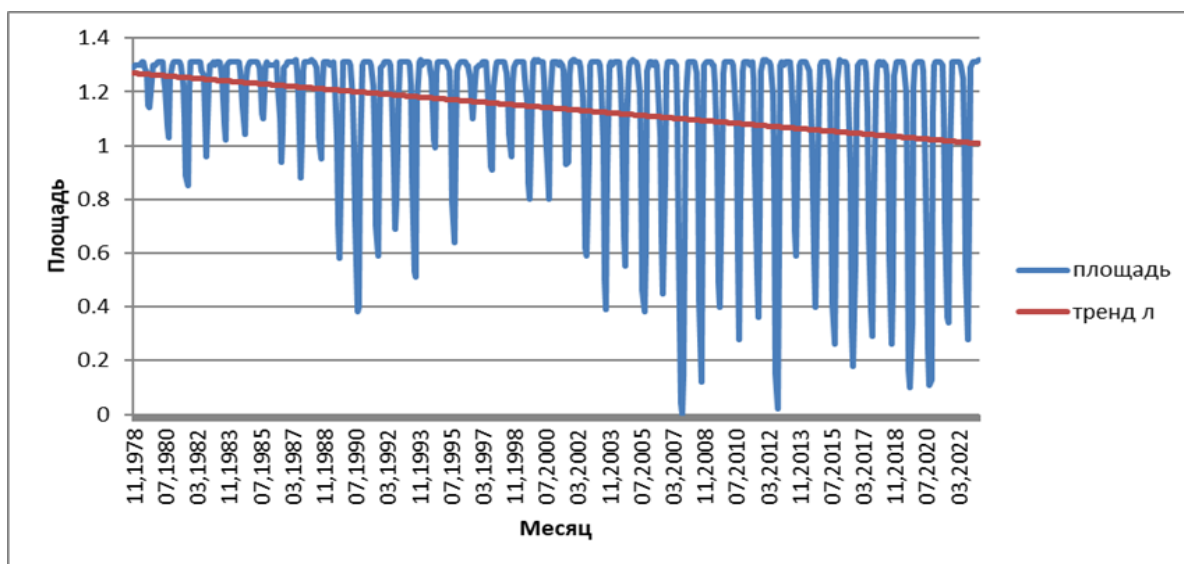


Рисунок 10 – Временная изменчивость площади льда в Восточно-Сибирском море за весь период наблюдения с 1979 по 2023 год

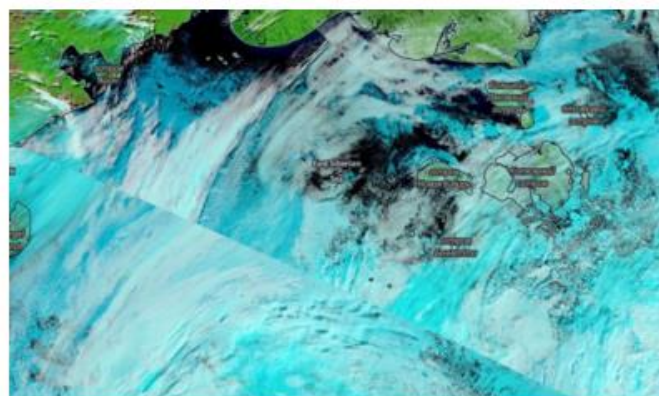
Глава 4 Современное состояние и динамика ледяного покрова в Восточно-Сибирском море

Для описания состояния и динамики ледяного покрова В Восточно-Сибирского моря были отобраны спутниковые снимки, рисунок 11, за последние десять лет с 2012-ого года по 2022 год.

В настоящее время можно наблюдать что с начала июня и до конца сентября в Восточно-Сибирском море происходит активное таяние ледяного покрова и очищение моря ото льда под влиянием тепловых и динамических процессов[12]. Очагом очищения являются приустьевые области рек



26.06.2016



16.07.2016



06.08.2016

Рисунок 11 серия спутниковых снимков спекторорадиометра Modis

Индигирка и Колыма, которые оказывают существенное влияние на ледовый режим мелководного западного района моря. Пример на рисунке 11, Снимки представлены как в естественных так и псевдоцветах - сочетание каналов 7-2-1

Очищение моря ото льда происходит медленнее, чем в других арктических морях. Скорость очищения увеличивается незначительно в июле после окончательного взлома припая.

В Восточно-Сибирском море процесс разрушения припая начинается в прикромочной зоне в конце мая или начале июня. Постепенное разрушение припая происходит в течение двух месяцев, и окончательно припай разрушается в конце июля, иногда в начале августа.

В течение июня граница припая отступает от берегов относительно медленно, и большая его часть разрушается и становится дрейфующим льдом в начале июля. Это видно на рисунке 11.

Таблица 6. Даты вскрытия припая

год	Пролив Санникова	Подходы к проливу Дм. Лаптева	Участок Реки Колымы-О. Айон
2012	06.27	06.06	06.21
2013	08.01	07.07	07.07
2014	07.07	07.07	07.23
2015	6.26	06.19	07.05
2016	06.04	06.19	07.10
2017	07.14	05.25	06.24
2018	07.20	05.25	07.20
2019	07.10	06.27	06.27
2020	01.06	06.06	07.06
2021	07.03	06.21	07.03
2022	07.01	06.30	07.01

По сравнению с данным до 2007 года[2], как можно заметить, за последние 10 лет произошло уменьшение сроков вскрытия припая в среднем от 5 до 10 дней, в зависимости от района исследования, таблица 1. С такой динамикой, в ближайшем будущем, можно будет наблюдать полное освобождение акватории Восточно-Сибирского моря от льда в летнее время.

Таблица 7. Характеристика сроков взлома припай в районах Восточно-Сибирского моря за период 2012-2022 гг.

Район моря	сроки взлома			размах колебаний, сутки
	ранние	средние	поздние	
Подходы к проливу Санникова	25 V	30 VI	1 VIII	36
Пролив Санникова	24 VI	10 VII	8 VIII	37
Участок Реки Колымы-О. Айон	21 VI	01 VII	23 VII	32

Восточно-Сибирское море является весьма сложным районом для плавания судов. Оно характеризуется мелководностью, слабой изученностью

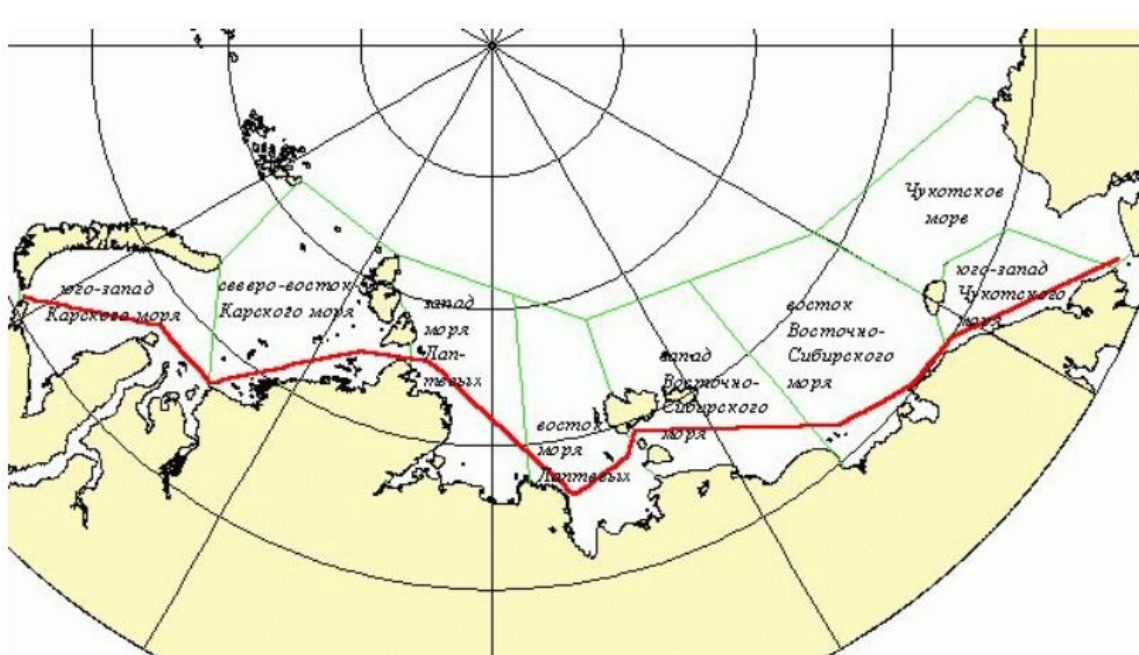


Рисунок 12 Навигационно-географический очерк трассы СМП [16]

(кроме прибрежной зоны), почти постоянным наличием сплоченного льда и частыми туманами летом. Планирование пути в прибрежной зоне зависит от наличия льда и опасных глубин, а в открытом море - от степени сплоченности льда и наличия опасных глубин. Непосредственное руководство морскими операциям и осуществляет Штаб Востока, который базируется в порту Певек.

Штаб Востока занимается выбором наиболее безопасного маршрута в зависимости от ледовых условий, определением возможности самостоятельного плавания, организацией ледокольной проводки и авиационной ледовой разведки, а также контролирует предоставление судам необходимой метеорологической, ледовой и навигационной информации.

При плавании по основным рекомендованным маршрутам от пролива Дмитрия Лаптева до пролива Лонга можно определить местоположение судна с точностью 1-2 километра при помощи космических систем навигации.

Условия для определения места с помощью радиолокационных систем (РЛС) в разных частях Восточно-Сибирского моря различаются. В проливе Дмитрия Лаптева условия для радиолокационного определения места удовлетворительные, в то время как в проливе Санникова, РЛС может дать только общую ориентировку. Для надежного определения местоположения судна с помощью РЛС можно использовать почти весь берег восточнее устья реки Колыма до острова Айон и, за некоторыми исключениями, гористое побережье от порта Певек до мыса Якан.

Для описания состояния ледяного покрова в Западной части Восточно-Сибирского моря были определены периоды с наиболее суровыми и благоприятными условиями для навигации.

Суровые ледовые условия в западной части Восточно-Сибирского моря могут представлять серьезные препятствия для плавания. В зимний период вся морская поверхность покрывается обширным ледяным покровом, довольно толстым и особенно крепким на севере. Весной происходит таяние льда, и на море образуются огромные ледовые глыбы, которые могут достигать нескольких метров в высоту и ширину, с различными опасностями для судов, такими как проталины и разломы, которые могут привести к авариям. Продолжительность ледового периода также может быть существенной, что затрудняет прохождение судов в регионе. К тому же, в зоне Восточно-Сибирского моря часто происходят сильные снежные бури и

штормы, что увеличивает сложность плавания и уменьшает видимость судоводителям. Наконец, некоторые участки моря могут быть опасными для плавания из-за наличия подводных льдов, которые могут повредить корпус судна. Кроме того, низкие температуры могут представлять угрозу для жизни и здоровья экипажа и пассажиров судна, поэтому необходимо строго соблюдать все меры предосторожности при плавании в данном регионе.

Суровые условия представлены на рисунках 12-14



Рисунок 13 06.06.2013 Наблюдения суровых ледовых условий за период 2012-2022 г.

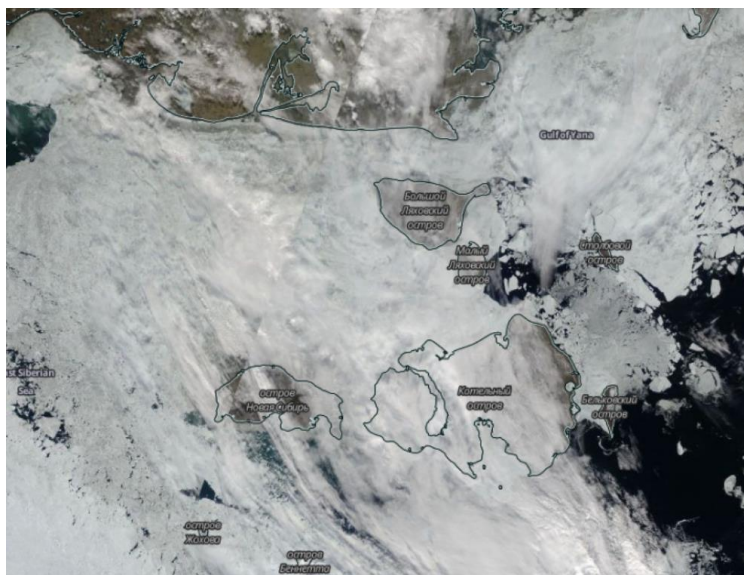


Рисунок 14 10.07.2013 Наблюдения суровых ледовых условий за период 2012-2022 г.

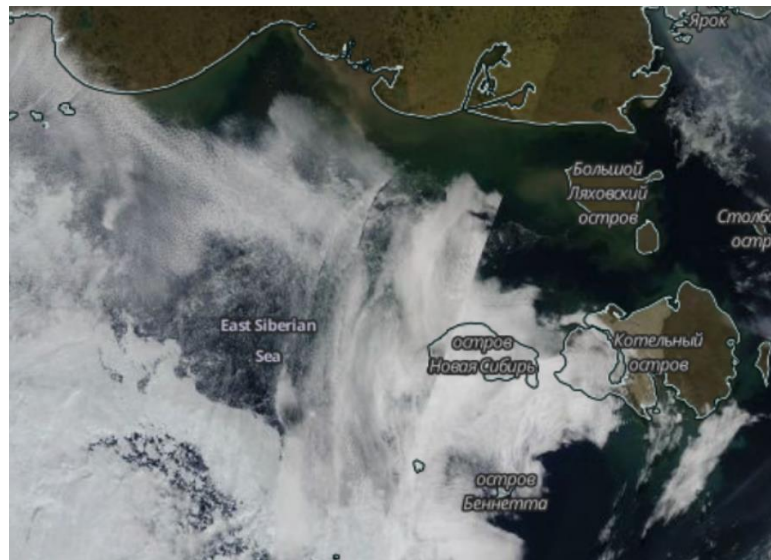


Рисунок 15 11.08.2013 Наблюдения суровых ледовых условий за период 2012-2022 г.

Благоприятное формирование ледовых условий, пример на рисунке 16-17, для навигации в восточно-сибирском море связано с несколькими факторами. Во-первых, это может быть связано с погодными условиями, например, с высокой температурой воздуха и воды, которые способствуют быстрому таянию льда.

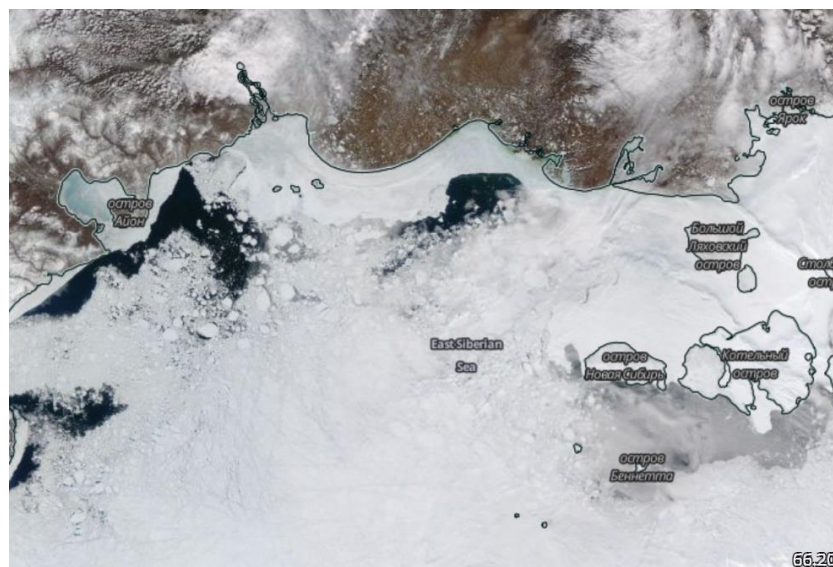


Рисунок 16 01.06.2020 Наблюдения лёгких ледовых условий за период 2012-2022 г.

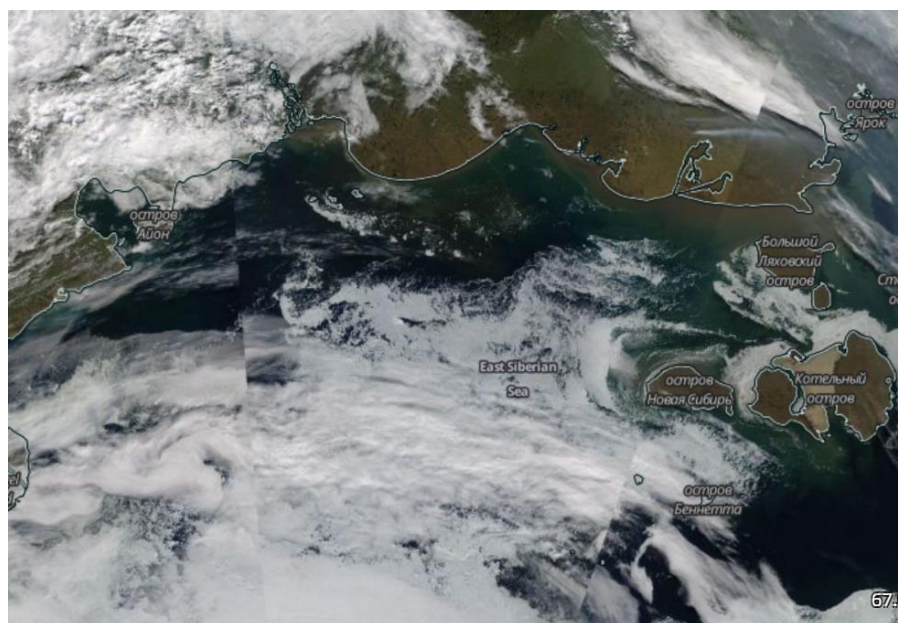


Рисунок 17. 13.07.2020 Наблюдения лёгких ледовых условий за период 2012-2022 г.

Во-вторых, благоприятные ледовые условия можно получить благодаря ветру. Ветер, который дует над большим водным пространством, может сдвигать ледовые поля и снижать их плотность, что позволяет судам проходить сквозь них.

Также важным фактором является подводный рельеф. В областях, где на дне мелководье, лед обычно гораздо тоньше и лучше расщепляется, что облегчает навигацию.

Наконец, использование ледокольных судов может значительно помочь в создании благоприятных ледовых условий для навигации в восточно-сибирском море. Ледокольные суда могут проходить сквозь толстый лед и открывать проходы для других судов.

В целом, благоприятные ледовые условия в восточно-сибирском море могут сложиться благодаря сочетанию различных факторов, и моряки и капитаны судов должны быть готовы к различным ситуациям и обладать необходимыми знаниями и опытом, чтобы эффективно справляться с ледовыми условиями и гарантировать безопасность плавания.

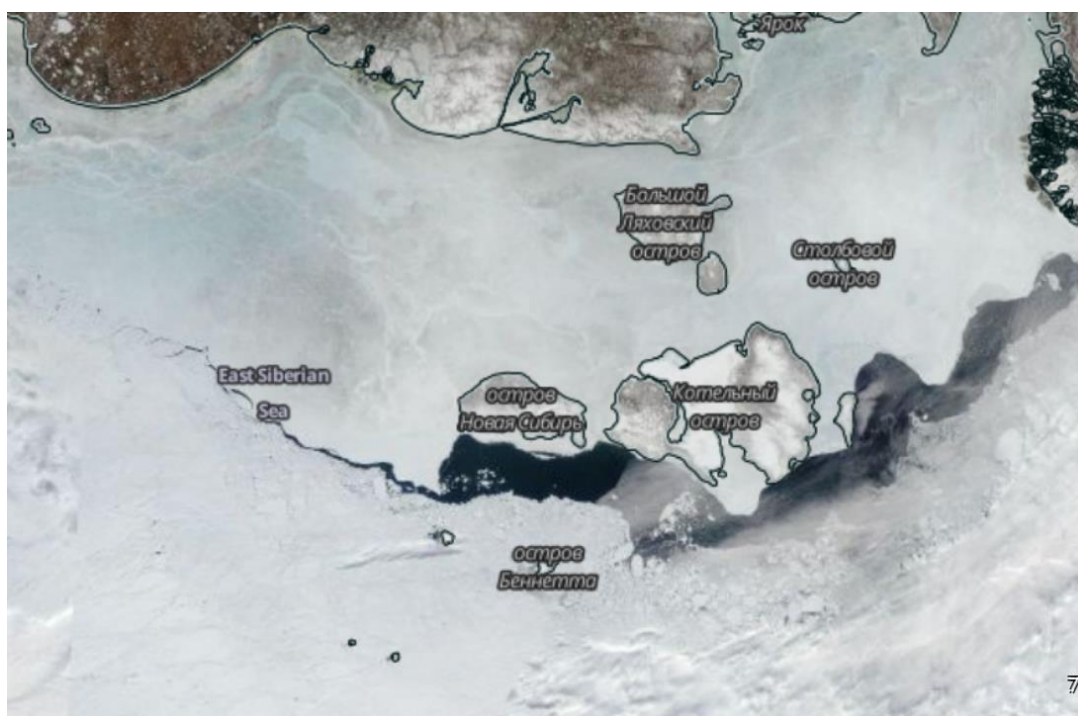
Можно заметить, по рисункам 13-17, что состояние ледового покрова могут сильно отличаться в зависимости от года исследования. Так в 2013 году отмечались не благоприятные ледовые условия, на снимках видно, что

большая часть акватории была покрыта льдом вплоть до конца июля. Ледяные массивы присутствовали вплоть до конца навигации. В середине наблюдался дрейф очень сплочённого (до 9 баллов) льда. В 2020 можно заметить, что проливы в районе Новосибирских островов были освобождаются от льда к началу июля, а к концу июля весь морской путь освобождается от льда

4.1 Западная часть Восточно-Сибирского моря

В западной части Восточно-Сибирского, Рисунок 18, моря много крупных и мелких островов, которые создают дополнительные препятствия для плавания. Один из таких островов – остров Котельный – имеет длину более 100 км и является одним из самых больших в архипелаге Новосибирские острова.

Западная часть Восточно-Сибирского моря имеет большое значение для международной навигации и исследований Арктики, т.к. здесь находится одна из самых крупных континентальных полок льда, которая имеет важное значение для системы мирового климата.



Припай

Припай является одним из ключевых факторов, влияющих на ледовый режим западной части Восточно-Сибирского моря, поэтому мониторинг его состояния играет важную роль для прогнозирования климатических изменений и организации безопасного плавания в холодное время года.

Весной, когда начинается таяние льда, припай начинает разрушаться и расседаться, а ледовые пластины постепенно отдаляются от береговой линии. Этот процесс происходит под воздействием атмосферных осадков, температурных изменений, приливов и отливов.

Дрейфующий лёд

Дрейфующий лед в западной части Восточно-Сибирского моря имеет довольно сложную динамику, которая зависит от многих факторов, таких как направление и сила ветра, приливно-отливные процессы и температурный режим воздуха и воды[6].

В районе острова Котельный дрейфующий лед меняет свое состояние в зависимости от времени года. В зимний период ледовый покров плотно покрывает морскую поверхность, препятствуя прохождению судов. Весной происходит таяние льда, и на море появляются огромные ледяные глыбы, которые могут быть опасными для судов.

В период летней навигации дрейфующий лед вокруг острова Котельный постепенно расходуется. Средняя температура воздуха поднимается, а таяние льда ускоряется. Отдельные куски льда, находящиеся вблизи берегов Котельного, сохраняются дольше и могут представлять опасность для судов. Но в середине июля до начала августа начинается формирование свободной акватории моря Лаптевых, и дрейфующие ледяные поля выделяются на поверхности моря[6].

Кроме того, направление дрейфа льда в районе острова Котельный также зависит от направления ветра и силы приливов и отливов. в последние годы наблюдается ускоренное оттаивание льда и его таяние на большей территории, что свидетельствует о климатических изменениях в регионе. Это приводит к увеличению открытых водных пространств и повышению активности летней рыбной ловли, а также увеличению проникновения теплых вод в Восточно-Сибирское море, что может повлиять на развитие морской фауны и флоры в регионе.

4.2 Восточная часть Восточно-Сибирского моря

Состояние ледового покрова в восточной части Восточно-Сибирского моря может быть охарактеризовано как переменное и зависящее от времени года и погодных условий. Обычно ледовый покров в этом регионе формируется в конце осени и достигает своего максимума в зимние месяцы.

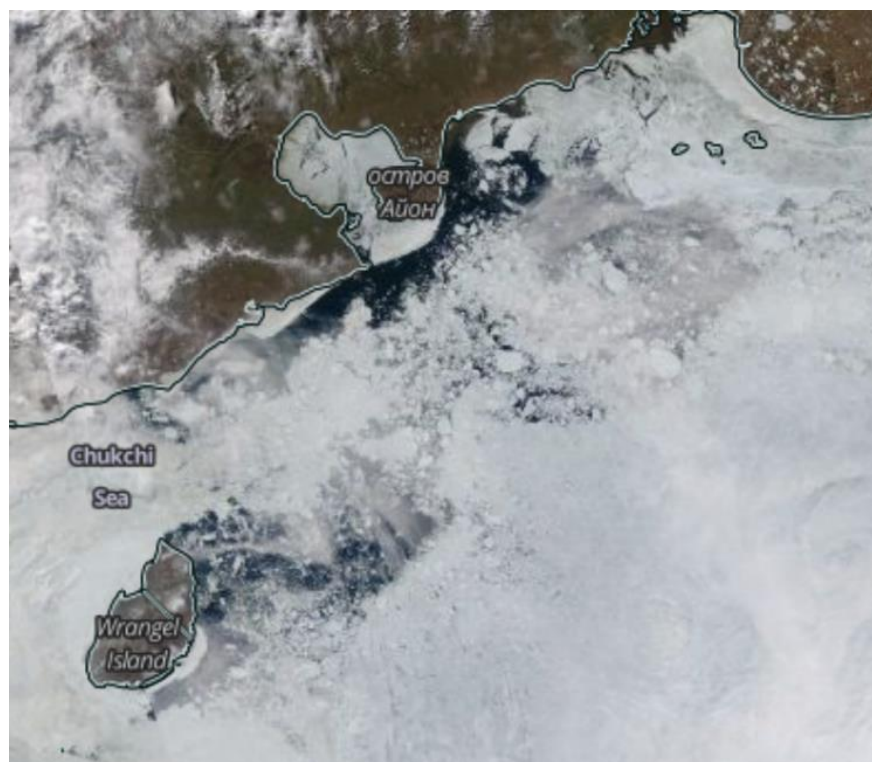


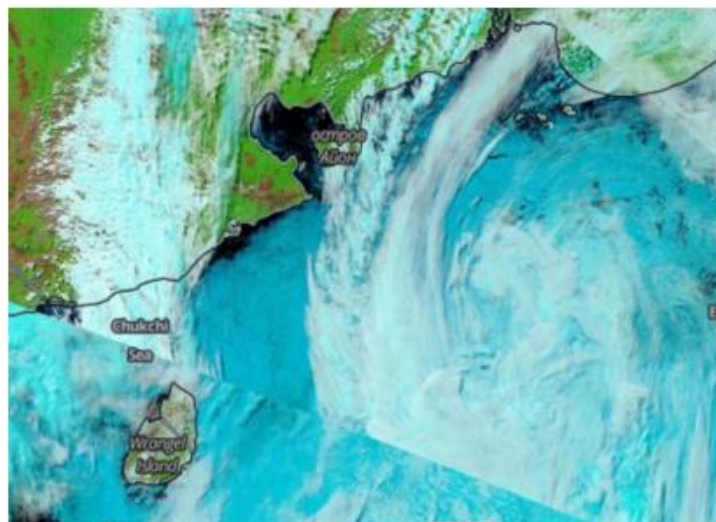
Рисунок 19 Снимок восточной части Восточно-Сибирского моря

В зимний период ледовый покров может достигать толщины до 1,5-2 метров. Он состоит из двух слоев: верхнего - тонкого и зеркального, называемого припаем, и нижнего - более массивного и белого, называемого рубцом. Припай формируется в результате замерзания верхнего слоя воды, а рубец - из глубины моря, где температура воды не опускалась до нуля градусов.

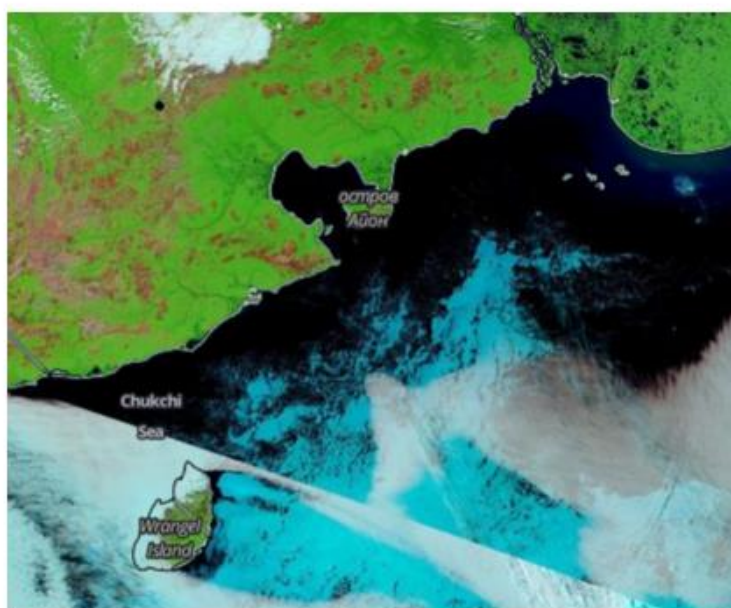
Весной и летом, под воздействием тепла и ветра, ледовый покров начинает таять и распадаться на отдельные куски. В июле-августе обычно происходит полное оттаивание льда, и море освобождается от ледового



06.06.2016



02.07.2016



04.08.2016

Рисунок 20 серия спутниковых снимков спектрометра Modis
покрова.

Однако, в последние годы, заметно сокращается площадь ледового покрова, что связано с изменением климата и глобальным потеплением. Это может привести к серьезным последствиям для экосистемы Восточно-Сибирского моря и рыболовства в этом регионе.

Припай

Процесс постепенного взлома припая происходит в течение двух месяцев и завершается в конце июля, иногда в начале августа. На изображении (рис. 19) показано динамика разрушения припая.

В июне граница припая движется относительно медленно, а большая его часть разрушается и становится дрейфующим льдом в течение июля.

Как уже было отмечено, наблюдается ускорение разрушения припая в летние месяцы.

Дрейфующий лёд

Зачастую лед в восточной части моря разрушается раньше чем в западной части, следствием этого являются крупные скопления сплоченного льда на участке бар реки Колымы до острова Айон.

При интенсивном разрушении льда, например как в 2020 году, весь лед выносит на северо-запад, не оставляя крупных скоплений. Главным образом дрейфующий лед не препятствует мореплаванию.

Сохранение такой динамики может позволить увеличить длительность навигации через Восточно-Сибирское море.

Заключение

Из исследования научных источников и анализа спутниковых данных следует, что в период июнь-начало июля на острове Котельный возникает

опасная ледовая обстановка. На данном этапе остров полностью окружен льдом, а значения плотности льда достигают примерно 10 баллов. Однако, начиная с середины июля и до начала августа, море Лаптевых освобождается ото льда, и становится возможным отслеживать перемещение дрейфующих ледяных полей. В этот период значения плотности льда в прибрежных зонах составляют около 8-9 баллов. К концу августа западная часть моря также становится свободной. Не следует забывать, что в 2013 году ледовые условия были еще более суровыми в летний период.

Анализ данных, полученных с помощью спутников, имеет важное значение для изучения распространения ледяного покрова в период летней навигации. Он позволяет оценить изменения площади и состояния морского льда в течение этого периода. Таким образом, полученные с помощью спутников данные полезны для обеспечения безопасности судоходства по Северному морскому пути и показывают дальнейшие перспективы развития этого направления.

Список использованных источников

1. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М., Изд-во МГУ, 1982 г. С ил., 192 с
2. Наблюдения за ледовой обстановкой: Учебное пособие. - СПб.: ГУ "ААНИИ", 2009. - 360 с.

3. Думанская, И. О. Ледовые условия морей азиатской части России Думанская И.О. / И. О. Думанская. - М.:Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2017. - 640 с.
4. Сычѳв В.И. Практическое использование спутниковых изображений по результатам дистанционного зондирования Земли из Космоса. // Ч.4. Введение в анализ спутниковых данных с помощью интегрированной системы анализа спутниковых изображений ЮНЕСКО БИЛКО. – Майкоп: – 2016. – 84 С.
5. Карелин И.Д. Карклин В.П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX- началеXXI века. СПб,: ААНИИ, 2012.180 с.
6. Миронов Е.У., Кузнецов И.М. Некоторые особенности пространственной неравномерности толщины неподвижного и дрейфующего льда. Сб. Исследования ледовых условий Арктических морей, методы расчета и прогноза// Тр. ААНИИ. 1990. Т. 423.
7. Юлин А.В., Шаратунова М.В., Павлова Е.А., Иванов В.В. Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря// Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. №3.
8. EOSDIS Worldview [электронный ресурс] - режим доступа: URL <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> .
9. National Centers for Environmental Information [электронный ресурс] - режим доступа: URL <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/regional-sea-ice/extent/ESiberian/0>
10. Алексеев Г.В., Александров Е.И., ГлокН.И., ИвановН.Е., Харланенкова Н.Е., Юлин А.В. Эволюция площади морского ледяного покрова Арктики в условиях современных изменений климата, Журнал РАН "Исследование Земли из космоса", № 2, 2015;
11. Малинин Н.В. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник. – СПб.: изд.РГГМУ, 2008. – 408 с.

12. ЕСИМО: Обзорные карты состояния ледяного покрова Северного Ледовитого Океана ААНИИ [электронный ресурс] – электронные графические данные – режим доступа: URL <http://www.aari.ru/projects/ESIMO/index.php>.

13. Оптико-электронные спутниковые системы дистанционного зондирования Земли на сайте компании Совзонд [электронный ресурс]: – URL: <https://sovzond.ru/products/spatial-data/satellites/#sat-336>.

14. Сычев В.И. Коморина И.Ю., Шишин В.Ю. Информационное обеспечение сведениями о ледовой обстановке арктических морей по многозональным спутниковым данным. // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право: Сб. тр. Международной научно-практической конференции «Инфогео 2015» / Вып. 2 (16). – СПб.: ООО «Андреевский издательский дом» – 2015. С. 68-69.

15. Руководство для сквозного плавания судов по Северному морскому пути. – С.П-б: Изд. ГУНИО МО РФ, 1995, 415 с.

16. ЕСИМО: Трасса Северного Морского пути и границы морей Арктики [электронный ресурс] - режим доступа: URL: http://esimo.oceanography.ru/esp2/index/index/esp_id/15/section_id/9/menu_id/39