



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)

«Особенности ледовой обстановки в проливе Бориса Вилькицкого в
период летней навигации»

Исполнитель: Дубинин Егор Сергеевич

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)

«10» июня 2024г.

г. Санкт-Петербург

2024

Содержание:

Введение.....	3
1. Географическое положение.....	4
1.1. Физико-географическая характеристика района исследования.	5
1.1.2. Карское море.....	5
1.1.3. Море Лаптевых.....	5
1.1.4. Особенности ледовых условий в Карском море	6
1.1.5. Нарастание льда в Карском море.....	6
1.1.6. Припай в Карском море.....	7
1.1.7. Особенности ледовых условий в северо-восточной части Карского моря.....	7
1.1.8. Очищение ото льда северо-восточной части Карского моря.....	9
1.1.9. Особенности ледовых условий в море Лаптевых.	10
1.1.10. Нарастание льда в море Лаптевых.....	10
1.1.11. Припай в море Лаптевых.....	11
1.2. Течения.....	11
2. Методы исследования и обработки исходных данных.....	12
2.1. National Centers for Environmental Information (NOAA)	12
2.2. SIOWS:Arctic	12
2.3. Worldview.....	13
3. Исследование ледовой обстановки в проливе Вилькицкого.....	14
3.1. Обзор хода площади льда в Карском море и море Лаптевых в период с 2013-2023 в период летней навигации с помощью данных с NOAA.....	14
3.2. Обзор сплочённости льда в проливе Вилькицкого и близлежащих акваторий. Изображения взяты с SIOWS:Arctic.....	19
3.3. Обзор ледовой обстановки в проливе Вилькицкого и его окрестностях.....	25
3.4. Дрейф и распределение айсбергов	33
3.5. Сравнение хода площади льда и температуры атмосферы в период с 2013 – 2023 г. Проверка трендов на значимость.....	37
Список использованной литературы:.....	41

Введение.

Пролив Вилькицкого, расположенный в Арктическом бассейне и соединяющий Карское море с морем Лаптевых, является важным участком Северного морского пути (СМП). В последние годы СМП становится всё более востребованным, наблюдается рост интенсивности судоходства в его акватории. Несмотря на огромный потенциал развития судоходной магистрали и её востребованность, главной сложностью осуществления навигации по СМП являются тяжёлые ледовые условия Арктического региона. Особое положение пролива Вилькицкого, требует особого внимания к процессам, которые связаны со льдом и формируют ледовую обстановку. Информация о ледовой обстановке является важной, как для маршрутов, по которым ходят суда, так и непосредственно для представления общей картины изменения ледовых условий в данном районе. В период летней навигации, когда ледовые условия становятся менее предсказуемыми, изучение ледовой обстановки в проливе Вилькицкого приобретает особое значение для безопасности судоходства. Летняя навигация, в среднем, в Карском море начинается с конца июня–начала июля, а в море Лаптевых с начала июля–конца июля.

В ходе работы были рассмотрены актуальные проблемы, связанные с изменением климата и его влиянием на ледовые условия в районе исследования. Анализ полученных данных позволил выявить возможные риски для судоходства в данном регионе.

Целью работы является исследование ледовой обстановки в проливе Вилькицкого в период летней навигации за 44 года с учётом межгодовой изменчивости температуры воздуха. Отдельно за 4 года был сделан подробный обзор ледовой обстановки по спутниковым данным.

В задачи работы входит:

- описание физико-географических и климатических особенностей района исследования;

- обзор ледовой обстановки с помощью спутниковых изображений, данных по площади льда и сплочённости в проливе и прилегающих морей;
- расчет площади льда в проливе с помощью полученных снимков;
- сравнение данных по площади льда и температуры атмосферы, проверка трендов на значимость;
- заключение

1. Географическое положение.



Рис. 1 Расположение пролива [14].

Пролив Вилькицкого – район Арктики, находящийся между морем Карским и морем Лаптевых, был открыт в 1913 г. русской гидрографической экспедицией на судах “Таймыр” и “Вайгач”. Пролив получил название в честь ее начальника – русского морского офицера и гидрографа Б.А. Вилькицкого. [1]

На Севере граничит с островом Большевик (архипелаг Северная Земля), а на юге с полуостровом Челюскин. В проливе имеются острова Гейберга, остров Старокадомского, остров Малый Таймыр и острова

Комсомольской Правды. Длина пролива около 104 км, ширина в самом узком месте 56 км, глубина от 32 до 210 м.

1.1. Физико-географическая характеристика района исследования.

1.1.2. Карское море

Карское море с трех сторон является открытым морем. В летнее время в него стекает большой объем талых вод с окружающих островов, а с юга в него впадает множество рек, в том числе таких как Обь и Енисей. Часть стоковых вод тонким поверхностным слоем выносятся из Карского моря течением Литке через северную часть пролива Карские Ворота в Баренцево море, а часть вод через пролив Вилькицкого в море Лаптевых.

Водообмен морей Карского и Лаптевых проходит через проливы в архипелаге Северная Земля и, в большей степени, между полуостровом Таймыр и о. Большевик через пролив Вилькицкого. Другие проливы между островами архипелага, например, Шокальского и Красной Армии, значительно меньше по размерам, основную часть года промерзают практически по всему столбу воды и их роль в водообмене между морями невелика. Карское море в наибольшей степени из всех морей Арктики подвержено воздействию речного стока [2].

Карское море – окраинное море Северного Ледовитого океана, большую часть года оно покрыто сплошным ледяным покровом. В юго-западной части моря лёд наблюдается в течение 7-8 месяцев, с ноября по июнь-июль, в то время как северо-восточная часть моря в летний период полностью не очищается ото льда.

1.1.3. Море Лаптевых.

Море Лаптевых свободно сообщается с Арктическим бассейном. Его граница условно проходит от мыса Арктический до точки пересечения меридиана северной оконечности о. Котельный. Западная граница, которая нам интересна, проходит от мыса Арктический по восточным берегам

островов Северная Земля, затем по восточной границе пролива Вилькицкого и далее по материковому берегу до вершины Хатангского залива [3].

Почти девять месяцев (октябрь-июнь) ледяной покров полностью покрывает море Лаптевых. Устойчивое ледообразование в море начинается вблизи его северных границ в среднем в первых числах сентября и постепенно распространяются к югу. Западная часть моря замерзает более интенсивно, чем восточная, так как здесь ледообразование распространяется в южные прибрежные районы западной части моря, а 5-7 октября замерзает район вблизи дельты реки Лены, до этого времени остававшийся свободным от первичных видов льда. Таким образом, в среднем всё море замерзает в течении одного месяца.

1.1.4. Особенности ледовых условий в Карском море

Ледообразование в Карском море начинается в конце августа - в начале сентября на северной границе моря чаще всего среди остаточных льдов. К концу сентября ледообразование распространяется большинство районов северо-восточной части моря. Процессы ледообразования одновременно охватывают большие акватории, и в первой десятидневке октября на всей акватории северо-восточной части моря наблюдаются начальные виды льдов [3].

Таким образом, в среднем, полностью море замерзает в течение двух месяцев и 20 дней. При этом половина этого срока приходится на юго-западную часть моря по площади в 1,5 раза меньшей. Причиной этого обстоятельства является как летний прогрев вод этого района, так и заток в море более теплых баренцевоморских вод через пролив Карские ворота, в соответствии с которым изохроны средних сроков устойчивого ледообразования в море имеют дугообразную форму, выгнутую к северу.

1.1.5. Нарастание льда в Карском море.

Одновременно с распространением процессов ледообразования происходит нарастание толщины льда в море. Уже в середине октября в северо-восточной части моря только 17% акватории свободно ото льда, 60% площади занимают молодые льды (до 30 см), 15% однолетние тонкие льды (30-70 см) и на севере района появляются однолетние средние льды (70-120 см). В это же время только на 40% акватории юго-западной части моря появляются молодые льды, на остальной части района ледообразование еще не началось. В конце периода нарастания ледяного покрова, в мае, большую часть акватории моря занимают однолетние толстые льды (толщиной более 120 см); 80% этих льдов находится в северо-восточной части и 60% - в северных районах юго-западной части моря. Однолетние средние льды (70-120 см) занимают южные районы юго-западной части моря [3].

1.1.6. Припай в Карском море.

При достижении молодым льдом толщины 10-30 см вдоль материкового и островного побережий моря образуется припай. В период наибольшего его развития мористая граница припая проходит в пределах изобат 10-20 м.

Становление припая в Карском море может происходить в период от конца сентября на севере моря до конца января вблизи амдерминского побережья и острова Вайгач. По данным спутниковых наблюдений, многолетний разброс сроков становления припая в районах Карского моря составляет от 4 до 8 недель. Средняя дата становления припая в большинстве районов моря мало обеспечена [3].

1.1.7. Особенности ледовых условий в северо-восточной части Карского моря.

Процесс ледообразования охватывает огромные площади моря. В течение одной декады молодой лед может покрыть не только всю северо-восточную часть Карского моря, но и море Лаптевых, Восточно-Сибирское море и южную часть Чукотского моря. Значительно более медленно, в

течение двух-трех декад, проходит ледообразование в юго-западной части Карского моря в результате влияния Атлантики. Аналогично оказывает замедляющее действие на ледообразование в центральной части Чукотского моря Тихий океан.

Ледовые условия юго-западной и северо-восточной части Карского моря сильно отличаются:

- толщины льда в северо-восточной части в момент наибольшего развития льда в полтора раза больше, чем в юго-западной части;
- в июле-августе интенсивность уменьшения площади, занятой льдом, в юго-западной части составляет 50% в месяц, а в северо-восточной - 25% в месяц;
- повторяемость полного очищения юго-западной части моря ото льда в сентябре составляет 84%, а северо-восточной части 3%;
- юго-западная часть моря очищается ото льда в среднем на 4 декады, а северо-восточная часть моря - на 1-2 декады.
- совпадение знака аномалии средней за ледовый сезон площади сплоченных льдов в юго-западной и в северо-восточной частях моря составляет 52% - это наименьший показатель совпадения для любых двух соседних арктических морей.

Такая существенная разница в ледовом режиме двух частей моря объясняется влиянием на его юго-западную часть теплых атлантических воздушных масс и поступлением теплых баренцевоморских вод через проливы Карские Ворота и Югорский Шар. Кроме того, протяженность юго-западной и северо-восточной частей Карского моря очень велика, расстояние между их центрами составляет около 800 км, что сопоставимо с характерным диаметром барических систем в Арктике. Располагающийся над Карским морем циклон (или антициклон) вызывает противоположно направленные воздушные переносы над юго-западной и северо-восточной частями моря.

Низкие температуры, а также мелководность южного и восточного районов северо-восточной части Карского моря с обилием отдельных островов и архипелагов способствуют развитию мощного припая. Его площадь в марте составляет в среднем 23% площади северо-восточной части моря, и это значительно больше, чем площадь, занятая припаем, в юго-западной части моря (в среднем - 10% от площади юго-западной части).

1.1.8. Очищение ото льда северо-восточной части Карского моря.

Таяние льда и очищение северо-восточной части моря происходит медленнее, чем юго-западной части моря. Снежницы, являющиеся первым признаком начала таяния, образуются уже при температуре воздуха $-1,2^{\circ}\text{C}$, такая температура наблюдается в июне.

Взлом припая в среднем начинается в конце мая - начале июня со стороны его кромки. Во второй половине июня конфигурация припая уже существенно отличается от майской.

Положение границ припая в конце июля сильно изменяется от года к году. Если в конце мая средняя площадь припая в северо-восточной части Карского Моря равна 106,3 тыс. км², максимальная площадь составляет 151,2 тыс. км², а минимальная - 41,0 тыс. км², то к концу июля средняя площадь припая сокращается до 41,1 тыс. км² (при значениях максимальной площади - 99,0 тыс. км², минимальной площади 0,6 тыс. км²). [3]

Припай в проливе Вилькицкого взламывается ежегодно. По результатам исследований: средняя многолетняя дата взлома припая в проливе Вилькицкого – 31 июля, самый ранний взлом приходится на первую декаду июля самый поздний на середину сентября. Самые поздние сроки разрушения припая относятся к периоду с 1960-1980 гг., в это время разрушение происходило в среднем в первой декаде августа. Наиболее ранние сроки разрушения припая относятся к периоду 2006-2010 гг., в это время разрушение припая происходило в среднем в середине июля.

В XXI веке происходило быстрое сокращение площади, занятой в конце летнего периода во всей Арктике. Минимум ледовитости Арктики был зафиксирован в 2012 году 3,37 млн. кв. км при среднем значении более 6 млн. кв. км. Это связано с потеплением климата.

Следует отметить, что суровость прошедшей зимы все-таки тоже существенно сказывается на ледовитости северо-восточной части Карского моря в теплый период. Так, коэффициенты корреляции между среднемесячными значения ледовитости в августе и сентябре и СГДМ в районе м. Стерлегова близки к 0,5 [3].

1.1.9. Особенности ледовых условий в море Лаптевых.

Почти девять месяцев (октябрь-июнь) ледяной покров полностью покрывает море Лаптевых. Устойчивое ледообразование в море начинается вблизи его северных границ в среднем в первых числах сентября и постепенно распространяются к югу. Западная часть моря замерзает более интенсивно, чем восточная, так как здесь ледообразование распространяется в южные прибрежные районы западной части моря, а 5-7 октября замерзает район вблизи дельты реки Лены, до этого времени остававшийся свободным от первичных видов льда. Таким образом, в среднем всё море замерзает в течении одного месяца.

1.1.10. Нарастание льда в море Лаптевых.

Нарастание льда. В то время как процессы ледообразования распространяются в южные районы моря, в его северных и центральных районах происходит интенсивное нарастание толщины льда, и к концу октября около 10 % дрейфующего льда составляют однолетние тонкие льды (30- 70 см) и примерно столько же - однолетние средние льды (70-120 см). До 10% площади западной части моря и около 5% восточной занимают остаточные льды. Часть этих льдов переходит в стадию двухлетних льдов, часть выносятся за пределы моря.

1.1.11. Припай в море Лаптевых.

Припай. Припай в море Лаптевых является одним из двух самых обширных и мощных (по толщине льда) в арктических морях сибирского шельфа. Обширнее его только припай в Восточно-Сибирском море. Припай в море начинает формироваться через 10-15 суток после устойчивого ледообразования вдоль материковой и островной береговой черты. К этому времени толщина льда достигает 10-20 см. От 60 до 100% случаев образования припая приходится на октябрь. Однако по временному разбросу возможных сроков образования припая в море выделяются 7 районов. В большинстве районов наиболее вероятно образование припая в третьей декаде октября (45-55%).

1.2. Течения.

Через пролив Вилькицкого проходит немалая часть постоянного потока поверхностных вод из Карского моря в море Лаптевых. Поток пресных поверхностных вод, формируемый реками Обь и Енисей, происходит в теплое время года вдоль всего побережья Арктики с запада на восток. Речной сток распространяется по поверхности более плотных морских вод, которые отличаются от стока более низкой температурой, что позволяет определить его по спутнику.

Этот поверхностный сток с запада, может доходить до северо-западной части моря Лаптевых. Этот сток преобладает в проливе Вилькицкого, поверхностный сток со стороны моря Лаптевых практически отсутствует. Главной причиной формирования стока определённым образом, являются гидрометеорологические условия, такие как ветер [2].

В работе [6], говорится о 4-х типах поверхностных течений в Карском море, но позже в работе [7], количество типов сократилось до 3-х. Это восточное, центральное и западное (объединённое с юго-западным). [5]

В нашем случае больший интерес представляет восточный тип, который напрямую влияет на формирование и изменение льда в интересующий нас летний период.

2. Методы исследования и обработки исходных данных

В качестве методов исследования были взяты различные спутниковые системы. С их помощью был проведён обзор и анализ ледовой обстановки в проливе Вилькицкого в летний период. Каждая из выбранных спутниковых систем использовалась для обзора ледовой обстановки с учётом разных показателей. Скачав файлы csv. по двум морям были построены как отдельные графики хода площади льда за каждый месяц в течении десяти лет, так общие графики всех трёх месяцев в период с 2013 – 2023.

2.1. National Centers for Environmental Information (NOAA)

Данные с этого сайта были скачены в формате csv. и использовались для определения площади льда в Карском море и море Лаптевых. Были взяты данные с 2013 года по 2023 год. Построены графики хода площади льда как по всем отдельно взятым летним месяцам, так и по всему летнему периоду в целом. Графики по месяцам отдельно, были проанализированы по ходу значений площади льда, в то время как графики, построенные по всем трём месяцам сразу, были проанализированы с учётом построения тренда, который в свою очередь был проверен на значимость.

2.2. SIOWS:Arctic

Этот портал предоставляет информацию о сплочённости льда в процентах. Выбрав несколько точек в самом районе исследования, а также близь него, была получена информация о ледовой обстановке в проливе.

В этом случае используются изображения, полученные по данным сканирующих микроволновых радиометров AMSR-E, установленного на спутнике Aqua национального управления по авиации и исследованию

космического пространства (NASA), и AMSR-2, установленного на спутнике «Сидзуку» японского агентства аэрокосмических исследований.

AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS) является одним из 6 приемников AQUA. Радиометр имеет 12 каналов и измеряет яркостные температуры уходящего (микроволнового) излучения Земли на частотах 6.9, 10.65, 18.7, 23.8 36.5 и 89.0 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризации в полосе шириной 1450 км. За период времени в 1.5 сек спутник проходит 10 км. При этом в каждый конкретный момент времени поле обзора каждого из его каналов различно, так что активным для записи измерений является интервал в 10 км по ходу сканирования. Пространственное разрешение для сканирующих инструментов варьирует от 5.4 км для 89 ГГц до 56 км для 6.9 ГГц, другие характеристики представлены в таблице 1. Коническое сканирование ведется под углом 55° [<https://aqua.nasa.gov/amsg-e>].

Таблица 1 - Основные характеристики радиометра AMSR-E

Центральная частота (ГГц)	6.925	10.65	18.7	23.8	36.5	89.0
Полоса излучения (МГц)	350	100	200	400	1000	3000
Чувствительность (К)	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	1.1
Средняя пространственная разрешающая способность (км)	56	38	21	24	12	5.4
Мгновенная площадь обзора (км х км)	74 х 43	51 х 30	27 х 16	31 х 18	14 х 8	6 х 4
Размер пикселя (км х км)	10 х 10	5 х 5				
Время интегрирования (мс)	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	1.3
Эффективность главного пучка (%)	95.3	95.0	96.3	96.4	95.3	96.0
Угол пучка (град.)	2.2	1.4	0.8	0.9	0.4	0.18

Данные доступны с 2019 года. С этого и до 2023 года, взяты изображения, на которых видна сплочённость льда в процентах. Всего по три изображения за каждый год.

2.3. Worldview

Портал Worldview со спутниковой информацией, на котором были выбраны слои: Reference – Coastlines; Base Layers – Corrected Reflectance (Bands 7-2-1). Комбинация 7-2-1 используется, для того чтобы отличить снег и лед от облаков. Снег и лед очень хорошо отражают излучение в видимой части спектра (канал 1) и поглощают в каналах 2 (ближний инфракрасный диапазон) и 7 (средний ИК). Толстый слой льда и снег кажутся ярко-голубыми, в то время мелкие ледяные кристаллы в облаках верхнего яруса также будут казаться голубоватыми, а облака, содержащие влагу, - белыми.

В случае с этими данными, выбраны также летние месяца с 2019-2023 год, в начале и конце каждого месяца.

2.4. IRI Columbia

Портал IRI Columbia, откуда были взяты данные по температуре атмосферы (Ta). Данные были взяты с 1979 – 2023 год, чтобы сравнить их с площадью льда в летний период. Были взяты две точки в Карском море и море Лаптевых, так как данных в одной точке в акватории пролива Вилькицкого нет.

Два файла csv. были открыты в Excel и отфильтрованы по месяцам. Сделав выборку по летних месяцам за десять лет и сопоставив с рядом данных по площади льда в Карском или моря Лаптевых, были построены соответствующие графики. Также к ряду данных был добавлен ряд по времени (n). Добавив в графики линии тренда, была проведена проверка на значимость тренда с помощью регрессионной статистики и по критерию Стьюдента.

3. Исследование ледовой обстановки в проливе Вилькицкого

3.1. Обзор хода площади льда в Карском море и море Лаптевых в период с 2013-2023 в период летней навигации с помощью данных с NOAA.

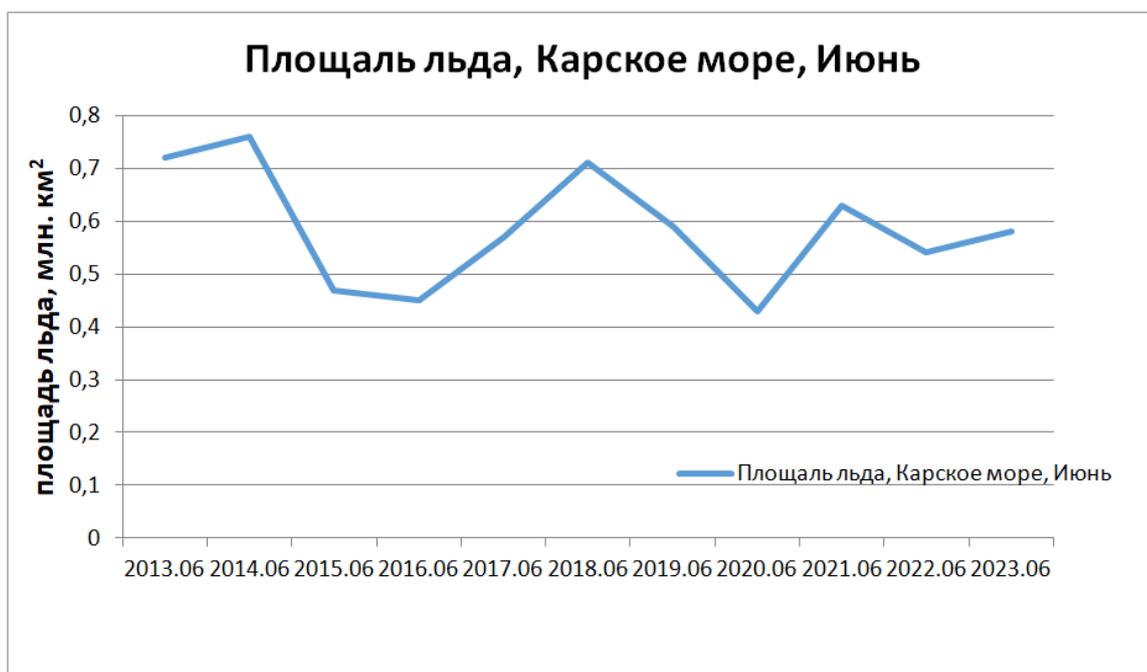


Рис. 1 Ход площади льда в Карском море. Июнь 2013-2023 [9].



Рис. 2 Ход площади льда в Карском море. Июль 2013-2023 [9].

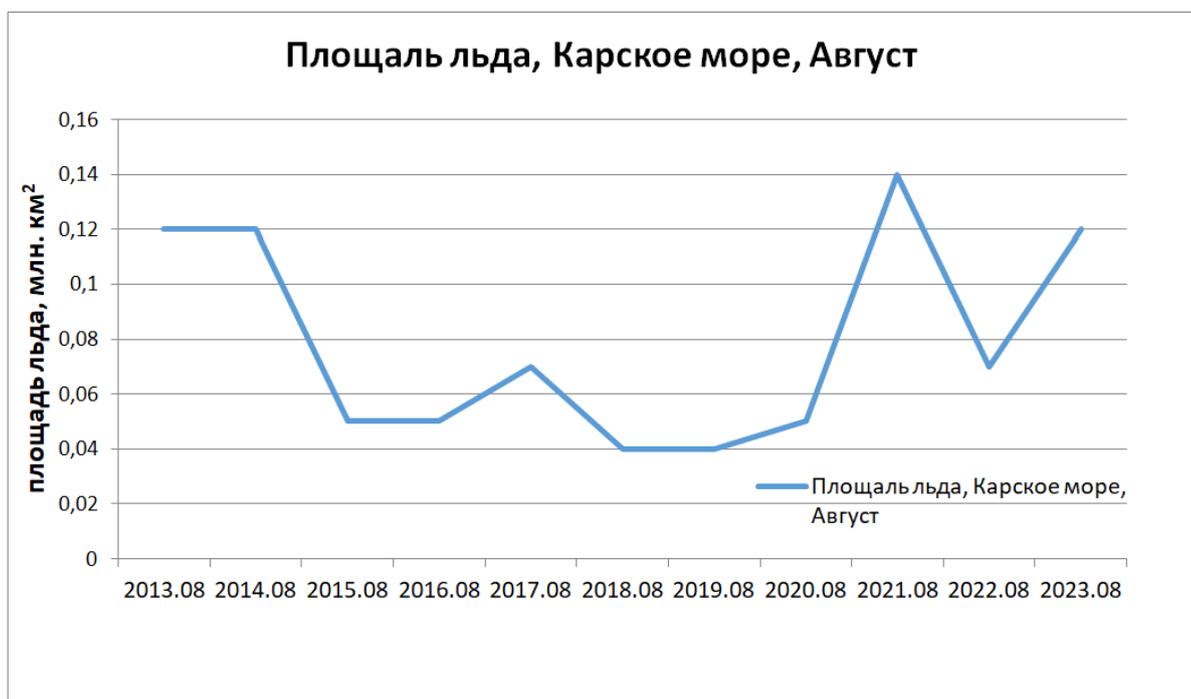


Рис. 3 Ход площади льда в Карском море. Август 2013-2023 [9].



Рис. 4 Ход площади льда за все летние месяца с 2013 – 2023, Карское море [9].

На отдельных графиках по месяцам и на общем графике сразу бросается в глаза уменьшение площади льда течении летних месяцев.

Если на рис. 1 (июнь), значения площади колеблются в пределах от 0,8 до 0,4 млн. км²., на рис. 2 (июль) значения распространяются в пределах от 0,4 до 0,1 млн. км², а на рис. 3 (август), значения близятся к минимальным, от 0,15 млн. км² и почти до 0.

В июне самые низкие значения площади льда наблюдаются в 2015, 2016 и 2020 годах. В июле в целом значения сильно меньше, чем в июне, а минимальные значения наблюдаются в 2015, 2016 и 2020 годах. В августе, площадь льда относительно общей картины совсем мала, а минимальные значения наблюдаются в 2018 и 2019 годах.



Рис. 4 Ход площади льда в море Лаптевых. Июнь 2013-2023 [10].



Рис. 5 Ход площади льда в море Лаптевых. Июль 2013-2023 [10].

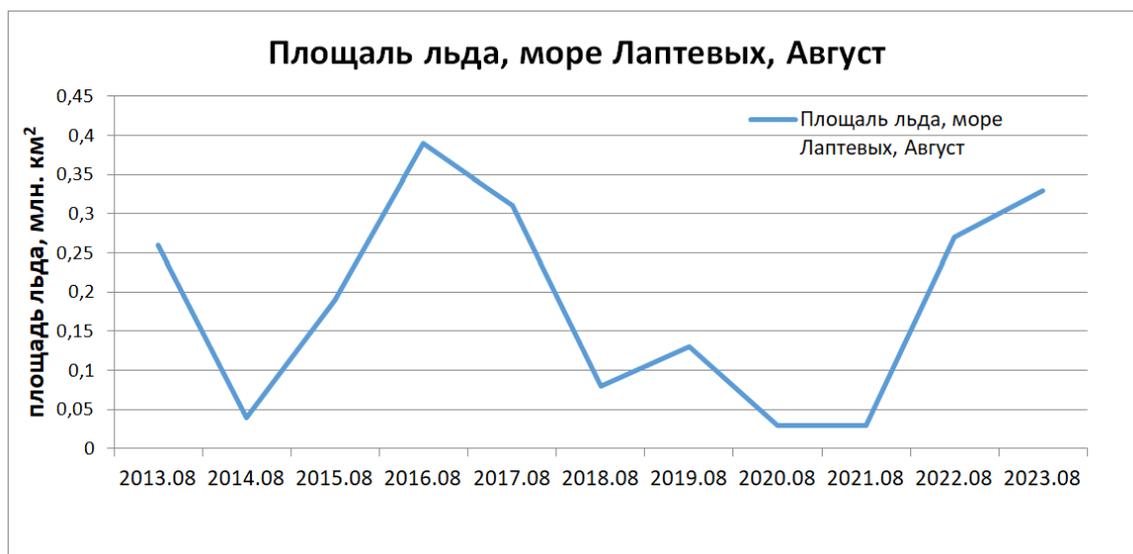


Рис. 6 Ход площади льда в море Лаптевых. Август 2013-2023 [10].



Рис. 7 Ход площади льда за все летние месяца с 2013 – 2023, море Лаптевых [10].

В море Лаптевых в целом, ситуация схожая. Ход площади льда постепенно уменьшается. В июне (рис. 5), значения держаться в пределах от 0,8 до 0,5 млн. км², в июле (рис. 6) от 0,7 до 0,15 млн. км², а в августе (рис. 7) от 0,4 млн. км² и почти до 0.

В июне ход в целом имеет не большой разброс по значениям, наименьшее наблюдается в 2021. В июле наименьшее значение наблюдается в 2020 и 2021 годах. В августе, площадь льда относительно общей картины

также наименьшая, а минимальные значения за период исследования наблюдаются в 2014, 2020 и 2021 годах.

3.2. Обзор сплочённости льда в проливе Вилькицкого и близлежащих акваторий. Изображения взяты с SIOWS:Arctic.

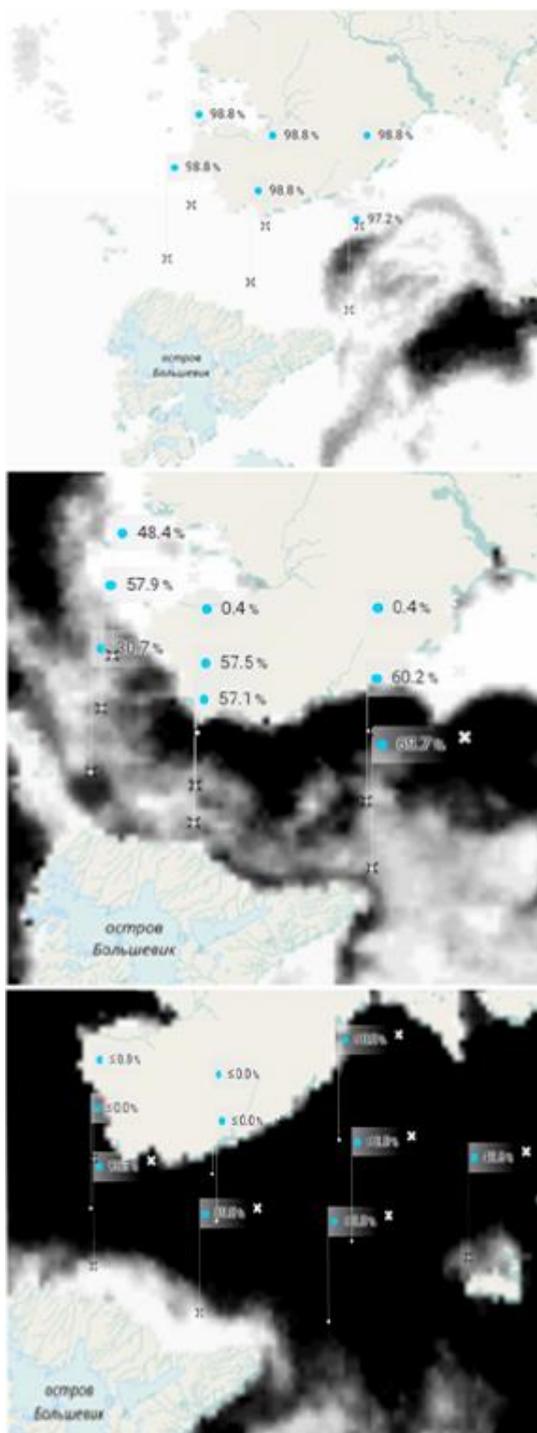


Рис. 8 Сплочённость льда за 3 летних месяца в 2019 году [11].

Рис. 9 Сплочённость льда за 3 летних месяца в 2020 году [11].

Помимо резкого сокращения сплочённости льда в конце мая и начале июня вдоль острова Большевик и вдоль всей западной части пролива Вилькицкого, почти вплоть до материка, который восстанавливается к середине июня, поведения льда в первый месяц лета такой же, как и в предыдущем году. К концу июня и началу июля, уменьшение сплочённости льда начинается со стороны моря Лаптевых и доходит до Ленинградской губы. После чего, с середины июля и до конца августа пролив Вилькицкого и ближайшая акватория была свободна ото льда.

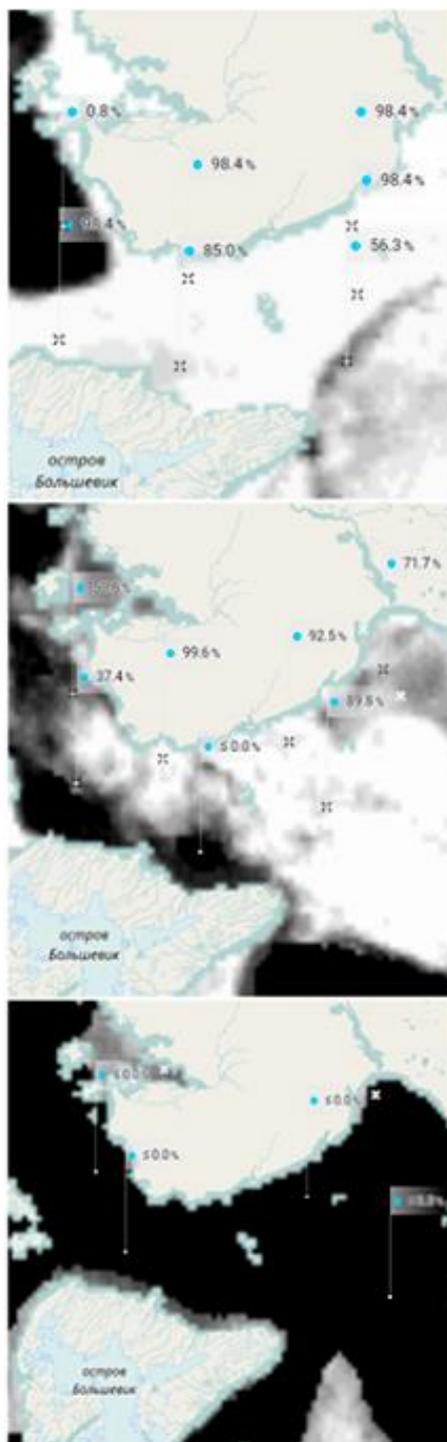


Рис. 11 Сплочённость льда за 3 летних месяцев в 2022 году [11].

В 2022 году, в течение июня наблюдалось уменьшении сплочённости льда сразу со стороны двух морей, после чего в первой половине июля, лёд со стороны Карского моря, особенно в части, что ближе к материку, стал нарастать. Со стороны же моря Лаптевых всё также происходило уменьшение сплочённости льда вдоль южного побережья острова

Большевик. В конце июля и начале августа, сплочённость льда во всём проливе Вилькицкого достигла минимальных значений.

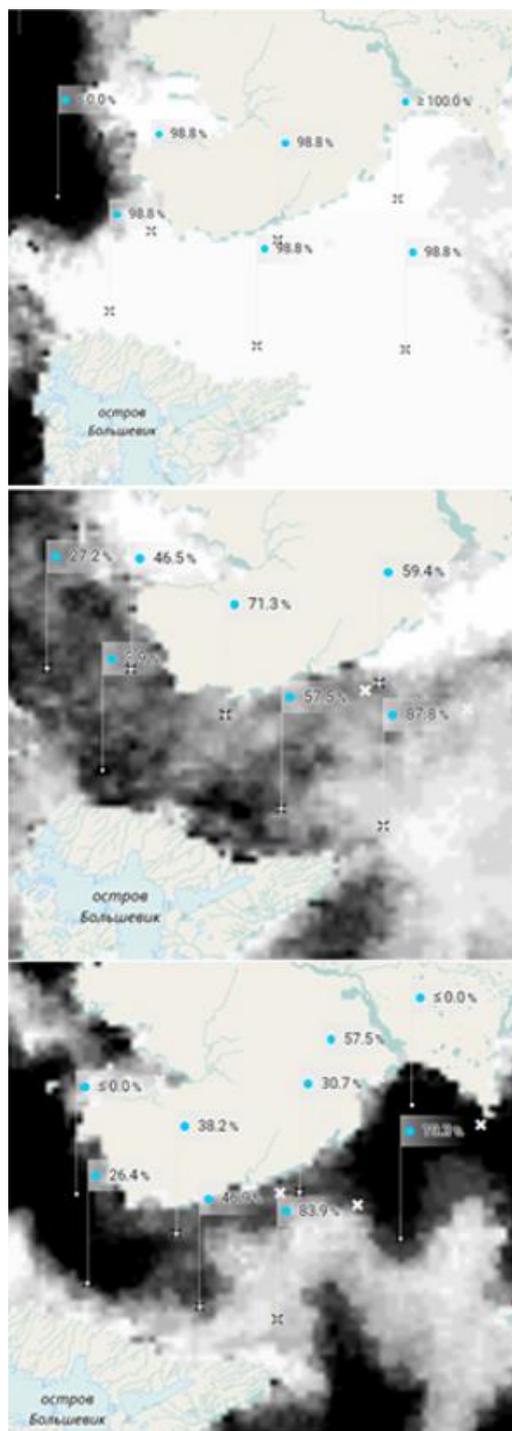


Рис. 14 Сплочённость льда за 3 летних месяца в 2023 году [11].

В 2023 году, в июне, особенно во второй его половине заметно, что сплочённость льда сначала уменьшается у материка, около Ленинградской

губы, а под конец месяца во всём проливе значения упали до значений в пределах 60-80%.

В июле высокая сплочённость в середине месяца наблюдалась в северной части пролива, близ острова Большевик и к западу от него, после чего, в конце июля переместилась к материку. В начале августа, осталась значительная часть льда с высоким процентом сплочённости, особенно в западной части, что для этого месяца нехарактерно. В конце августа, сплочённость вновь упала до 0.

3.3. Обзор ледовой обстановки в проливе Вилькицкого и его окрестностях.

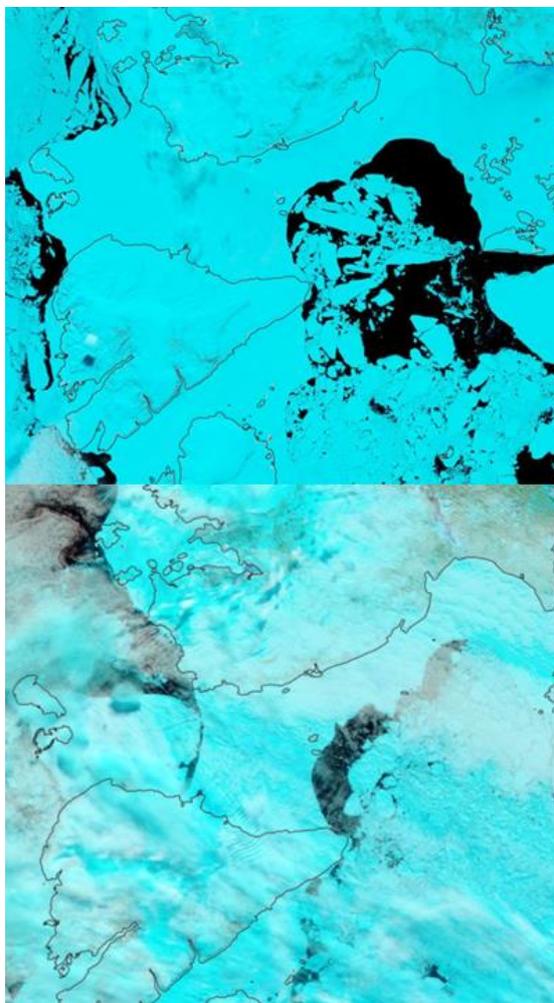


Рис. 15 Ледовая обстановка в проливе Вилькицкого в начале июня 2019 и 2020 года [12].

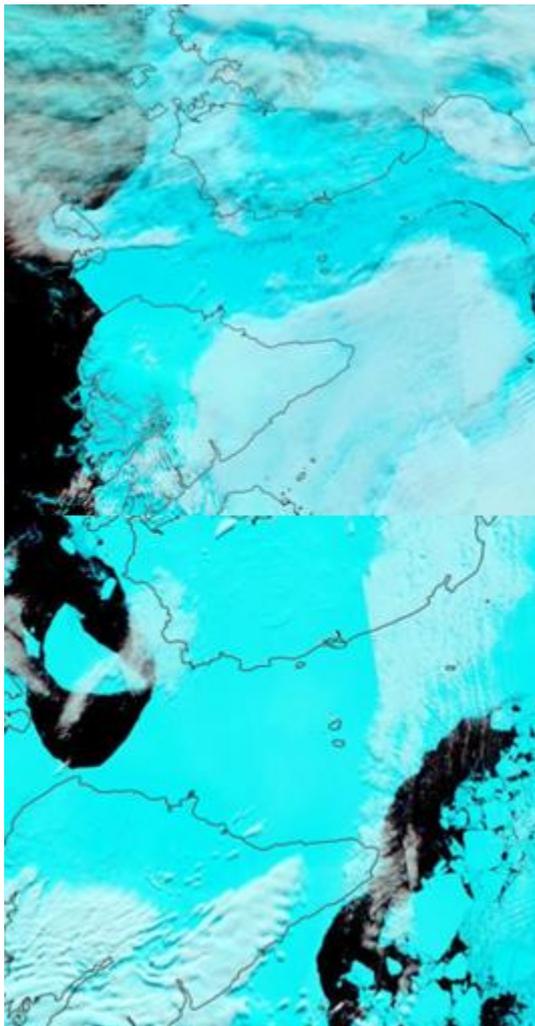


Рис. 16 Ледовая обстановка в проливе Вилькицкого в начале июня 2021 и 2022 года [12].

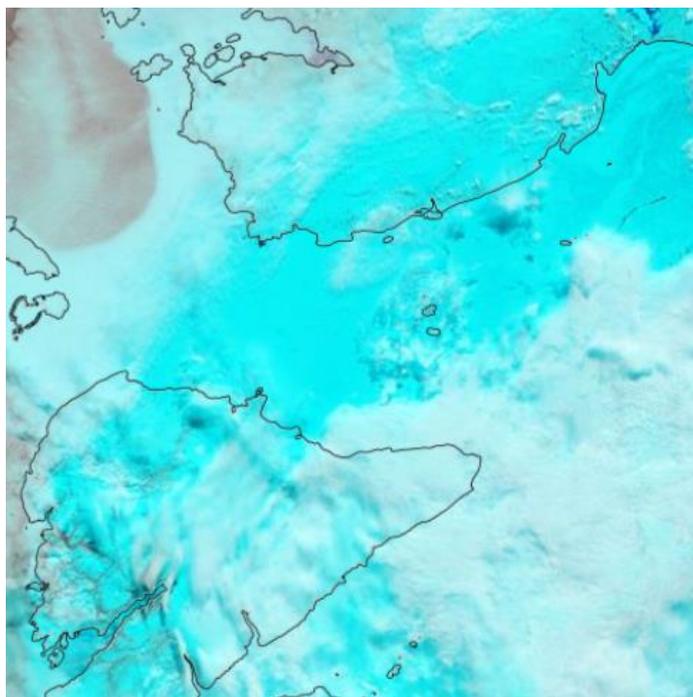


Рис. 17 Ледовая обстановка в проливе Вилькицкого в начале июня 2023 года [12].

Ледовая обстановка в проливе Вилькицкого в июне за период с 2019-2023, если рассматривать её как преграда для осуществления судоходства, в целом, слабо меняется. Можно заметить, что в 2019, 2020 и 2022 году, лёд менее сплочённый на границах пролива – в Карском море и море Лаптевых. Видно, что там лёд раздроблен на разного размера льдины. Однако, что важно, сам пролив Вилькицкого в начале июня стабильно покрыт льдом.

В конце июня, ситуация более разнообразная, однако её можно охарактеризовать общими сходствами за все эти года. В целом, площадь ледяного покрова в проливе в это время остаётся слишком высокой для судоходства, но уже видно, как немалая часть акватории свободна ото льда. Именно в проливе, а не в его окрестностях, меньше всего льда было замечено в 2021 году. В остальные года пролив покрыт льдинами разного размера. Также видно, что в разные года, уменьшение площади ледового покрова происходит с разных сторон (морей). Часто уменьшение площади ледяного покрова начинается со стороны моря Лаптевых, Карское же моря в целом чуть дольше остаётся покрыто льдом или большим количеством льдин.

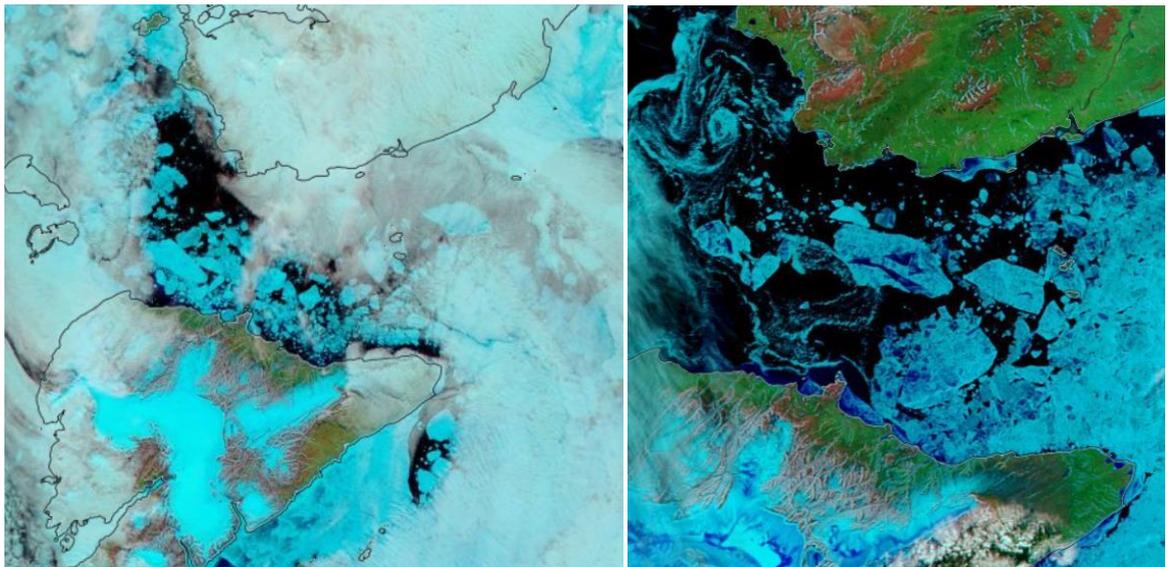


Рис. 18 Ледовая обстановка в проливе Вилькицкого в начале июля 2019 и 2020 года [12].

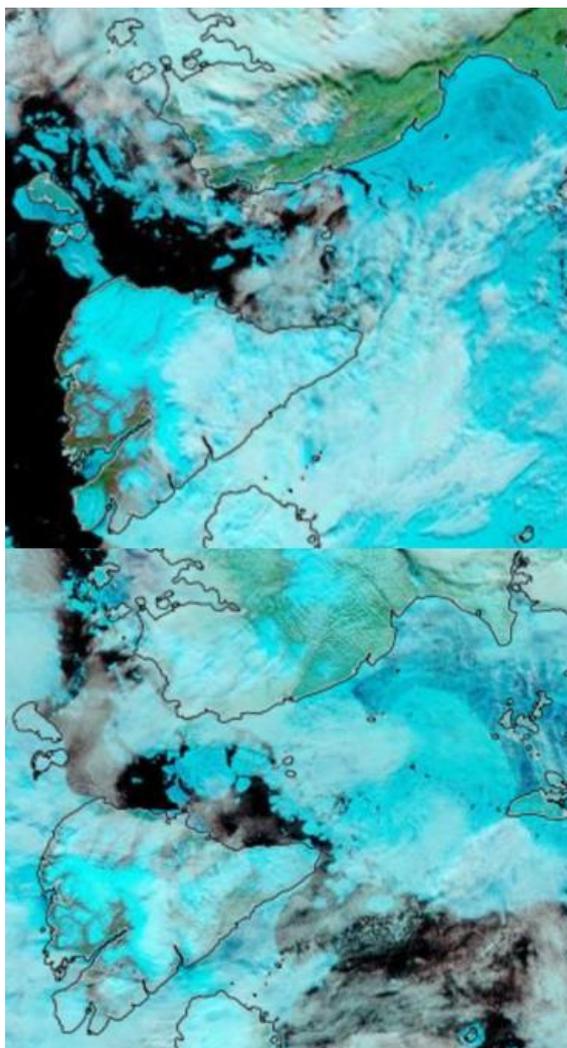


Рис. 19 Ледовая обстановка в проливе Вилькицкого в начале июля 2021 и 2022 года [12].

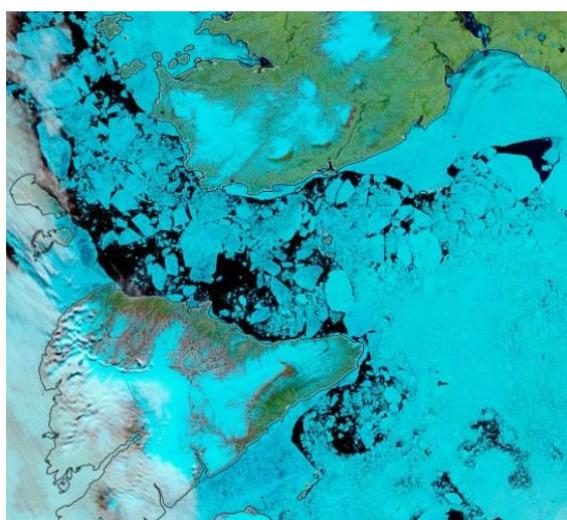


Рис. 20 Ледовая обстановка в проливе Вилькицкого в начале июля 2023 года [12].

В начале июля в проливе Вилькицкого состояние ледового покрова можно описать так: во все года кроме 2019 (где северо-восточная часть по большей части свободна ото льда), вся западная часть пролива (со стороны Карского моря) остаётся покрыта льдом. Приближаясь ближе к проливу, а после к морю Лаптевых, лёд сначала разделяется на разного размера дрейфующий лёд, которым заполняется пролив. В разные года, распределение льдин по акватории залива происходило по-разному, и количество льдин тоже отличалось, однако их количество, и то, как сильно они заполняли пролив остаётся непроходимой для судов.

В конце июля в проливе Вилькицкого ледовая обстановка в разные года имеет различия. Пусть в целом и можно сказать, что пролив стал свободнее ото льда, и в какие-то года возможность судоходства была, стоит рассмотреть конкретные года отдельно. Если в 2019, 2020 и 2022 году площадь ледового покрова крайне мала и ограничивается во многом лишь единичными или небольшими скоплениями льдин (хотя в 2022, приближаясь к морю Лаптевых скопление льдин увеличивается), то в 2021 и 2023 году, ситуация почти обратная. В 2021 году, заметна как большая площадь ледяного покрова соединённая с островом Большевик и почти доходящая до материка, так и скопление большого количества льдин в северо-восточной части Карского моря. В 2023 году ситуация похожая, однако ледяной покров ещё сильнее раздроблен на разного размера дрейфующий лёд, которые занимают большую часть акватории близ пролива Вилькицкого, что в свою очередь мешает судоходству в этой части акватории.

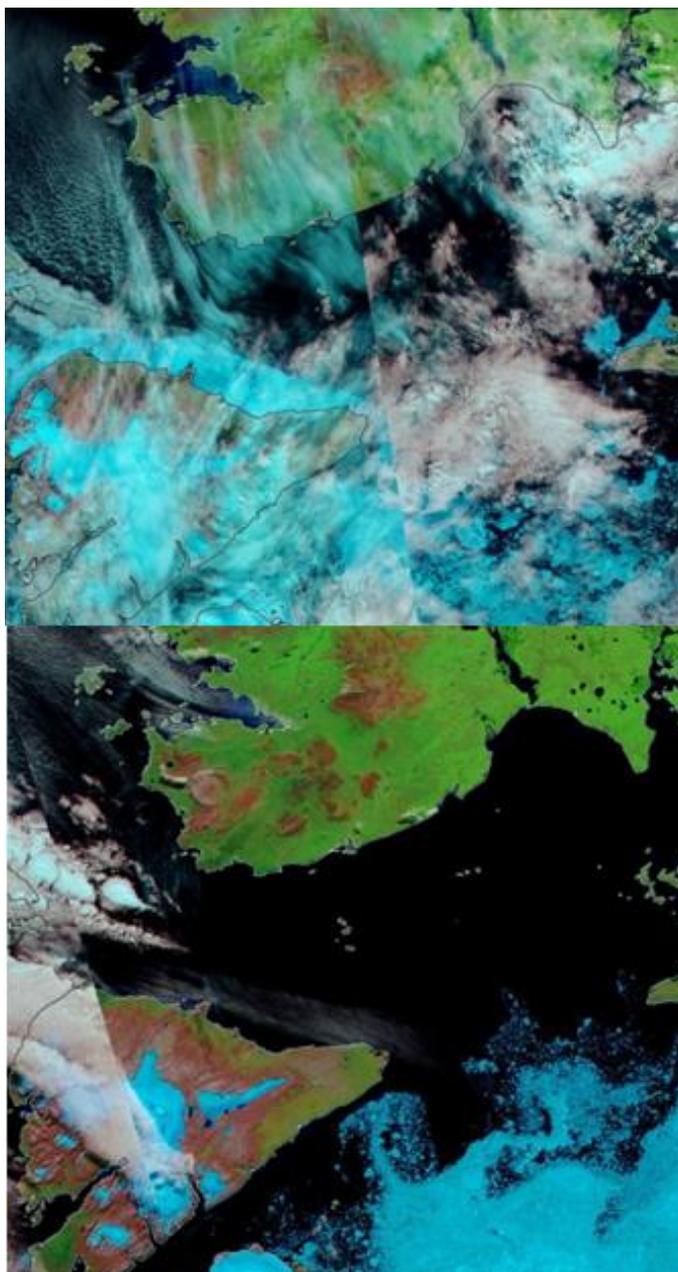


Рис. 21 Ледовая обстановка в проливе Вилькицкого в начале августа 2019 и 2020 года [12].

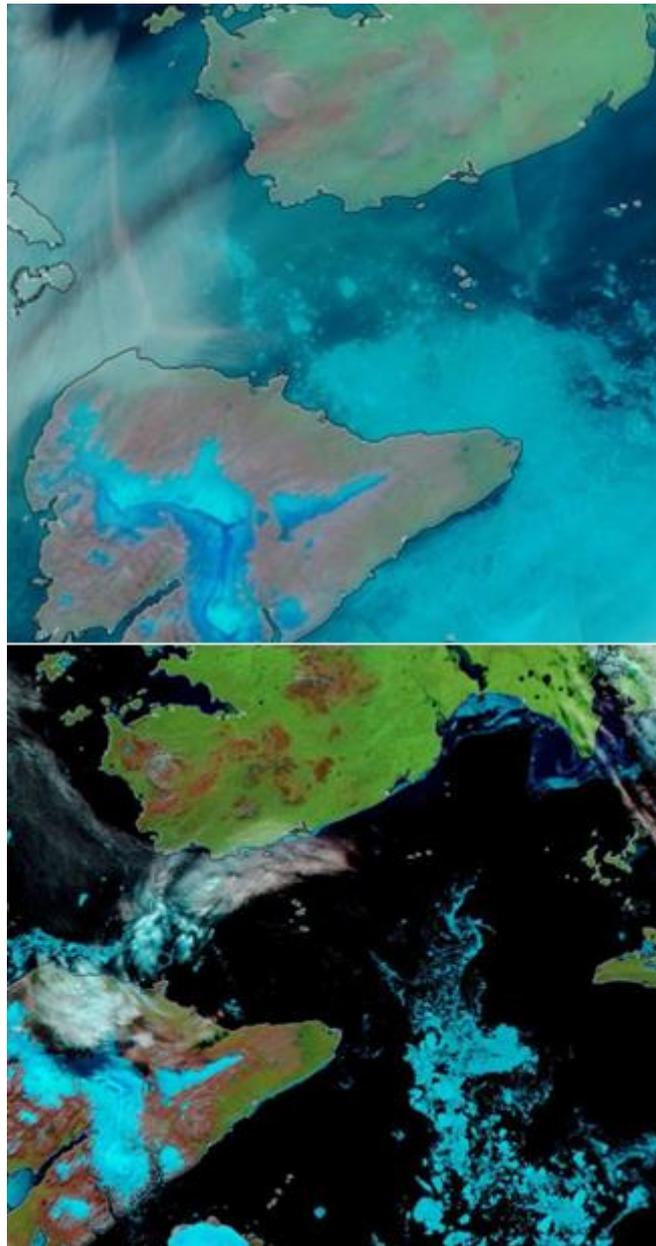


Рис. 22 Ледовая обстановка в проливе Вилькицкого в начале августа 2021 и 2022 года [12].

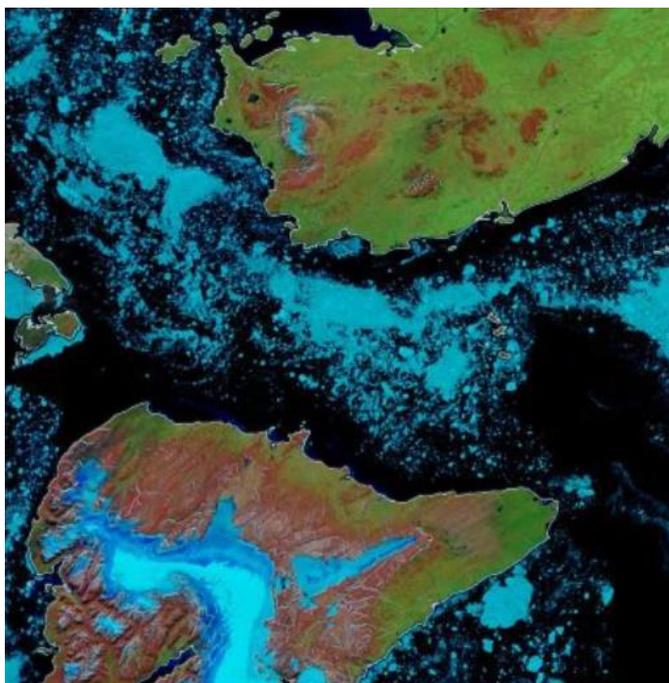


Рис. 23 Ледовая обстановка в проливе Вилькицкого в начале августа 2023 года [12].

В начале августа во все года, кроме 2021 и 2023, пролив практически полностью освободился ото льда, только изредка заметны единичные льдины. В 2021 году присутствует большой массив льда, прилегающий с юго-западной части острова Большевик, от которого отходят льдины, которые могут помешать прохождению в этой акватории судов. В 2023 году, в центральной части пролива из Карского моря и до моря Лаптевых, наблюдается большое количество слабо сплочённого льда, который занимает большую часть акватории залива.

В конце августа пролив освобождается ото льда, только редко встречаются маленькие льдины и небольшое скопление льда в центральной части залива в 2021 году.

3.4. Дрейф и распределение айсбергов

Движение льдин в конце июня и начале июля, обусловлено влиянием Обь-Енисейского течения (восточная ветвь) (см. рис. 26) из Карского моря в море Лаптевых. Постепенно разрушаясь, образуется дрейфующий лёд,

который дрейфует из западной части пролива Вилькицкого в восточную его часть вдоль Таймырского берега, вплоть до моря Лаптевых.

Встречается дрейфующий лёд разного размера. На рис. 23, можно увидеть как огромные дрейфующие льдины – размером от 400-800 км², до размеров 10-20 км².

Течение в проливе может достигать скорости 25 см/с и перенос льдин через пролив происходит достаточно быстро.

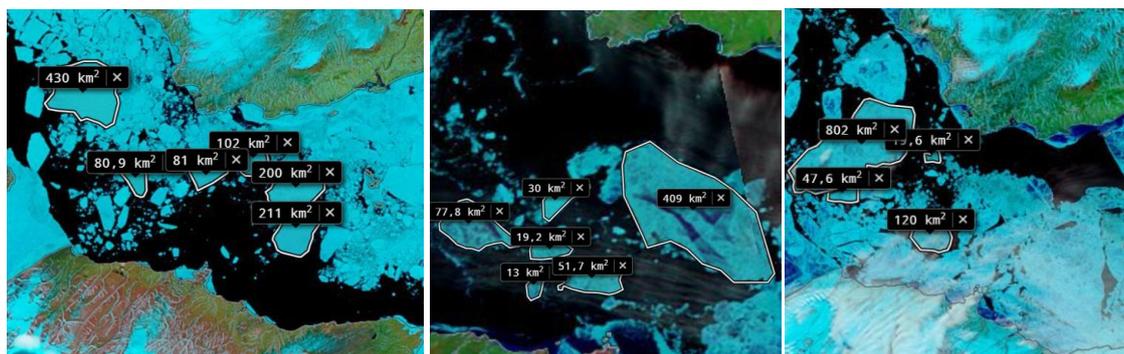


Рис. 24 Размеры льдин в проливе Вилькицкого. 9 июля 2023; 5 июля 2020; 25 июня 2019 [12].

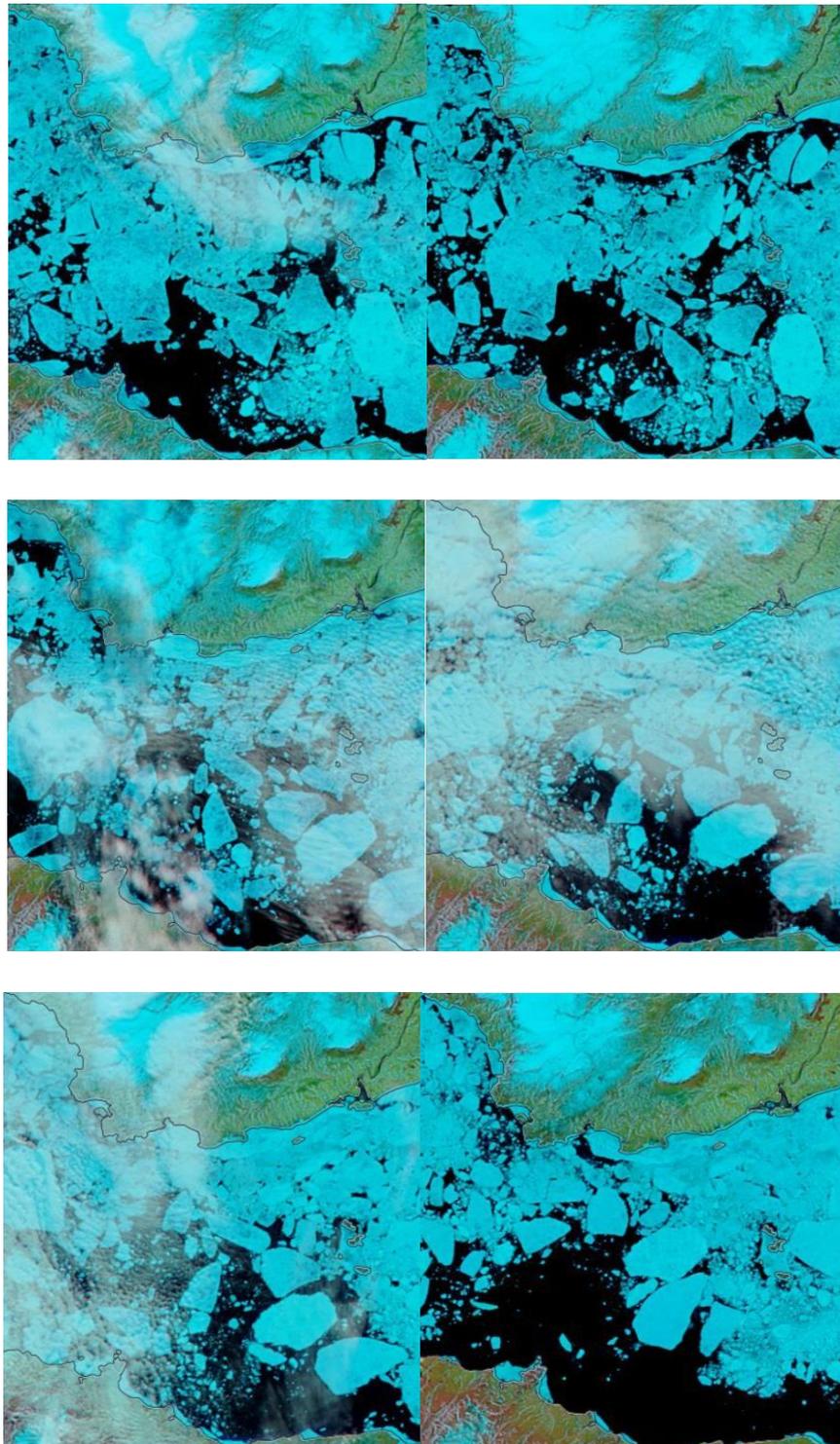


Рис. 25 Перемещение льдин в проливе Вилькицкого в начале июля (1, 2, 4, 5, 6, 9, 10 июля)[12].

Также на рис. 24 можно увидеть, что 1-10 число, одна из льдин переместилась на 40 км, а другая на 64 км. Скорость перемещения одной из льдин – 0,005 м/с, второй – 0,007 м/с.

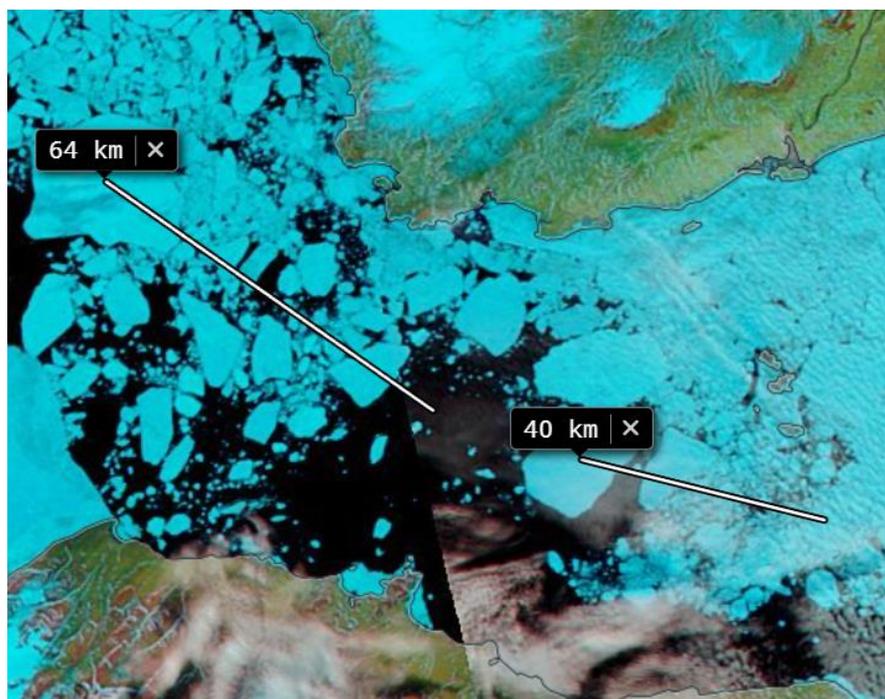


Рис. 26 Перемещение двух льдин за 10 дней [12].

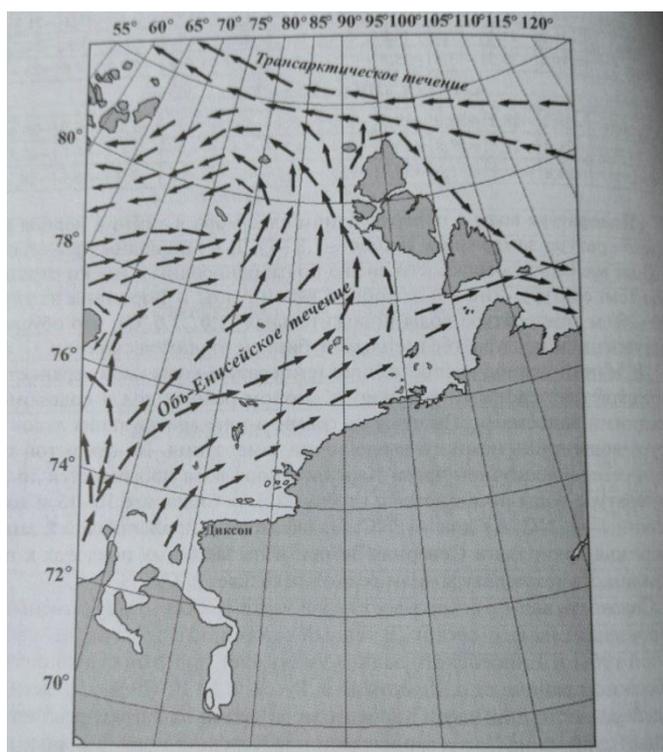


Рис. 27 Течения в северо-восточной части Карского моря [8].

Также была посчитана площадь льда в период: с конца июня до конца июля. Взяты изображения с портала Worldview, переведены в 8-битное изображения с помощью программы ArcSoft и загружены в программу Bilko.

Там к изображениям было применено контрастирование и построена гистограмма, где по пикселям с определённым значением DN (которые соответствуют значениям DN льда) была посчитана площадь льда в проливе и построена таблица.

Таб. 2 Таблица значений площади льда в проливе Вилькицкого

площадь льда, тыс. км ²	2019	2020	2021	2022	2023
конец июня	2,31	1,67	1,80	3,06	2,28
начало июля	2,10	0,18	2,60	1,83	2,81
конец июля	0,09	0/нет льда	0,67	0,63	1,29

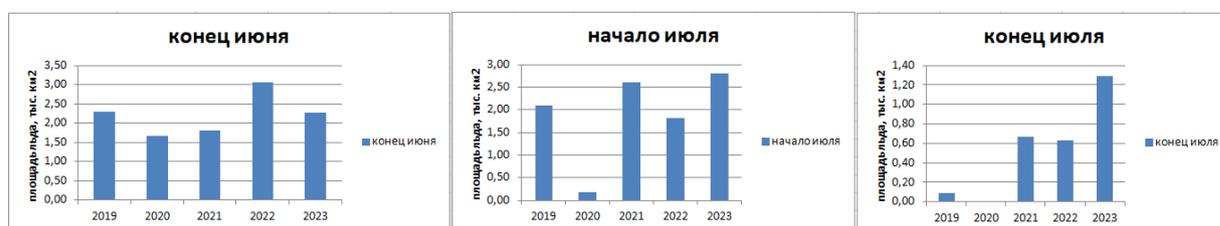


Рис. 28 Гистограммы значений площади льда в проливе Вилькицкого

3.5. Сравнение хода площади льда и температуры атмосферы в период с 2013 – 2023 г. Проверка трендов на значимость.

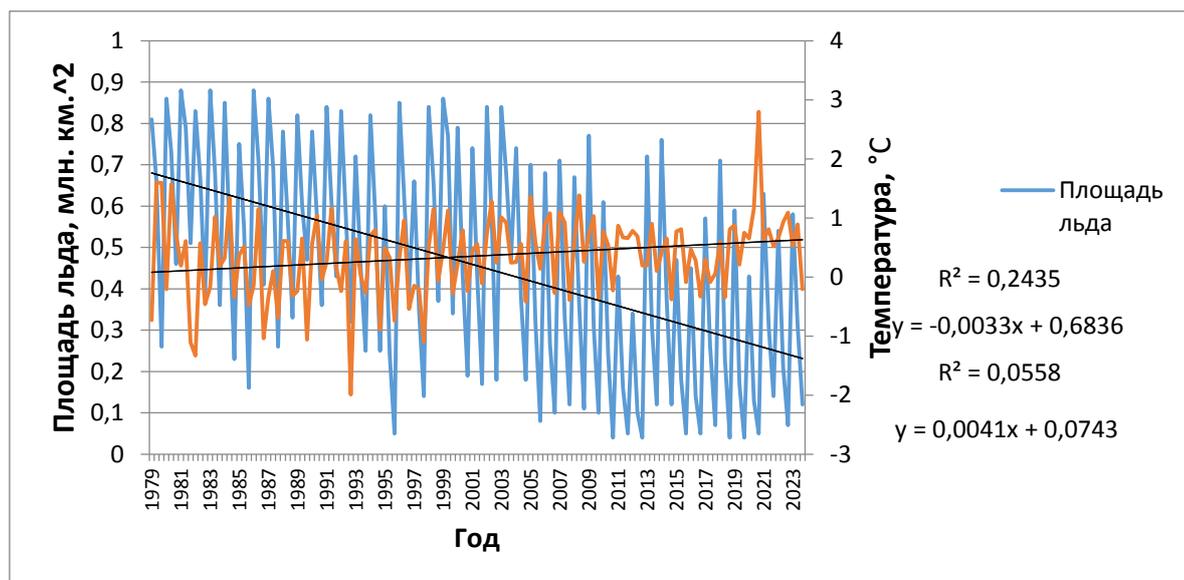


Рис. 29 Ход изменения площади льда (S) и температуры атмосферы (T_a) в Карском море [13].

На рис. 28 хорошо видно, как со временем уменьшается площадь льда и возрастает температура атмосферы. Также, на рисунок были выведены тренды и R^2 .

После проверки трендов на значимость, $t > t_{кр}$. что говорит о том, что тренды значимы:

Таб. 3 Значения коэффициентов t – эмпирического и $t_{кр}$.

Тa		Площадь	
$t_{кр}$	t^*	$t_{кр}$	t^*
1,98	2,80	1,98	6,54

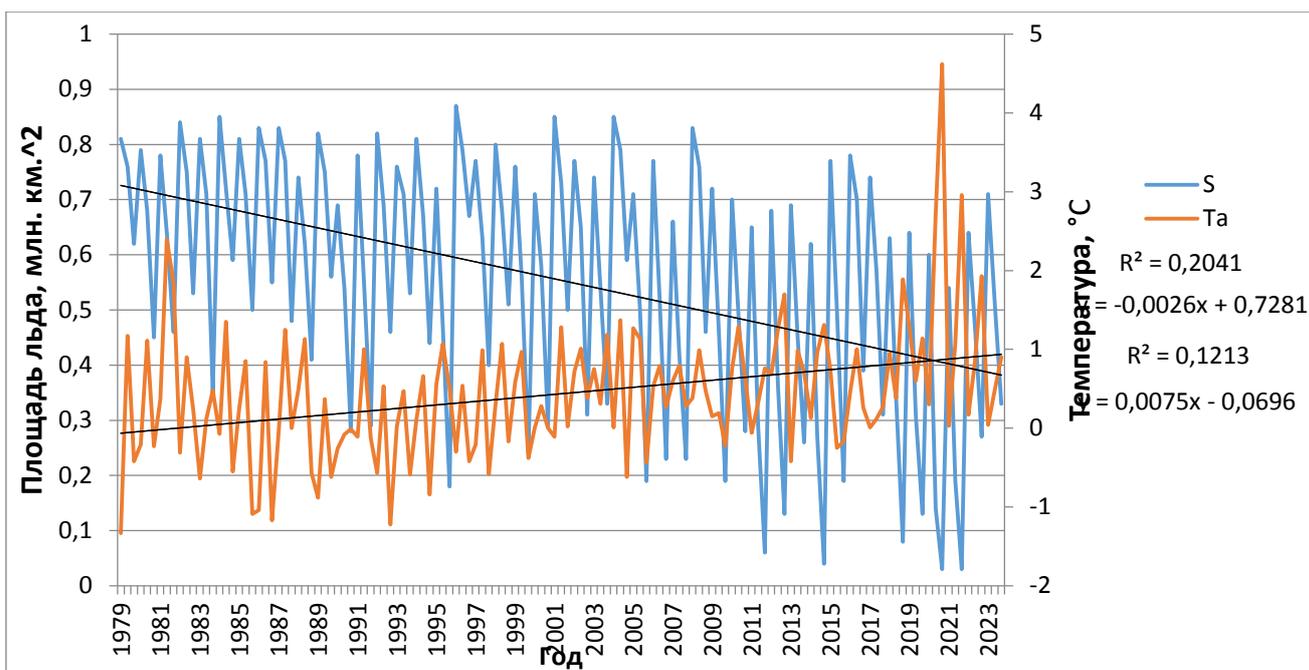


Рис. 30 Ход изменения площади льда (S) и температуры атмосферы (Ta) в море Лаптевых [13].

На рис. 28 хорошо видно, как со временем уменьшается площадь льда и возрастает температура атмосферы. Также, на рисунок были выведены тренды и R^2 .

После проверки трендов на значимость, $t > t_{кр}$. что говорит о том, что тренды значимы:

Таб. 4 Значения коэффициентов t – эмпирического и $t_{кр}$.

Тa		S	
$t_{кр}$	t^*	$t_{кр}$	t^*
1,98	4,28	1,98	5,84

Оба рисунка с ходом двух важных для анализа ледовой обстановки в проливе Вилькицкого значений, показывает примерно одну картину. За последние 10 лет постепенно увеличивается температура атмосферы и, как минимум, за счёт этого постепенно уменьшается площадь льда.

Нельзя сказать, что этот процесс явный, и что можно увидеть резкие изменения. В некоторые года, площадь льда может быть больше чем в предыдущем, как и температура атмосферы, может быть ниже предыдущего. Однако тренд на уменьшение площади льда в проливе Вилькицкого есть.

Закключение.

Проанализировав результаты, полученные как из визуального наблюдения (спутниковые снимки), так и из рядов данных (площадь льда и температура атмосферы), можно сделать вывод о ледовой обстановке в летний период в проливе Вилькицкого, в частности о том, как изменяется обстановка для СМП и судоходства в данной акватории.

На рис. 29 и 30, видно, как за 44 года (в период с 1979 – 2023) уменьшается площадь льда в Карском море и море Лаптевых, и как увеличивается температура атмосферы со временем. Однако, наблюдая за изменением ледовой обстановки в самом проливе по спутниковым изображениям, даже за 10 лет нельзя увидеть точной картины того, что льда

становится меньше. В некоторые годы его совсем мало, как например 2019 и 2020, в другие больше. Что говорит о том, что имея явную общую картину по увеличению температуры атмосферы и уменьшению площади льда в двух морях, с которым граничит пролив Вилькицкого, визуальное количество льда в проливе изменяется слабо и неявно. Поэтому, можно сделать вывод, что тренд на уменьшение площади льда есть, но сейчас ледовая обстановка большую часть летнего периода остаётся достаточно неблагоприятной для судоходства.

Список использованной литературы:

1. Большая российская энциклопедия 2004-2017 : сайт. – URL: <https://old.bigenc.ru/geography/text/1914248> (дата обращения: 03.06.2024)
2. Добровольский, А.Д. Моря СССР / А.Д. Добровольский, Б.С. Залогин. – Москва : МГУ, 1982. – 192 с.
3. Миронов, Е. У. и др. Наблюдения за ледовой обстановкой : учебное пособие / Е. У. и др. Миронов. – Санкт-Петербург : ААНИИ, 2009. – 359 с.
4. Амбросимов, А.К. О течениях Карского моря и переносе вод через проливы. / А.К. Амбросимов // Инженерная экология . – Москва : Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2021. – С. 48-51.
5. Полухин, А.А. Особенности распространения материкового стока по акватории Карского моря / А.А. Полухин, П.Н. Маккавеев // Океанология. – 2017. – Т. 57, № 1. – С. 25-37.
6. Перенос материковых вод через пролив Вилькицкого в сентябре 2017 и 2018 гг. / П.Н. Маккавеев, А.А. Полухин, С.А. Щука, С.В. Степанова // Океанология. – 2020. – Т. 60, № 3. – С. 355-363.
7. Распространение и трансформация вод поверхностного опресненного слоя в Карском море / А.Г. Зацепин, В.В. Кременецкий, А. А. Кубряков [и др.] // Океанология. – 2015. – Т. 55, № 4. – С. 502–513.
8. Думанская, И.О. Ледовые условия морей Азиатской части России / И.О. Думанская. – Москва : Социн, 2017. – 637 с.
9. National Centers for Environmental Information : сайт. – URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/regional-sea-ice/area/Kara/6> (дата обращения: 03.06.2024)
10. National Centers for Environmental Information : сайт. – URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/regional-sea-ice/area/Laptev/6> (дата обращения: 03.06.2024)

11. SIOWS ARCTIC : сайт. – URL: <http://siows.solab.rshu.ru/> (дата обращения: 03.06.2024)
12. Worldview : сайт. – URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (дата обращения: 03.06.2024)
13. IRI — International Research Institute for Climate and Society : сайт. – URL: https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Diagnostic/.above_ground/.temp/ (дата обращения: 03.06.2024)
Льдины – дрейфующий лёд
14. <https://www.google.ru/maps/@77.6363831,96.2540785,773197m/data=!3m1!1e3?hl=ru&entry=ttu> (дата обращения: 04.06.2024)