

Санкт-Петербургский государственный университет

ПОПОВА Виктория Григорьевна

Выпускная квалификационная работа

Анализ ледовых характеристик северо-западной части Северного Ледовитого океана за период 1979-2022 гг.

Уровень образования: *магистратура*

Направление: *05.04.04 «Гидрометеорология»*

Основная образовательная программа: *ВМ.5779.2022 «Гидросфера и атмосфера: моделирование и прогноз»*

Научный руководитель:
к.г.н., Иванов

Борис Вячеславович

Научный

консультант: к.г.н, Рубченя

Андрей Валерьевич

Рецензент:

к.г.н., Юлин Александр Викторович

Санкт-Петербург

2024

Оглавление

	Стр.
Перечень сокращений и условных обозначений.....	3
Введение.....	4
Глава 1: Физико-географическое описание района исследований.....	7
Глава 2: Обзор литературы.....	9
Глава 3: Материалы и методы.....	14
Глава 4: Основные результаты исследований.....	19
4.1. Ледовитость северо-западной части Северного Ледовитого океана.....	19
4.2. Сплоченность льда в северо-западной части Северного Ледовитого океана....	21
4.3. Сравнение ледовых характеристик в северо-западной части Северного Ледовитого океана.....	21
4.4 Турбулентный теплообмен с атмосферой в северо-западной части Северного Ледовитого океана.....	24
Заключение.....	27
Список литературы.....	28
Приложение 1.....	32
Приложение 2.....	34

Перечень сокращений и условных обозначений

ААНИИ – ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

АБ – Арктический бассейн

БД – база данных ААНИИ по морскому льду

ВКР – Выпускная квалификационная работа

ВМО – Всемирная метеорологическая организация

ЗФИ – Земля Франца-Иосифа

ООН – Организация Объединенных наций

ПТВ – Приземная температура воздуха

Росгидромет – Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

СЛО – Северный Ледовитый океан

СМП – Северный морской путь

ЦДА – Центр действия атмосферы

Введение

Изучение морского ледяного покрова в целом и его отдельных характеристик является важной проблемой современной гидрометеорологии. В последнее время наблюдаемые пространственно-временные изменения ледовых характеристик рассматриваются в сопоставлении с современными изменениями климата. Во многих современных работах отечественных и зарубежных авторов характеристики ледяного покрова рассматриваются в качестве значимых индикаторов наблюдаемых изменений климата.

Интерес к изучению пространственных и временных изменений ледовых характеристик АБ обусловлен, прежде всего, экономическими приоритетами.

Во-первых, с каждым годом возрастают грузоперевозки по трассам СМП. С учетом увеличения безледного периода на трассах СПМ (летний сезон), увеличения доли тонких молодых льдов в зимний период года и сокращения зон, занятых тяжелыми льдами (ледовых массивов), возникает возможность осуществления регулярной круглогодичной навигации на трассах СМП.

Во-вторых, в шельфовой зоне СЛО (российские арктические моря) осуществляются мероприятия по поиску, разработке и эксплуатации углеводородного сырья.

В-третьих, с изменениями ледовых характеристик и климата в целом изменяется структура и ареалы распространения полярных экосистем.

Именно поэтому изучение и мониторинг как климатических, так и ледовых характеристик должен выполняться на регулярной основе с привлечением современных средств и методов сбора, обработки и анализа информации об окружающей среде.

В настоящее время в центре внимания мирового научного сообщества находятся вопросы, связанные с современными тенденциями изменения климата. Причиной являются экстремальные значения ряда метеорологических величин (температура воздуха, штормовые ветра, аномальные осадки и др.), наблюдаемые в последнее время. Изменения климата оказывает существенное влияние на экономическую и хозяйственную деятельность.

Очевидно, что в центре внимания находятся районы АБ, непосредственно прилегающие к трассе СМП, либо расположенные вблизи лицензионных и перспективных участков ведущих Российских компаний (Роснефть, Газпром и т.д.). В нашем исследовании мы сосредоточили свое внимание на северо-западной части СЛО (по классификации ААНИИ). В этом районе наблюдается вынос основной массы дрейфующих льдов из центральной части АБ и именно здесь, по нашему мнению, можно в наибольшей степени объективно отследить те изменения, которые происходят с ледяным покровом в центральной

части АБ. Наконец этому региону посвящено небольшое количество исследований, выполненных отечественными и зарубежными специалистами по сравнению с другими частями СЛО, и мы рассчитываем, что наша работа будет способствовать частичной ликвидации создавшегося положения.

Цель работы – исследование закономерностей и особенностей изменения ледовых характеристик северо-западной части СЛО за период 1979-2022 гг.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- научное обоснование выбора района исследований;
- сбор, обобщение и анализ ледовых характеристик, содержащихся в БД ААНИИ;
- анализ изменений ледовитости и сплоченности, а также сопутствующих метеорологических параметров;
- расчет турбулентного теплообмена с атмосферой в северо-западной части СЛО

Объект исследования - процессы, протекающие в системе «атмосфера – морской лед – океан» в условиях современных изменений климата.

Предмет исследования – региональные особенности изменения ледовых характеристик в северо-западной части СЛО (ледовитость и сплоченность) и характеристик приземной атмосферы (ПТВ, скорость ветра).

Достижение поставленных целей и задач позволит выявить связь ледовых характеристик с современными изменениями климата.

Основные результаты исследований (апробация результатов) представлены в следующих публикациях:

1. XIX Большой географический фестиваль - 2023, Санкт-Петербург - Попова В.Г., Иванов Б.В., Рубчя А.В., Изменчивость ледовитости северо-западной части Северного Ледовитого океана с 1979 по 2022 г.г. // Сборник материалов участников XIX Большого географического фестиваля : электронное издание, Санкт-Петербург, 07–09 апреля 2023 года / Санкт-Петербургский государственный университет, Институт Наук о Земле, Профсоюзная организация студентов и аспирантов СПбГУ. – Санкт-Петербург: Свое издательство, 2023. – С.232-235 – ISBN 978-5-4386-2282-6. – EDN FERIGZ.

2. Международный молодежный научный форум «ЛОМОНОСОВ-2023», г. Москва – Попова В.Г., Иванов Б.В., Рубчя А.В., Изменение ледовитости в Северо-Западной части Северного Ледовитого океана за период 1979-2022 г.г. // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2023» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, Е.И. Зимакова. [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2023. ISBN 978-5-317-06952-0

3. Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и

образование (MARESEDU)» 2023, г.Москва – Попова В.Г, Иванов Б.В., Рубченя А.В., Изменчивость ледовитости северо-западной части Северного Ледовитого океана в 1979-2022 г.г., в сборнике Труды XII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2023)», Том III (IV), место издания ООО "ПолиПРЕСС" Тверь, том 4, тезисы, с. 290-293

4. II Лавёровские чтения Арктика: актуальные проблемы и вызов, г. Архангельск - Попова В. Г., Иванов Б.В., Рубченя А.В., Показатели сплоченности морского льда в качестве индикатора изменения климата в северо-западной части Северного Ледовитого океана за период 1979-2022 Г.г // II Лавёровские чтения Арктика: актуальные проблемы и вызовы : Сборник научных материалов Всероссийской конференции с международным участием, Архангельск, 13–17 ноября 2023 года. – Архангельск: ООО "Типография № 2", 2023. – С. 92-94. – EDN JGBAEN.;

5. XX Большой географический фестиваль - 2024, г. Санкт-Петербург. («Аномалии ледовых характеристик северо-западной части Северного Ледовитого океана за период 1979-2022 гг. в различные сезоны» (в печати);

6. Попова В.Г., Рубченя А.В., Иванов Б.В. Некоторые особенности ледовых условий в северо-западной части Северного Ледовитого океана за период 1979-2022 гг. // Российская Арктика. 2024. Т. 6. № 1. С. 26-32. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-1-26-32>.

Структура выпускной квалификационной работы: перечень сокращений и условных обозначений, 5 глав, заключение, приложение, список использованных источников.

Во введение формулируются основные цели и задачи работы, предмет и объект исследований, представлены сведения об апробации результатов.

В первой главе представлено физико-географического описание района исследований.

Во второй главе дается обзор литературы по теме исследования.

В третьей главе описываются источники информации и данных, методы исследований.

В четвертой главе представлены результаты исследования ледовых характеристик и особенностей турбулентного теплообмена ледовой поверхности с атмосферой (надо разбить на параграфы).

Заключение включает основные результаты и выводы, а также предложения по продолжению исследований.

Список литературы включает в себя 41 использованных источников

Глава 1: Физико-географическое описание района исследования

Исследуемая территория (рис.1) полностью находится за Полярным кругом, где наблюдаются достаточно суровые климатические условия. В зимний период года над поверхностью моря средние температуры воздуха составляют от -20 до -25°C . В летний период температуры также отрицательны (от -0.5 до -3°C). Годовой приток суммарной солнечной радиации на поверхность морей Северного Ледовитого океана составляет, в среднем, от 2700 до 3000 МДж/м². Причем около 70% приходится на рассеянную солнечную радиацию. Это связано с тем, что количество облачности над данной территорией в течение всего года практически всегда максимально.

Наибольшее поступление солнечной радиации для исследуемой территории приходится на теплый период года (с мая по сентябрь). Но в связи с тем, что поверхность моря и в это время года покрыта льдом, приблизительно 60% суммарной солнечной радиации отражается в атмосферу [30].



Рис. 1. Района исследования (выделен чёрной линией) на схеме Северной полярной области (см. так же рис. 2).

Атмосферная циркуляция в исследуемом районе определяется влиянием следующих центров действия атмосферы (ЦДА): Исландской и Алеутской депрессий, а также областями Арктического и Сибирского максимумов атмосферного давления [10].

Атмосферная циркуляция имеет ярко выраженный сезонный характер. В зимний период определяется наличием двух центров действия атмосферы: Исландского минимума и Сибирского максимума. В следствие чего на данной территории преобладают ветра южного направления [1].

В теплый период года (май-сентябрь) наблюдается перестройка атмосферной циркуляции и формируется противоположный характер барического поля (преобладают Алеутская депрессия и Арктический максимум) [10].

В полярных морях можно выделить следующие ледовые системы: океанические ледяные массивы, дрейфующие льды окраинных морей, припайные льды, заприпайные полыньи и прогалины, разводья (зоны разрежения) на материковом склоне, а также зона ледовой кромки дрейфующих льдов [2].

Замерзание, таяние и движение морского льда определяются процессами взаимодействия атмосферы и океана (термодинамика и динамика). В некоторых районах Северного Ледовитого океана в последние годы площадь распространения и толщина морского льда заметно уменьшились, что привело к уменьшению средних по площади величин альбедо поверхности. Соответственно наблюдается увеличение поглощения солнечной радиации в поверхностном слое океана. Уменьшение морского льда зимой приводит к увеличению потока турбулентного тепла из океана в атмосферу, что обуславливает зимнее потепление приземной атмосферы [37].

Глава 2: Обзор литературы

Основное внимание большинства отечественных и зарубежных исследователей привлечено к проблеме современных изменений климата, как глобального, так и регионального (арктического) характера. Эти исследования проводятся при помощи различных методов, а также на основе различных данных.

По данным современных исследований в настоящее время наблюдается переход арктической климатической системы в ее новое состояние (процесс потепление климата). Быстрое сокращение площади, занимаемой многолетним ледяным покровом и его толщины рассматриваются как важные индикаторы изменения климата [39]. По мнению авторов данной работы, изменение ледовых характеристик затронуло всю площадь СЛО. Таяние морского способствует продолжающемуся потеплению. Такое же мнение выражают авторы статьи Иванов В.В., Алексеев В.В., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. «Арктический лед становится сезонным?» (Исследования Земли из Космоса. 2013; №4) [16].

В работе [6] указывается, что в настоящее время морские льды более чувствительны к изменениям внешних климатических воздействий, чем это предполагалось ранее. Автор указанной работы формулирует наиболее актуальный текущий вопрос в изучении ледового режима: *«насколько должна повыситься температура воздуха в высоких широтах, чтобы процесс таяния морского льда стал необратимым?»* (И.И. Борзенкова. История оледенения Арктического бассейна: взгляд из прошлого для оценки возможных изменений в будущем. Лёд и Снег. 2016; 56(2), стр. 231).

Основным выводом в работах большинства российских исследователей о процессах, наблюдаемых в Арктическом регионе, является то, что с середины прошлого века наблюдается устойчивое, описываемое линейным трендом, уменьшение площади морского льда. Такие авторы, как И.Е. Фролов, З.М. Гудкович, В.П. Карклин, Е.Г. Ковалев, В.М. Смоляницкий в своей статье «Климатические изменения ледовых условий в Арктических морях Евразийского шельфа» [31] говорят о том, что *«... наряду с уменьшением площади льда, испытывают изменения и другие его характеристики: толщина, сплоченность, положение границ многолетних льдов, схема генерального дрейфа льдов в Арктическом бассейне...»* (Проблемы Арктики и Антарктики. 2007, №75, стр.154).

Например, в работе Н.А. Лис, Е.А. Чернявской, Е.У. Миронова, Л.А. Тимохова, Е.С. Егоровой «Интенсивность факторов, формирующих долгопериодные колебания ледовитости отдельных районов Баренцева моря» (Российская Арктика, 2023, том 5, №2.) авторами проанализированы различные факторы, формирующие долгопериодные

изменения ледовитости западного, северо-восточного и юго-восточного районов Баренцева моря за период 1950–2022 гг. Отмечены совпадения различных по масштабу циклических колебаний ледовитости с одной стороны и индексами атмосферной циркуляции, атлантическим мультидекадным колебанием, солнечной активностью, параметрами нутации оси вращения Земли и другими астрогеофизическими характеристиками с другой стороны [20].

Современное состояние и перспективы дальнейших исследований ледяного покрова описаны в работе Е.У. Миронова, С.В. Клячкина, В.М. Смоляницкого, А.В. Юлина, С.В. Фролова «Современное состояние и перспективы исследований ледяного покрова морей российской Арктики» (Российская Арктика, 2020, №10) [22].

По мнению вышеуказанных авторов, основными современными, наиболее перспективными и востребованными направлениями исследований морского льда являются следующие:

1. Мониторинг состояния ледяного покрова на основе регулярных наблюдений на гидрометеорологических станциях и в специальных экспедициях;
2. Сбор, каталогизация и ведение электронного архива ледовых карт, тематических продуктов на основе данных ИСЗ;
3. Экспериментальные исследования физических процессов в ледяном покрове, математическое моделирование эволюции ледяного покрова;
4. Исследование закономерностей формирования ледового режима Северного Ледовитого океана и арктических морей;
5. Создание и совершенствование методов и технологий диагностики и прогноза ледовых условий на акваториях арктических морей;
6. Изучение ледовых условий судоходства в полярных районах, разработка методов и технологий навигационных рекомендаций.

Авторы указанной работы [22] обосновывают важность изучения, как общих закономерностей ледового режима Северного Ледовитого океана, так и выявление пространственно-временной изменчивости отдельных элементов ледового режима в арктических морях.

В последние несколько лет, в связи с увеличивающимся интересом к Арктическому региону, возрос интерес к применению дистанционных методов изучения труднодоступных регионов. На международной научной конференции «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики» (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, 2-4 марта 2020 года) такими авторами, как В.А. Волков и Н.Ю. Захваткина, Д.М. Демчев, А.В. Терехов в своем докладе «Применение

автоматизированных технологий обработки спутниковой информации при подготовке оперативных навигационных карт ледовой обстановки» [9] рассматривают теоретические основы построения оперативных навигационных ледовых карт нового поколения на основе данных спутникового радиолокационного зондирования с применением эксклюзивных автоматизированных технологий. В указанной работе приводятся примеры таких карт и описываются возможности их применения для обеспечения безопасности мореплавания, буровых и аварийно-спасательных работ на шельфе арктических морей. Авторы доклада так говорят о созданных картах: *«Ледовые карты нового поколения отражают для каждого из спутниковых изображений практически мгновенное распределение льдов разного возраста. На карте можно «читать» результаты динамического воздействия циркуляции атмосферы или воздействия дрейфа, вызванного постоянными течениями, контролировать процессы образования льда на кромках, отслеживать динамику полыней и разводий, контролировать процессы разрушения ледяного покрова в период таяния»* (стр.237) [9].

В работе А.В. Юлина, Н.А. Вязигиной, Е.С. Егоровой «Межгодовая и сезонная изменчивость площади льдов в Северном ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений» (Российская Арктика, 2019, №7) [32] проанализированы межгодовые и сезонные изменения площади льда Северного Ледовитого океана по результатам спутникового мониторинга за ряд наблюдений 1978–2018 гг. Отмечено, что за исследуемый период площадь ледяного покрова устойчиво сокращалась, особенно в летний сезон, причём в последнее десятилетие (2009–2018 гг.) скорость её уменьшения заметно возросла [32].

Коллектив авторов в лице Репиной И.А., Артамонова А.Ю., Варенцова М.И., Хавина Е.М. в своей работе «Взаимодействие атмосферы и океана в Северном Ледовитом океане по данным измерений в летне-осенний период» (Российская Арктика, 2019, №7) [29] рассматривают один из основных вопросов взаимодействия океана и атмосферы – количественную оценку процессов энерго- и массообмена. Данные процессы в наиболее сложном виде представлены в Арктическом бассейне, так как ледяной покров определяет изменение альбедо, потоки тепла и влаги, а также динамическое взаимодействие между океаном и атмосферой. Авторами выявлено влияние толщины и сплоченности льда на турбулентный энергообмен подстилающей поверхности с атмосферой [29].

Период 2007-2013 гг. характеризовался крупномасштабной перестройкой в развитии атмосферных процессов и крупными аномалиями в развитии ледяного покрова. Данный вывод сделан в работе З.М. Гудковича, В.П. Карклина, Е.У. Миронова, В.В. Иванова, С.М. Лосева, Л.Н. Дымент, В.М. Смоляницкого, С.В. Фролова, А.В. Юлина и Е.А. Усольцевой «Развитие ледовых и метеорологических условий в Арктике в период 2007-2013 гг.»

(Проблемы Арктики и Антарктики, 2013, № 2(96)) [12]. Авторы данной работы приводят следующие причины выявленных явлений: *«в осенне-зимний период увеличилась повторяемость Арктического антициклона, его усиление и смещение на запад приводит к блокированию атлантических морей и Арктического бассейна, примыкающую с Северной Атлантике. Увеличение повторяемости Арктического антициклона в зимнее время сформировало устойчивый дрейф льдов в Арктическом бассейне, при этом центр циркуляции также смещался в западном направлении»* (стр. 90).

С экономической точки зрения интерес ученых к Арктическому региону обусловлен, в первую очередь, благоприятными возможностями продления навигации в связи с быстроменяющимся климатом, а именно его потеплением. В работе И.И. Мохова и В.Ч. Хона «Продолжительность навигационного периода и ее изменения для Северного морского пути: модельные оценки» (Доклады РАН. 2007. Т. 414) получены оценки продолжительности навигационного периода и ее изменений в 1980-2013 гг. для Северного морского пути на основе спутниковых данных о концентрации морских льдов в Арктическом бассейне [23]. Авторы отмечают: *«в связи с изменениями климата и режима морских льдов в Арктике следует ожидать соответствующих изменений ветрового и циклонического режима в атмосфере, морского волнения и айсберговой активности в Арктическом бассейне»* (стр. 94).

Во Втором оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [3] об Арктическом регионе говорится следующее: *«Толщина морского льда в Арктическом бассейне уменьшилась с 1980-х годов в среднем более чем на 40%, главным образом, вследствие уменьшения количества многолетних льдов. Продолжение согласованных тенденций повышения температуры воздуха и уменьшения площади льда при сохранении наблюдаемых темпов потепления указывает на 2030-е годы как на период, начиная с которого лед в сентябре может исчезнуть»* (стр. 17) [3].

Из вышесказанного следует сделать вывод, что климатические изменения в Арктическом регионе возрастают в сторону потепления в последние десятилетия и это вызывает повышенный интерес у всего мирового научного сообщества, экономистов и представителей бизнеса. Арктический регион имеет большой хозяйственный и экономический потенциал. Но мероприятия по адаптации экономики, населения, природных комплексов к меняющимся климатическим условиям и собственно последствия климатических изменений еще недостаточно освещены в научной литературе. Например, в работе В.М. Катцова и Б.Н. Порфирьева «Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики» (Арктика: экология и экономика, 2012, №2(6)) [18]

обсуждаются последствия ожидаемых изменений климата. Изменение ледового режима СЛО важно как для экосистем, так и для экономики, социальной сферы и национальной безопасности РФ. В первую очередь, ожидается увеличение продолжительности летней навигации и развитие, в связи с этим, морского судоходства. Также в связи с уменьшением толщины и площади распространения морского льда, облегчится доступ к природным ресурсам Арктики, включая, в первую очередь, месторождения углеводородного сырья на шельфе СЛО. Это, в свою очередь, предоставляет возможности создания новых рабочих мест, промышленного и социального развития Арктической зоны Российской Федерации в целом. Из вероятных негативных последствий потепления климата можно выделить усиление разрушительных воздействий штормов на береговую зону в связи с уменьшением площади ледяного покрова арктических морей и соответствующего увеличения пространств открытой воды. Возможно нанесение значительного ущерба хозяйственным и промышленным объектам и проживающему на данной территории населению. Также могут произойти драматические и необратимые процессы в полярных морских и береговых (тундровых) экосистемах, флоре и фауне [18]. Авторы этой работы приводят несколько важных примеров воздействия изменений климата на окружающую среду и население Арктики (стр.74):

- 1. Ускорение эрозии берегов в результате штормовой активности;*
- 2. Увеличение продуктивности северных экосистем;*
- 3. Сокращение или исчезновение, и/или миграцию существующих видов растительных и живых организмов;*
- 4. При сохранении современных тенденций изменений климата, к концу XXI века, около 20% современной площади тундры и полярных пустынь будут замещены другими типами растительности;*
- 5. Угрозы здоровью коренного населения, в том числе из-за изменений жизненного уклада, структуры питания и занятости.*

Резюмируя все вышесказанное, можно рассматривать наши скромные исследования и представленные ниже предварительные результаты, как действия, отвечающие современным вызовам.

Глава 3: Материалы и методы

В работе использованы материалы базы данных (БД) по морскому льду Арктического и антарктического научно-исследовательского института [33]. Исследуемый район – сектора акватории СЛО (№26, 27, 34) между Северным полюсом, Гренландией, Шпицбергом и Землей Франца-Иосифа, общей площадью 980,5 тыс. км² (см. рис. 2а) [22].

Район выбран по причине того, что он в наименьшей степени исследован российскими и зарубежными авторами. Данная территория представляет интерес с той точки зрения, что именно здесь всегда наблюдаются максимальные площади, занятые многолетними льдами в течение всего года по сравнению с другими районами СЛО, например, примыкающими к окраинным арктическим морям. Также здесь происходит основной вынос арктических льдов из центральной части бассейна (через пролив Фрама). Данный выбор сделан также и потому, что в данном районе можно ожидать минимальную изменчивость ледовитости и сплоченности, поскольку ледяной покров здесь присутствует круглогодично. По классификации ААНИИ это сектора с номерами 26, 27, и 34 (см. рис. 2б) [29].

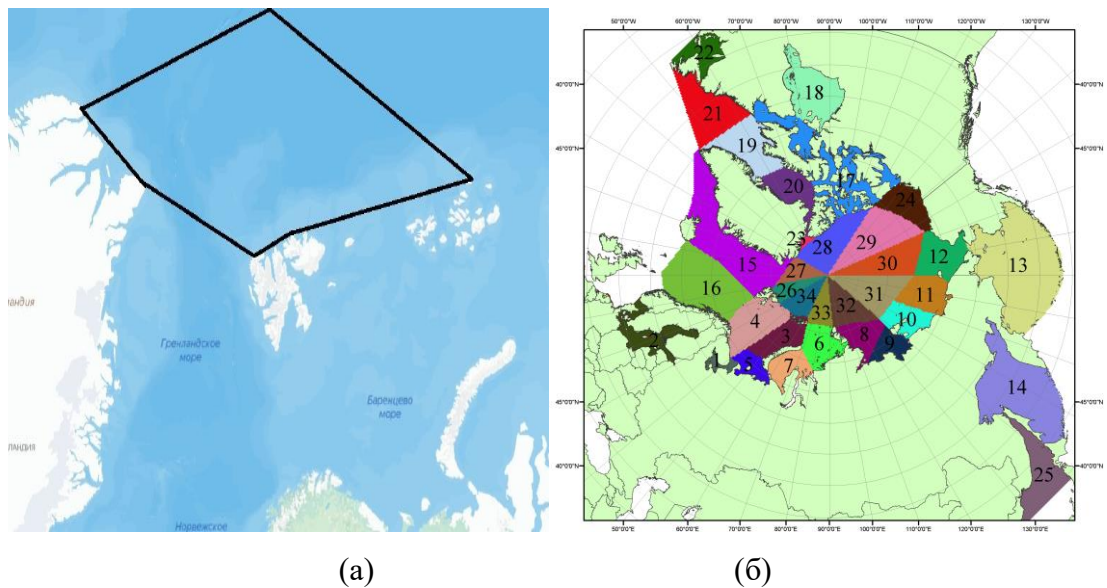


Рис. 2. Район исследований (а) и общее районирование СЛО по классификации ААНИИ (б)

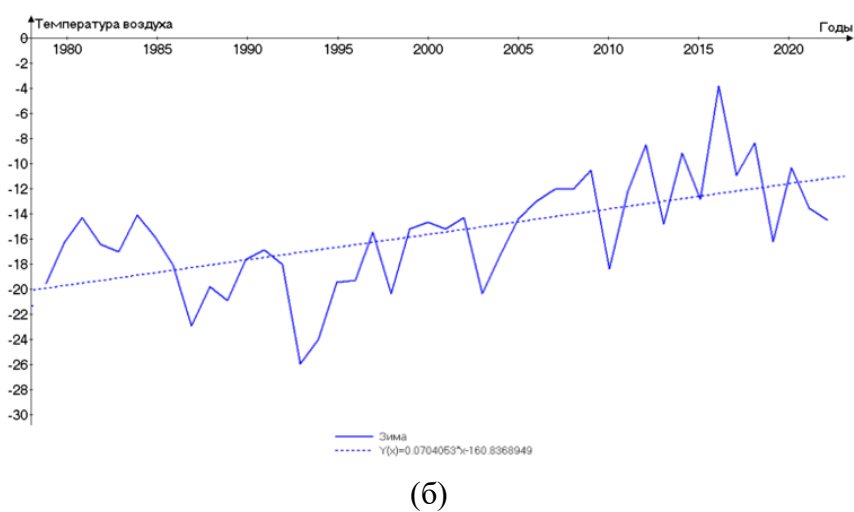
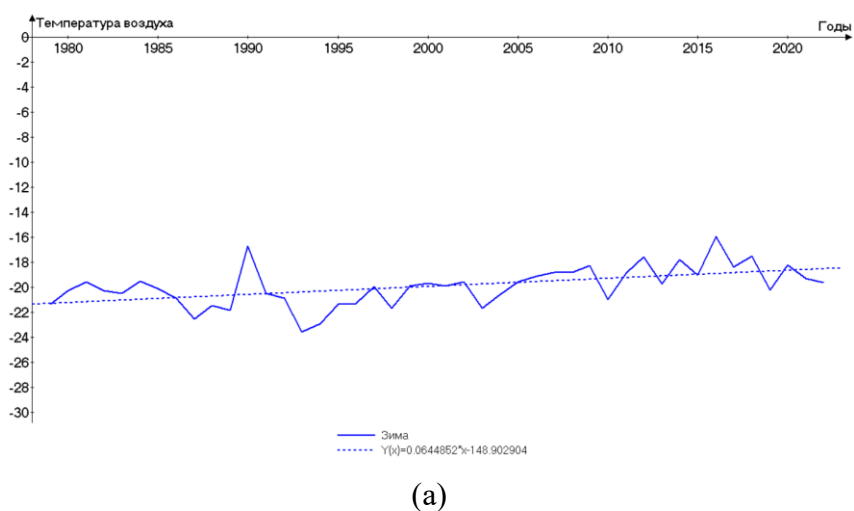
Для каждого сектора из вышеуказанной БД использованы уже рассчитанные средние по площади каждого сектора среднемесячные оценки ледовитости и сплоченности.

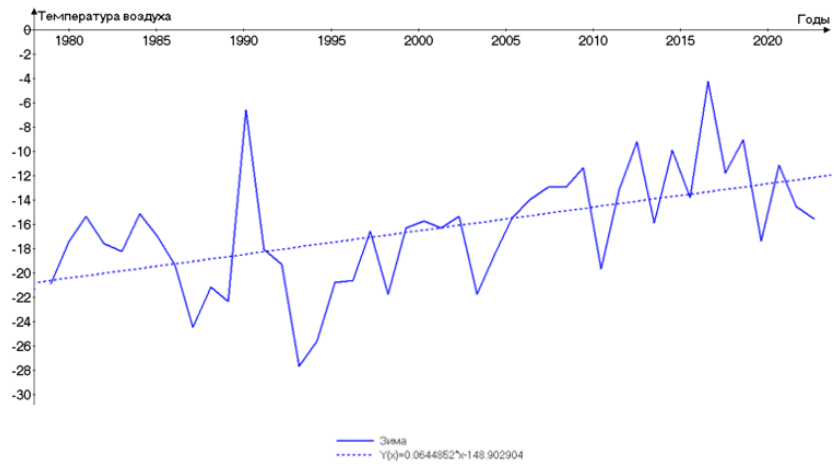
Для статистической обработки рядов данных по ледовитости и сплоченности был использован метод регрессионного анализа [17]. Мы использовали линейное соотношение (линейный тренд) для статистической оценки изменений искомых величин:

$$Y = aX + b \quad (1),$$

где Y – ледовитость или сплоченность, X – время (года).

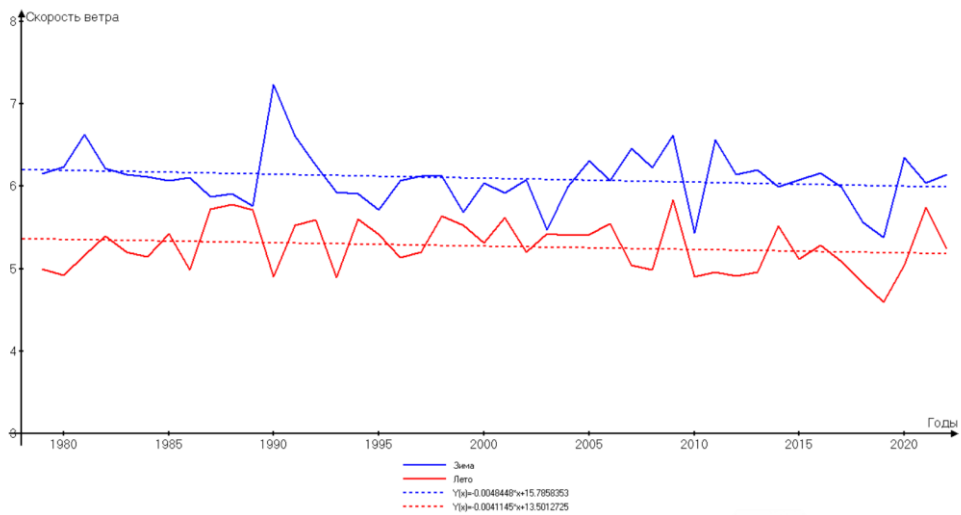
Источником метеорологических данных послужил архив данных реанализа ERA5 [38]. Данные доступны с 1940 г. по настоящее время. ERA5 предоставляет почасовые оценки для большого количества параметров приземной атмосферы, океана и поверхности суши. Данные реанализа ERA5 обновляется ежедневно с задержкой около 5 дней. Пространственное разрешение – 25 x 25 миль. Реанализ объединяет модельные данные и данные регулярных наблюдений. Этот принцип, называемый ассимиляцией данных, основан на методе, когда каждые 12 часов предыдущий прогноз оптимальным образом комбинируется с новыми доступными данными наблюдений для получения наилучшей оценки состояния атмосферы и океана [38]. На рисунках 3 и 4 представлены значения приземной температуры воздуха для каждого выбранного района в зимний период, а также значения скорости ветра в оба выбранных сезона [36].



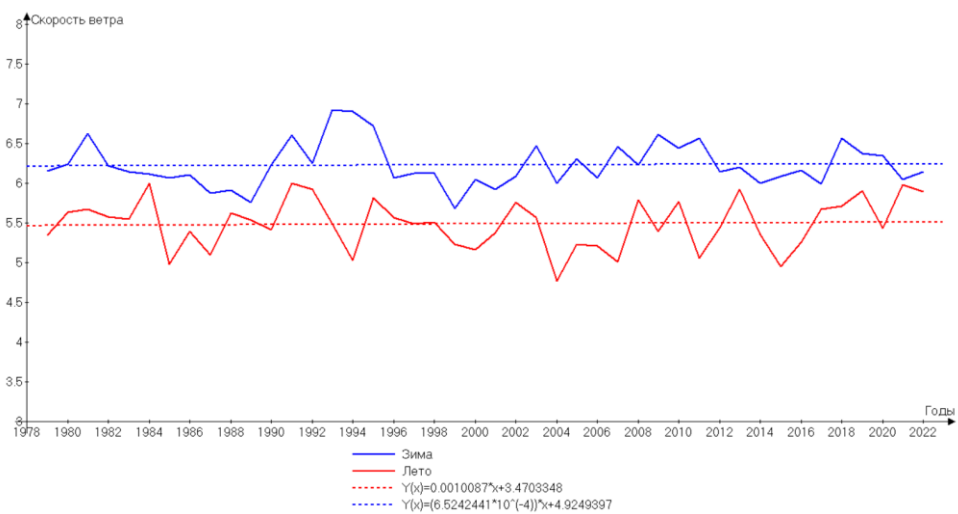


(в)

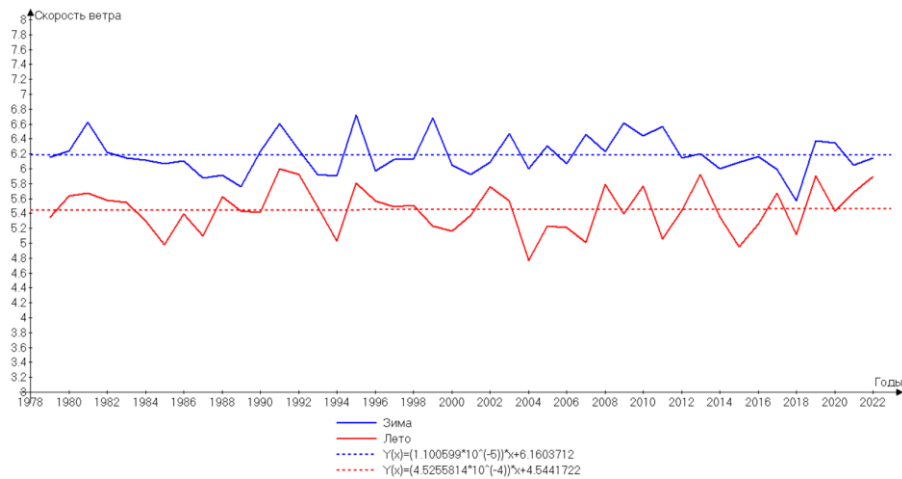
Рис.3. Приземная температура воздуха для района №26 (а), №27 (б), №34 (в) в зимний период года



(а)



(б)



(в)

Рис.4. Скорость ветра для района №26 (а), №27 (б), №34 (в)

Для расчета вертикальных турбулентных потоков тепла в различные сезоны года в работе была использована следующая формула [21]:

$$H = \rho c_p St u (T_0 - T) \quad (1)$$

где H – турбулентный поток тепла; ρ – плотность воздуха; c_p – удельная теплоемкость воздуха; St – число Стентона; u – скорость ветра (Приложение 1); T_0 – температура поверхности; T – температура воздуха на высоте 2 м (Приложение 2).

При расчете турбулентных потоков тепла были приняты следующие константы: $\rho = 1.37 \text{ кг/м}^3$; $c_p = 1,006 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$.

Число Стентона характеризует интенсивность теплоотдачи (конвективный перенос тепла) и является безразмерной величиной. Для зимнего периода число Стентона выбрано равным $1.7 \cdot 10^{-3}$, для летнего - $1.3 \cdot 10^{-3}$ [21]. Для зимнего периода температура поверхности воды принималась равной -1.8°C . Поскольку для данных осредненных за значительный временной промежуток условие равенства приземной температуры воздуха и температуры поверхности льда вполне приемлемо [21], турбулентные потоки над поверхностью льда в зимний период принимаются равными нулю. В летний период температура поверхности снежно-ледяного покрова принимается равной температуре плавления (таяния) пресного льда – 0°C , а в результате стока пресной воды с поверхности тающего льда, температура поверхности воды в разводьях также принимается близкой к нулю градусов. Таким образом температурные контрасты поверхности льда и участков открытой воды практически отсутствуют и для наших предварительных оценок турбулентных потоков тепла в летний период, когда температура открытой водной поверхности и поверхности льда принималась

равной нулю градусов, то учет сплоченности, фактически, терял смысл. Мы отдаем себе отчет в том, что сильно упростили алгоритм для оценки турбулентных потоков тепла в различные сезоны года. Однако полагаем, что такой подход можно рассматривать как первое приближение к изучению климатологии турбулентного обмена в таком малоизученном районе Арктики.

Расчет потоков турбулентного тепла производился для двух периодов года: зимний (октябрь-май) и летний (июнь-сентябрь) [22, 32].

Данная классификация выделена специалистами ААНИИ в связи с процессами сезонного изменения ледяного покрова. В летний период (с июня по сентябрь) наблюдается наибольшее сокращение площади льда. С октября по май наблюдается нарастание ледяного покрова и достигается максимум значений в апреле [22].

Глава 4: Основные результаты исследований

4.1. Ледовитость северо-западной части Северного Ледовитого океана

Анализ ледовых условий в выбранном регионе был выполнен для периода 1979-2022 гг. Основной результат представлен на рисунке 5, из которого следует, что за исследуемый интервал времени наблюдается устойчивое уменьшение ледовитости, которое наиболее ярко проявилось в июне. Приблизительно с 2006 года сокращение ледовитости в исследуемом районе СЛО наблюдается практически во все сезоны года. При этом в некоторые года в зимний период полного покрытия района ледяным покровом (максимальная ледовитость, равная 980,5 тыс.км²) не наблюдается [24].

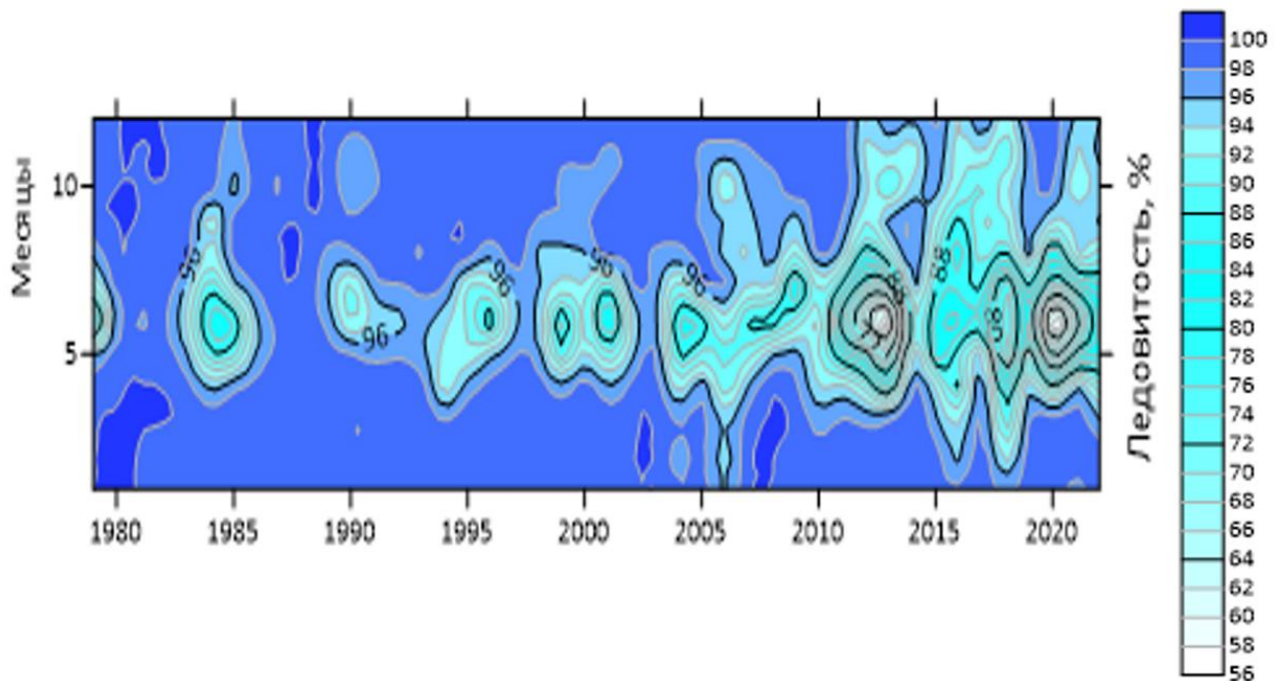


Рис. 5. Ледовитость (в %) исследуемого района по данным БД ААНИИ за период 1979-2022 гг.

В работе были рассчитаны значения аномалий ледовитости относительно среднего значения для всего периода наблюдений (см. рис. 6). Начиная с начала инструментальных наблюдений и практически до 2011 года отмечалась тенденция, соответствующая устойчивому уменьшению положительных аномалий ледовитости. После 2011 г. аномалии ледовитости сменили знак, перейдя в отрицательную область. В последующий период (2011-2022 гг.) наблюдалось значительное возрастание межгодовой изменчивости аномалий ледовитости. Хотя, собственно, характер изменения аномалий ледовитости (отрицательный тренд) изменился незначительно: с -9.1 тыс. км²/10 лет до -7.3 тыс. км², соответственно. При этом колебания среднегодовых значений ледовитости в этот период проходили относительно

среднего значения, находящегося на уровне отрицательной аномалии равной, приблизительно -42 ± 5 тыс. км². При этом максимальные величины отрицательных аномалий достигали 100 тыс. км² (2018 г.), что составляет, порядка, 10% от значения максимальной ледовитости в исследуемом районе. Таким образом при сохранении общей тенденции многолетних изменений ледовитости за весь рассматриваемый период (1979-2022 гг.), период 1979-2011 гг. характеризуются слабой межгодовой изменчивостью по сравнению с периодом 2011-2022 гг. Из вышесказанного можно сделать вывод, что за последние 10 лет произошла смена ледового режима, что может косвенно свидетельствовать об изменении климатических условий в исследуемом регионе [25].

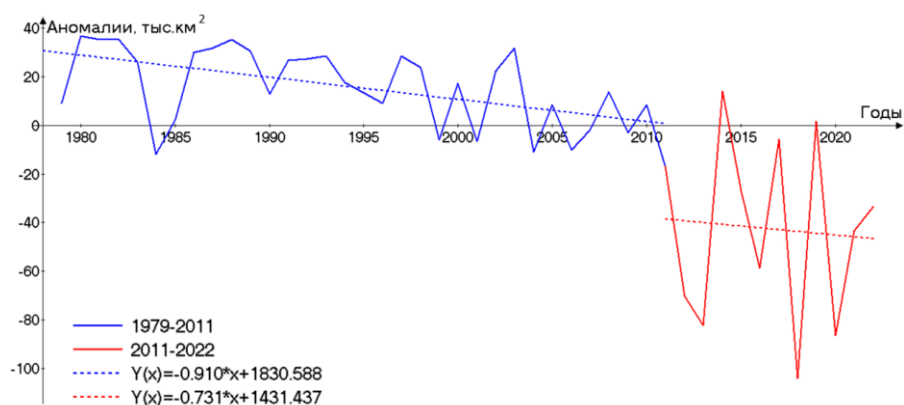


Рис. 6. Аномалии ледовитости относительно среднего за период 1979-2022 гг. (1979-2011; 2011-2022 – периоды для оценки трендов, представленных на рисунке)

Были произведены расчеты интервалов времени (количества суток), в течение которых в зимний период (с октября по май) ледовитость района достигала максимума, т.е. покрытие акватории льдами любой сплоченности составляло 100%. Результаты представлены на рисунке 7.

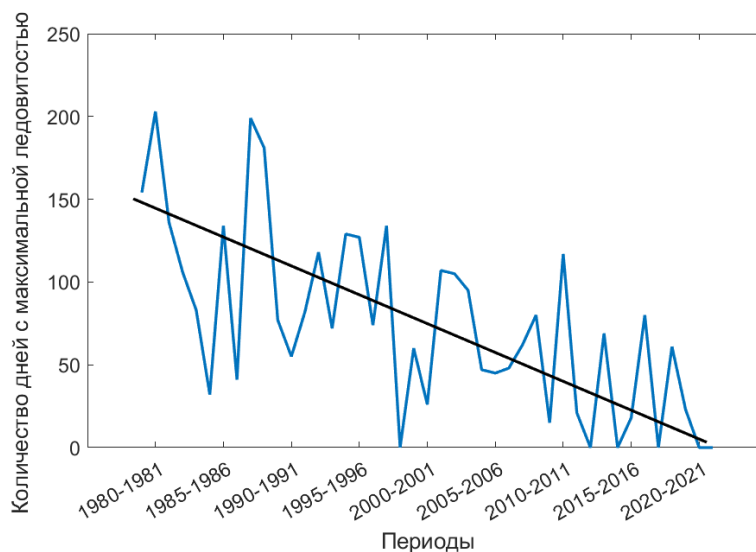


Рис. 7. Количество дней с максимальной ледовитостью в зимний период года

Как следует из рисунка 7, в последние 10-15 лет показатель ледовитости даже в зимний период времени не достигает максимума, то есть не происходит полного заполнения льдом акватории. Тогда как ранее данная картина наблюдалась лишь 1 раз (зимой 1999-2000 гг.) [26].

4.2. Сплоченность льда в северо-западной части Северного Ледовитого океана

По показателям сплоченности для выбранных районов можно выделить следующие закономерности (рис. 8):

Во всех выбранных районах наблюдается тенденция к уменьшению значений сплоченности.

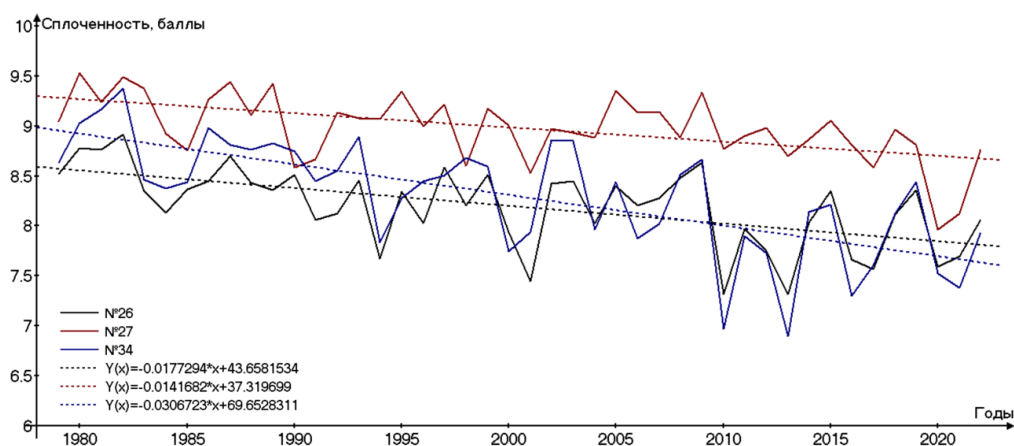


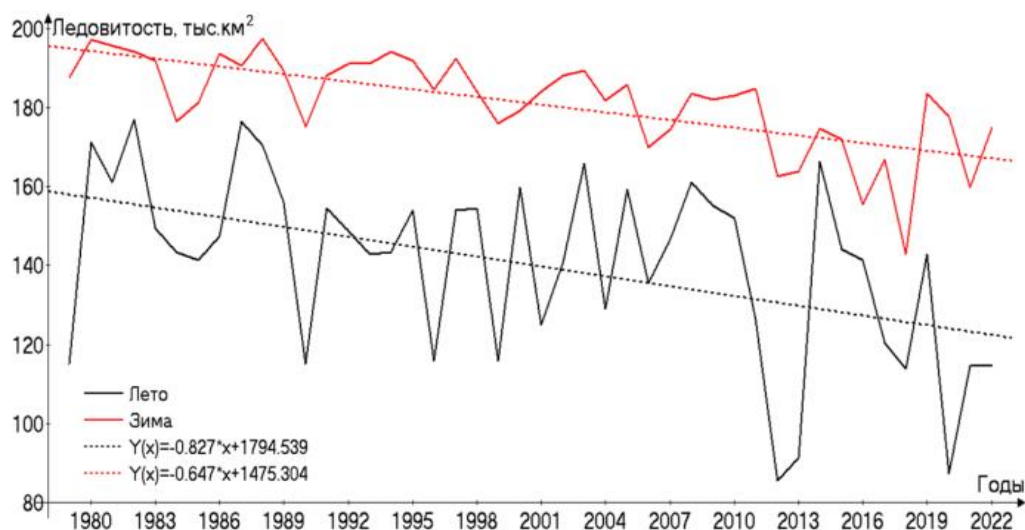
Рис. 8. Среднегодовая сплоченность по данным БД ААНИИ (1979-2022г.г.)

Наименьшие значения сплоченности во всех исследуемых районах наблюдается в 2016 году. Также следует отметить, что максимальных значений сплоченности, равной 10 баллам, за весь период исследования не наблюдалось [27].

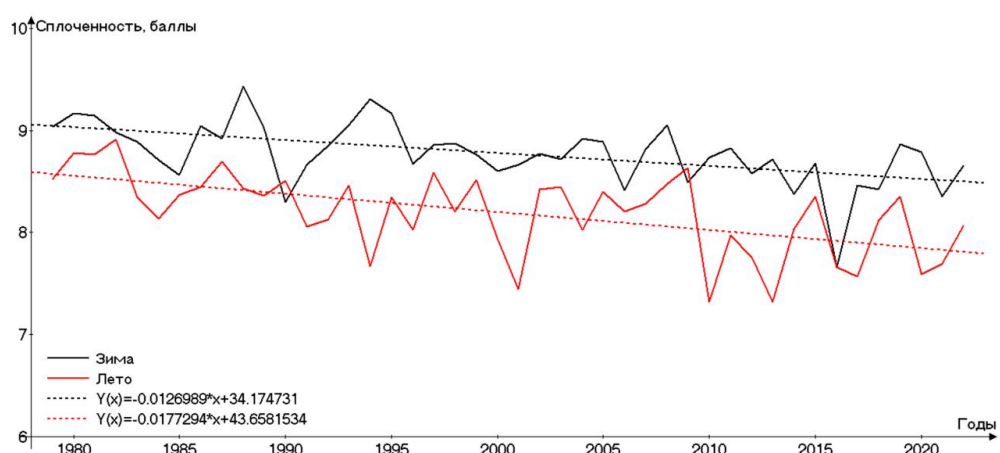
4.3. Сравнение ледовых характеристик в северо-западной части Северного Ледовитого океана

Сравнение характера изменения ледовитости и сплоченности за весь период наблюдений для отдельных сезонов года, которые были определены в соответствии с рекомендациями специалистов ААНИИ (зима: октябрь-май, лето: июнь-сентябрь) был выполнен на примере района №26 (см. рисунок 9). Выбор данного района обусловлен тем обстоятельством, что в нем наиболее ярко прослеживаются выявленные ранее отрицательные

тренды. Характеристики ледовитости и сплоченности для остальных районов представлены в Приложении 1.



(а)



(б)

Рис. 9. Значения ледовитости (а) и сплоченности (б) в зимний и летний период года.

В целом, и в летний, и в зимний периоды тенденции изменения обеих характеристик совпадают как по знаку, так и, практически, по скорости.

Далее, для каждого района в отдельности мы оценили аномалии ледовитости и сплоченности для зимнего и летнего периодов. В целом временной ход (характер изменений) значений аномалий ледовитости и сплоченности совпадает для каждого выбранного района (рис.10, 11, 12). Также во всех выбранных районах и для значений ледовитости, и для значений сплоченности наблюдаются отрицательные тренды.

В районах № 26 и 27, занимающих большую площадь, по сравнению с районом №34, межгодовая изменчивость значений аномалий ледовитости за исследуемый период оказалась более значительной по сравнению с районом №34 (рис.8).

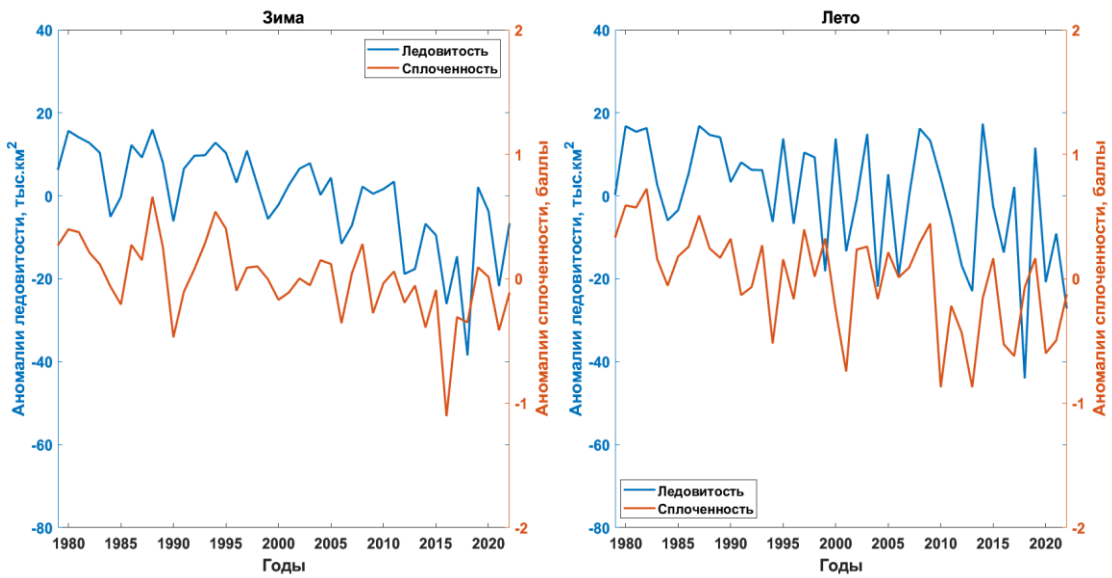


Рис. 10. Аномалии ледовитости и сплоченности в зимний и летний период в районе № 26

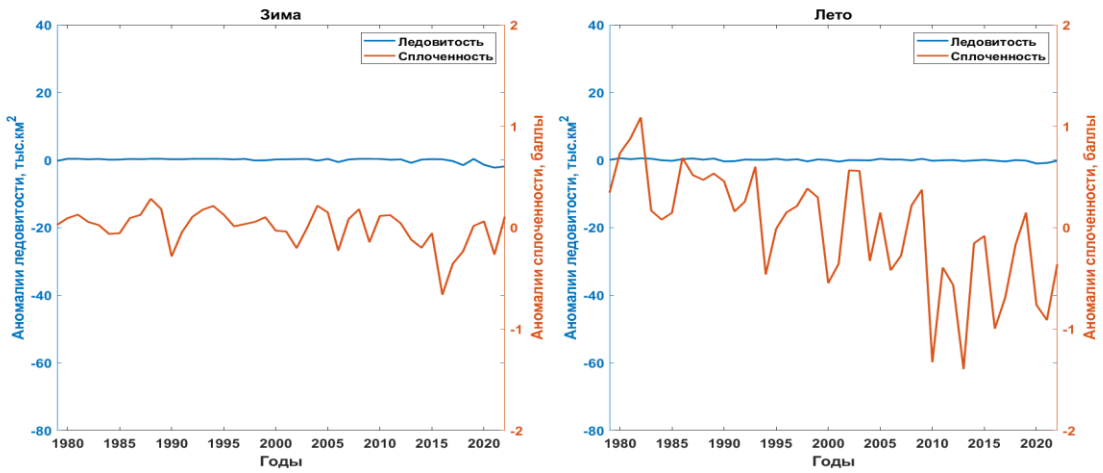


Рис. 11. Аномалии ледовитости и сплоченности в зимний и летний период в районе № 27

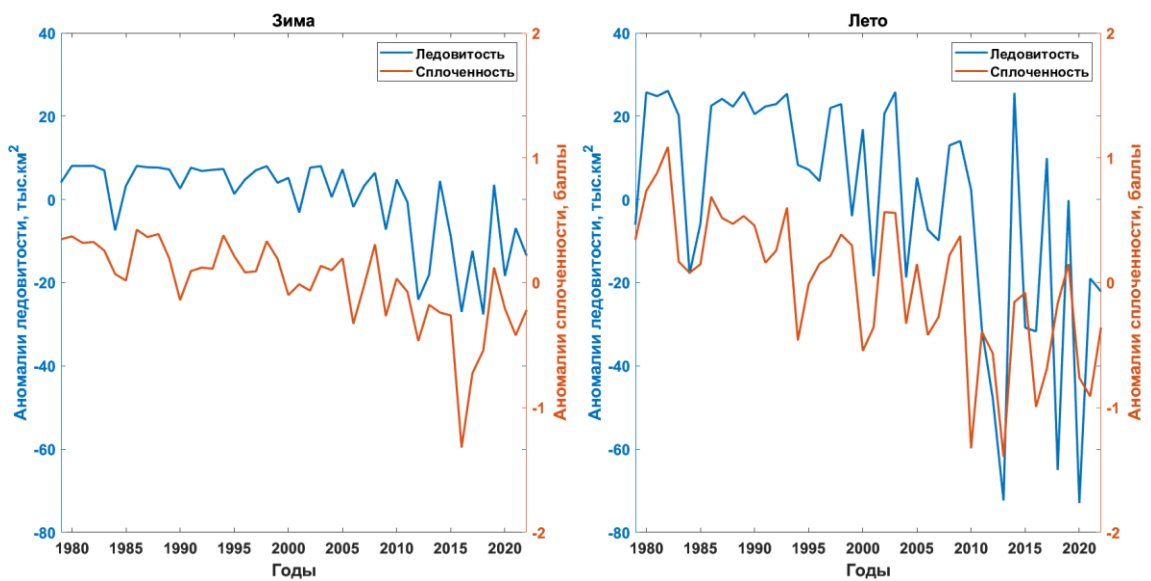


Рис. 12. Аномалии ледовитости и сплоченности в зимний и летний период в районе № 34

Характеристики линейных трендов (вид линейных регрессий) аномалий ледовитости и сплоченности для каждого района в отдельности, а также такие статистические характеристики, как стандартное отклонение (мера величины вариации или дисперсии набора значений) и коэффициенты детерминации для зимнего и летнего периодов года представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Стандартное отклонение (СО) для значений аномалий ледовитости для районов 26 и 34 достаточно высоки. Причем летом данный показатель значительно выше, чем зимой. Минимальные величины стандартного отклонения наблюдались в районе №27.

Таблица 1 – Статистические показатели ледовитости (Л) и сплоченности (С) для зимнего периода

Показатели	Район №26		Район №27		Район №34	
	Л	С	Л	С	Л	С
СО	8.51	0.26	0.52	0.17	7.81	0.25
R ²	0.49	0.28	0.29	0.15	0.42	0.48
Y(x)	-0.65x+1294.07	-0.01x+25.41	-0.03x+52.06	-0.01x+10.73	-0.51x+1030.07	-0.01x+36.85

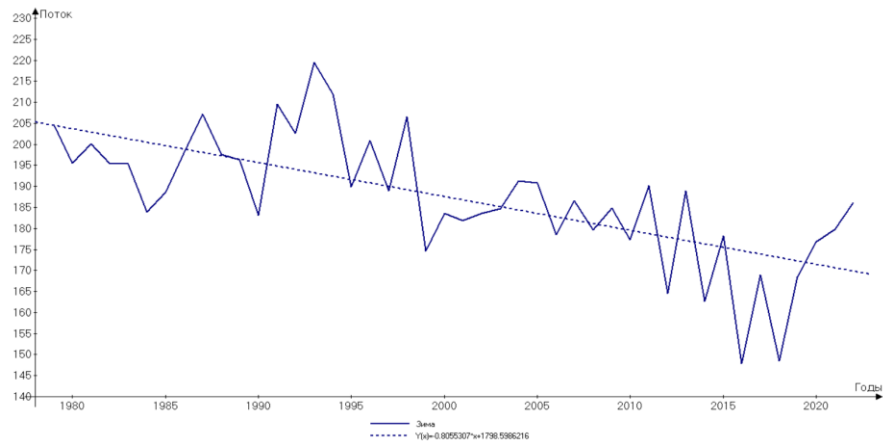
Таблица 2 – Статистические показатели ледовитости (Л) и сплоченности (С) для летнего периода

Показатели	Район №26		Район №27		Район №34	
	Л	С	Л	С	Л	С
СО	12.76	0.33	1.51	0.28	22.02	0.41
R ²	0.23	0.33	0.13	0.30	0.36	0.48
Y(x)	-0.54x+1088.33	-0.02x+35.47	-0.05x+89.37	-0.01x+28.34	-1.28x+2560.63	-0.03x+61.36

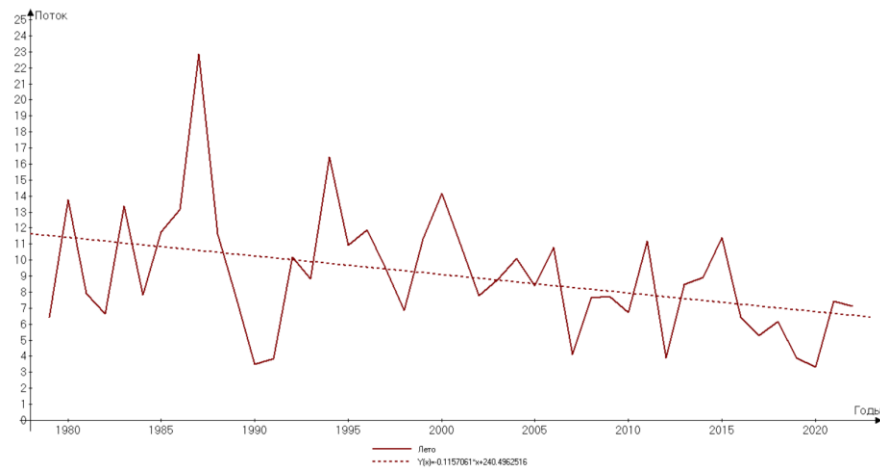
Максимальные значений коэффициентов детерминации характерны для районов №26 и 34, минимальные величины наблюдались для района №27 [27].

4.4. Турбулентный теплообмен в северо-западной части Северного Ледовитого океана

Для зимнего (рис. 13а) и летнего (рис. 13.б) периодов были рассчитаны вертикальные турбулентные потоки тепла по формуле (1) на примере района № 26. При этом оценки турбулентных потоков тепла для зимнего периода представляют собой величины, рассчитанные только для участков с открытой поверхности воды, температура которой, как указывалось выше, принималась равной -1.8 °С. Результаты расчетов для района № 27 и № 34 приведены отдельно в Приложении 2.



(а)



(б)

Рис. 13. Турбулентный поток тепла для зимнего (а) и летнего (б) периодов

Для обоих выбранных сезонов наблюдаются отрицательные тренды величин турбулентных потоков, при этом потоки для обоих сезонов направлены из океана в атмосферу.

Для определения средних по площади (с учетом сплоченности) значений турбулентного потока тепла из океана в атмосферу в зимний период была использована следующая формула

$$H = \frac{H_w * (10 - N) + H_{ice} * N}{10}, \quad (2)$$

где H_w – турбулентный поток тепла с поверхности воды, H_{ice} – турбулентный поток с поверхности льда, N – сплоченность льда

С учетом использованного нами приближения об отсутствии турбулентного теплообмена над поверхностью льда ($H_{ice} = 0$), она принимает следующий вид:

$$H = \frac{H_w * (10 - N)}{10} \quad (2a)$$

Результаты расчетов по формуле 2a представлены на рисунке 14:

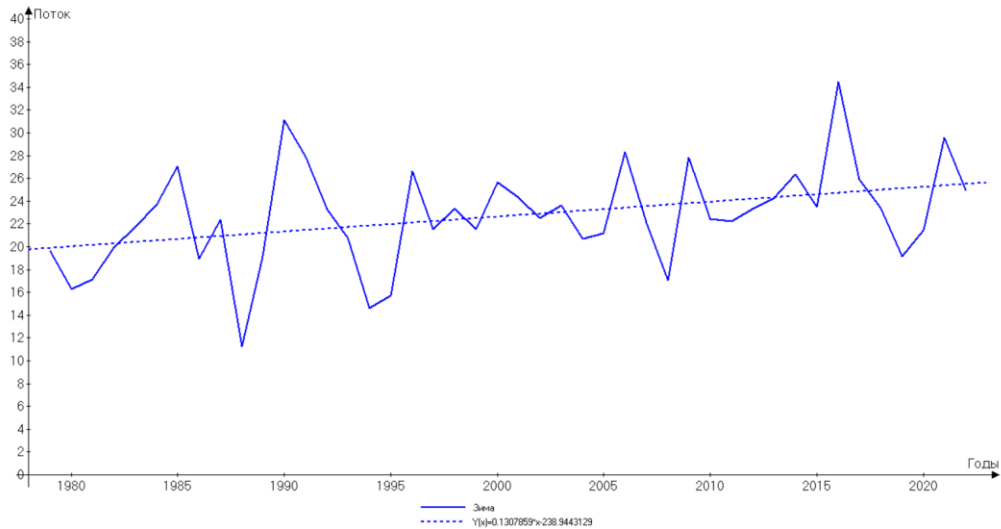


Рис. 14. Турбулентный поток тепла из океана в атмосферу в зимний период

Как следует из рисунка 14, турбулентный поток тепла из океана в атмосферу имеет тенденцию к увеличению за весь исследуемый период наблюдений. Таким образом только лишь сокращение сплоченности (или увеличение пространств чистой воды) за исследуемый период может являться причиной, увеличения теплоотдачи в атмосферу в зимний период года и формирования полученной положительной тенденции теплоотдачи из океана в атмосферу в климатическом масштабе. Увеличение пространств чистой воды в зимний период способствует прогреванию приземного слоя арктической атмосферы и, в итоге, к снижению меридионального градиента приземной температуры воздуха.

Заключение

В результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы, которые, безусловно, носят предварительный характер:

1. Увеличение пространств чистой воды в летний период (уменьшение сплоченности ледяного покрова) способствует повышенному поглощению солнечной энергии и, как следствие, более интенсивному таянию льда, как с боковой, так и нижней поверхности. Результат – сокращение общего количества (массы) льда.
2. Уменьшение сплоченности в зимний период способствует увеличению теплоотдачи в атмосферу за счет вертикальных турбулентных потоков явного и скрытого тепла с пространств открытой воды. Это, в свою очередь, обуславливает повышение температуры воздуха в приземном слое атмосферы, что, собственно, мы и наблюдаем в высоких широтах при анализе не только средних зимних температур воздуха, но и среднегодовых значений.
3. Выявлено общее уменьшение ледовитости и сплоченности льда в рассмотренной акватории СЛО, что указывает на увеличение пространств чистой воды и на соответствующее увеличение теплоотдачи в атмосферу, как минимум в зимний период года.
4. Весь исследуемый интервал времени (1979-2022 гг.) можно разделить на два периода, каждый из которых характеризуется своим собственным индивидуальным ледовым режимом. Первый период - «устойчивый режим» (1979-2011 гг.), когда межгодовая изменчивость ледовитости была незначительна. Вторым периодом - «современный режим» (2012-2022 гг.), когда наблюдается значительное увеличение межгодовой изменчивости ледовитости, а также не наблюдается полного покрытия льдом исследуемой акватории в зимний период.

В целом, выявленные нами особенностям ледовых условий соответствуют ситуации, которую ведущие отечественные климатологи определяют, как «положительная» фаза Арктического колебания. Данная фаза наблюдается с начала 1970-х годов XX столетия, хотя в последние десятилетия она и переходит в более нейтральное состояние.

Список использованных источников

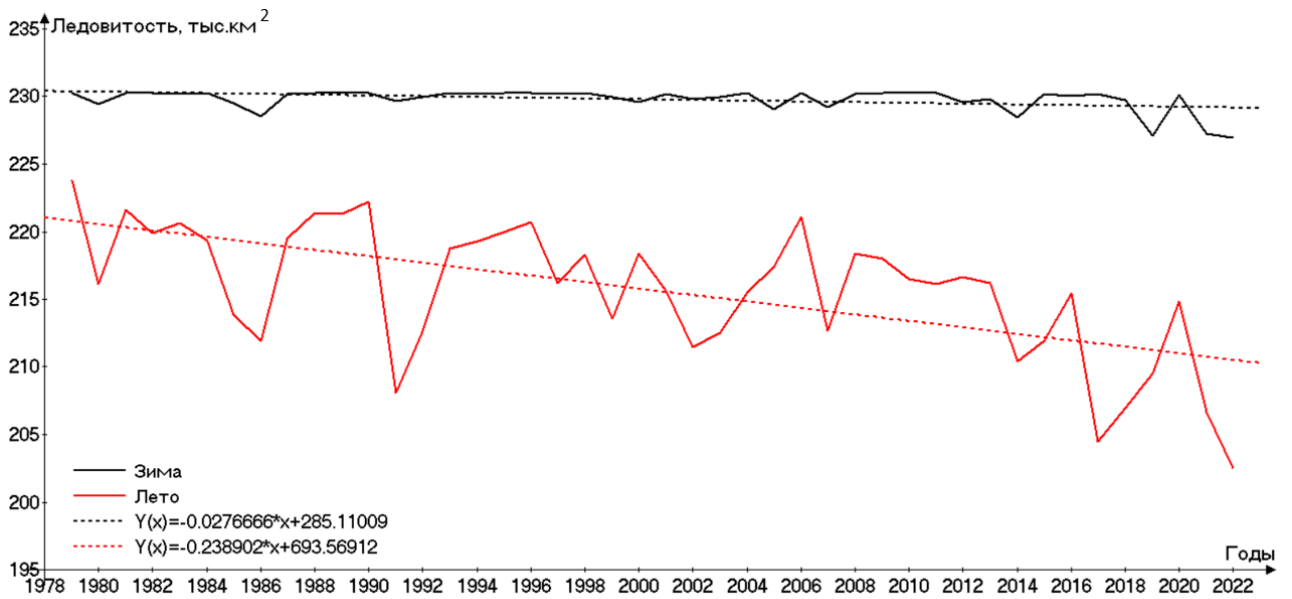
1. Атлас Арктики. Редактор Трешников А.Ф. М. Главное управление геодезии и картографии. 1985. 204 с.;
2. Атлас биологического разнообразия морей и побережий российской Арктики. М. WWF России. 2011. 64 с.;
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М.: Росгидромет, 2014. — 1008 с.;
4. Океан и его ресурсы: Учеб. пособие для студентов вузов / В. Ф. Брызгин; М-во образования Рос. Федерации. Карел. гос. пед. ун-т. - Петрозаводск : КГПУ, 2001. - 158, [1] с. : ил., табл.; 21 см.; ISBN 5-900275-72-0;
5. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И. и др. Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015б. № 1 (103).;
6. Борзенкова И.И. История оледенения Арктического бассейна: взгляд из прошлого для оценки возможных изменений в будущем. Лёд и Снег. 2016;56(2):221-234. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-221-234>;
7. Волков В.А., Мушта А.В., Демчев Д.М., Коржиков А.Я., Сандвен С. Связь крупномасштабной изменчивости поля дрейфа льда в Северном Ледовитом океане с климатическими изменениями общей ледовитости, происходящими в течение последних десятилетий. Проблемы Арктики и Антарктики. 2016;(2):50-63.;
8. Волков В.А., Мушта А.В., Демчев Д.М. Закономерности изменения крупномасштабной структуры поля дрейфа морского льда в Северном Ледовитом океане (на основе спутниковых данных 1978–2017 гг.) // Доклады Российской Академии наук. 2019. Т. 488 №4. С. 437-439;
9. Волков В.А., Захваткина Н.Ю., Демчев Д.М., Терехов А.В. Применение автоматизированных технологий обработки спутниковой информации при подготовке оперативных навигационных карт ледовой обстановки // Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики: Тезисы докладов международной научной конференции, Санкт-Петербург, 02–04 марта 2020 года. – Санкт-Петербург: Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 2020. – С. 234-237. – EDN VSFQJI.;
10. Гаккель Я.Я., Говоруха Л.С., Белов М.И. // Советская Арктика: Моря и острова Северного Ледовитого океана // Москва. 1970. 526 с.;

11. Гудкович З.М., Карклин В.П., Фролов И.Е. Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова Евразийских арктических морей и их возможные причины // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 5–14;
12. Гудкович З.М., Карклин В.П., Миронов Е.У., Иванов В.В., Лосев С.М. Дымент Л.Н., Смоляницкий В.М., Фролов С.В., Юлин А.В., Усольцева Е.А. Развитие ледовых и метеорологических условий в Арктике в период 2007–2013 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 90 – 102 ;
13. Гудкович З.М., Доронин Ю.П. Дрейф морских льдов. Спб.: Гидрометеиздат, 2001. 112 с.;
14. Гудкович З.М. Изменение сплоченности ледяного покрова под влиянием динамических процессов. – Л.: Гидрометеиздат, 1979, ч. 2, с. 73-80.;
15. Захаров В.Ф., Малинин В.Н. Морские льды и климат // Санкт-Петербург, Гидрометеиздат, 2000 г, С. 17-18.;
16. Иванов В.В., Алексеев В.В., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследования Земли из Космоса. 2013. №4. С. 50-65.;
17. Исаев А. А. Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Издательство МГУ. 1988, с. 25-28;
18. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. — 2012 — №2(6). — С. 66-79.;
19. Ковалевский Д.В., Алексеев Г.В., Бобылев Л.П., Данилов А.И. Последствия изменений климата для некоторых видов хозяйственной деятельности в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 4 (94).;
20. Лис Н.А., Чернявская Е.А., Миронов Е.У., Тимохов Л.А., Егорова Е.С. Информативность факторов, формирующих долгопериодные колебания ледовитости отдельных районов Баренцева моря // Российская Арктика. 2023. Т. 5. No 2. С. 17-32 <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-2-17-32>;
21. Макштас А.П. Тепловой баланс арктических льдов в зимний период // Л. Гидрометеиздат. 1984. 68 с.;
22. Миронов Е.У., Клячкин С.В., Смоляницкий В.М, Юлин А.В., Фролов С.В. Современное состояние и перспективы исследований ледяного покрова морей российской Арктики // Российская Арктика. 2020. №10. С. 13-29.;
23. Мохов И. И., Хон В. Ч., Рекнер Э. Изменения ледовитости Арктического бассейна в XXI веке по модельным расчетам: оценка перспектив Северного морского пути //

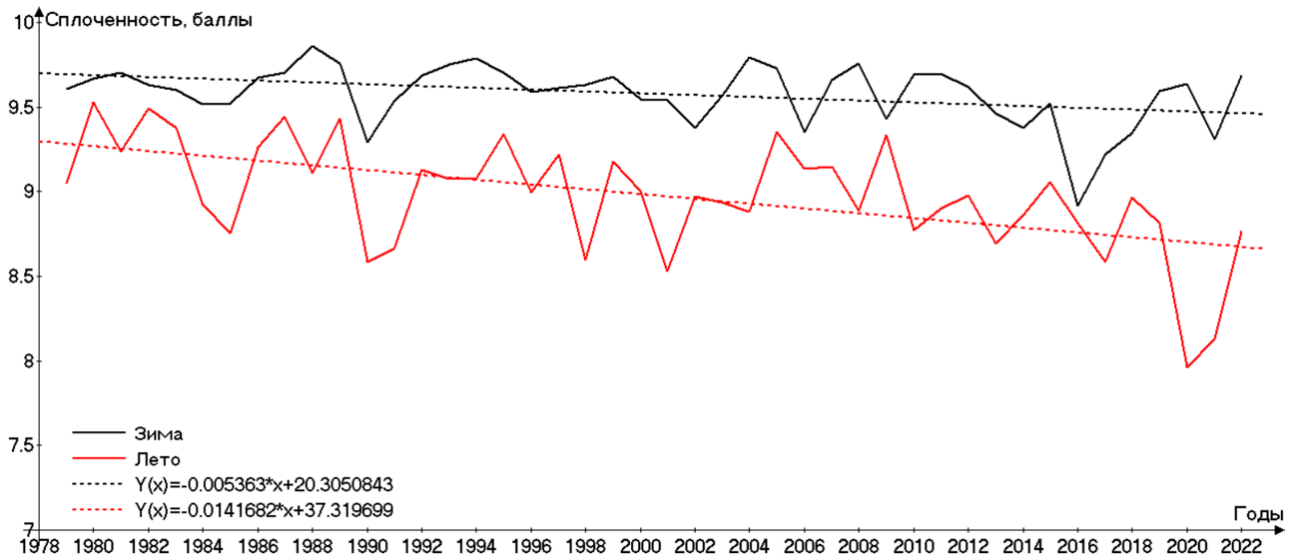
- Докл. АН. — 2007. — Т. 414. — С. 814—818.;
24. Попова В.Г., Иванов Б.В., Рубченя А.В., Изменчивость ледовитости северо-западной части Северного Ледовитого океана с 1979 по 2022 г.г. // Сборник материалов участников XIX Большого географического фестиваля : электронное издание, Санкт-Петербург, 07–09 апреля 2023 года / Санкт-Петербургский государственный университет, Институт Наук о Земле, Профсоюзная организация студентов и аспирантов СПбГУ. – Санкт-Петербург: Свое издательство, 2023. – С.232-235 – ISBN 978-5-4386-2282-6. – EDN FERIGZ.;
25. Попова В.Г., Иванов Б.В., Рубченя А.В., Изменение ледовитости в Северо-Западной части Северного Ледовитого океана за период 1979-2022 г.г. // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2023» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, Е.И. Зимакова. [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2023. ISBN 978-5-317-06952-0;
26. Попова В.Г., Иванов Б.В., Рубченя А.В., Изменчивость ледовитости северо-западной части Северного Ледовитого океана в 1979-2022 г.г., в сборнике Труды XII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2023)», Том III (IV), место издания ООО "ПолиПРЕСС" Тверь, том 4, тезисы, с. 290-293;
27. Попова В. Г., Иванов Б.В., Рубченя А.В., Показатели сплоченности морского льда в качестве индикатора изменения климата в северо-западной части Северного Ледовитого океана за период 1979-2022 Г.г // II Лавёровские чтения Арктика: актуальные проблемы и вызовы : Сборник научных материалов Всероссийской конференции с международным участием, Архангельск, 13–17 ноября 2023 года. – Архангельск: ООО "Типография № 2", 2023. – С. 92-94. – EDN JGBAEN.;
28. Попова В.Г., Рубченя А.В., Иванов Б.В. Некоторые особенности ледовых условий в северо-западной части Северного Ледовитого океана за период 1979-2022 гг. // Российская Арктика. 2024. Т. 6. № 1. С. 26-32. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-1-26-32>;
29. Репина И.А., Артамонов А.Ю., Варенцов М.И., Хавина Е.М. Взаимодействие атмосферы и океана в Северном Ледовитом океане по данным измерений в летне-осенний период / И.А. Репина, А.Ю. Артамонов, М.И. Варенцов, Е.М. Хавина // Российская Арктика. – 2019. – №7. - С. 49-61;
30. Черниговский Н.Т, Маршунова М.С. Климат Советской Арктики (Под ред. д-ра геогр. наук Берлянд Т.Г). ГУГМС при Совете Министров СССР. Ленинград. Гидрометеиздат. 1965. 199 с.;

31. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. – Климатические изменения ледовых условий в Арктических морях Евразийского шельфа / Проблемы Арктики и Антарктики. – 2007. - №75. – с.149-160
32. Юлин А.В., Вязигина Н.А, Егорова Е.С. Межгодовая и сезонная изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений // Российская Арктика. 2019. №7. С. 28-40.;
33. Мировой центр данных по морскому льду Арктического и антарктического научно-исследовательского института (МЦД МЛ ААНИИ) URL: <http://wdc.aari.ru/datasets/ssmi/> (дата обращения: 02.05.2024).;
34. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press. 2005. P. 1042.;
35. Comiso, J. C. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover. *Journal of Climate*, 2012. V. 25, P. 1176–1193.;
36. Eysteine Jansen, Jens Hesselbjerg Christensen, Trond Dokken, Kerim H. Nisancioglu, Bo M. Vinther, Emilie Capron, Chuncheng Guo, Mari F. Jensen, Peter L. Langen, Rasmus A. Pedersen, Shuting Yang, Mats Bentsen, Helle A. Kjær, Henrik Sadatzki, Evangeline Sessford and Martin Stendel, Past perspectives on the present era of abrupt Arctic climate change // July 2020, *Nature Climate Change* 10(8):1-8, DOI: [10.1038/s41558-020-0860-7](https://doi.org/10.1038/s41558-020-0860-7);
37. Hanssen-Bauer, I., E. J. Førland, H. Hisdal, S. Mayer, A. B. Sandø and A. Sorteberg. Climate in Svalbard 2100 - a knowledge base for climate adaptation. NCCS report. 2019. №1.;
38. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. (2023): ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: 10.24381/cds.f17050d7.;
39. Josefino C. Comiso, CHANGING CLIMATE IN POLAR REGIONS FROM MICROWAVE AND INFRARED DATA // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVIII-1/W2-2023 ISPRS Geospatial Week 2023, 2–7 September 2023, Cairo, Egypt
40. Polyakov, I. V., Walsh, J., & Kwok, R. Recent changes of arctic multiyear sea ice coverage and the likely causes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(2), 145–151.
41. Polyakov, I. V., Walsh, J., & Kwok, R. Recent changes of arctic multiyear sea ice coverage and the likely causes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(2), 145–151.

Значения ледовитости (а) и сплоченности (б) для зимнего и летнего периодов для района №27

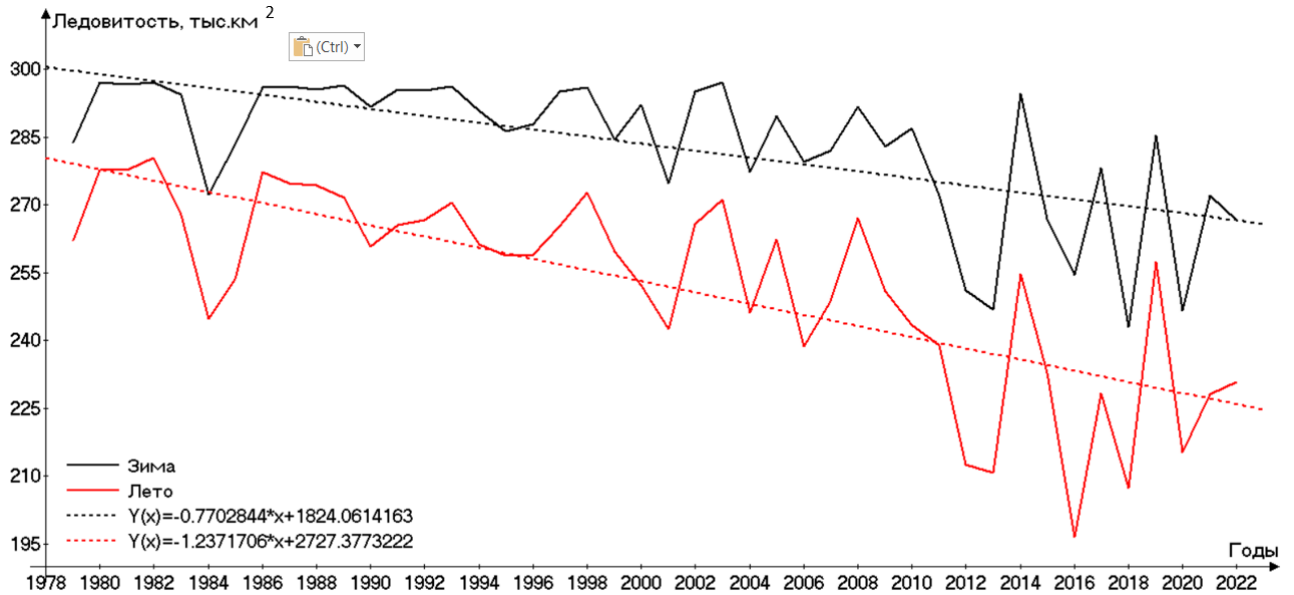


(а)

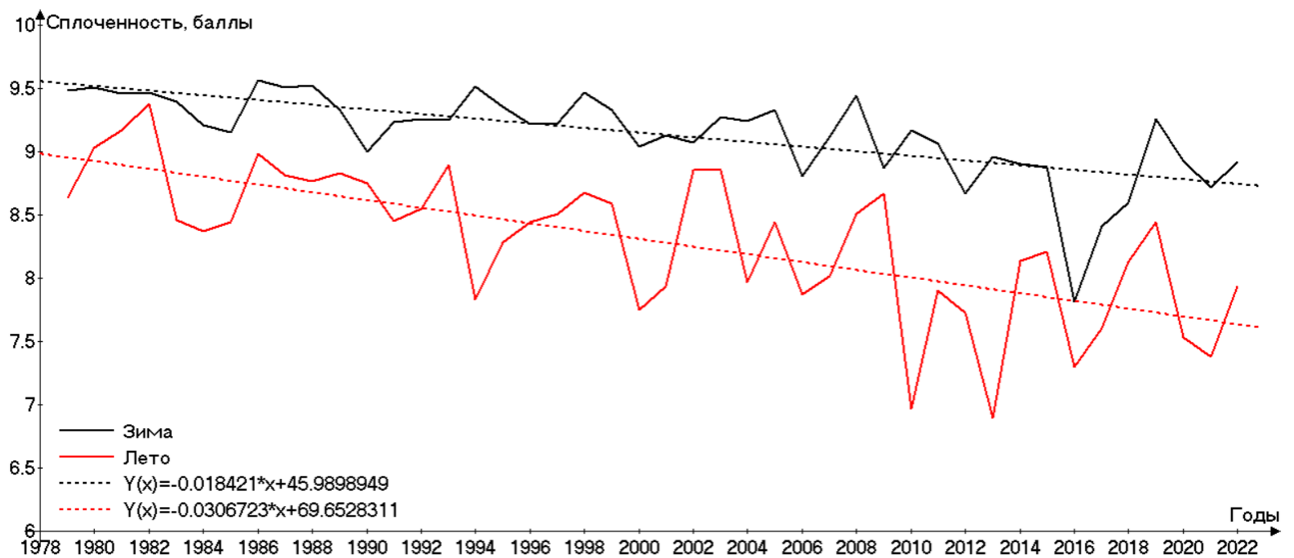


(б)

Значения ледовитости (а) и сплоченности (б) для зимнего и летнего периодов для района №34

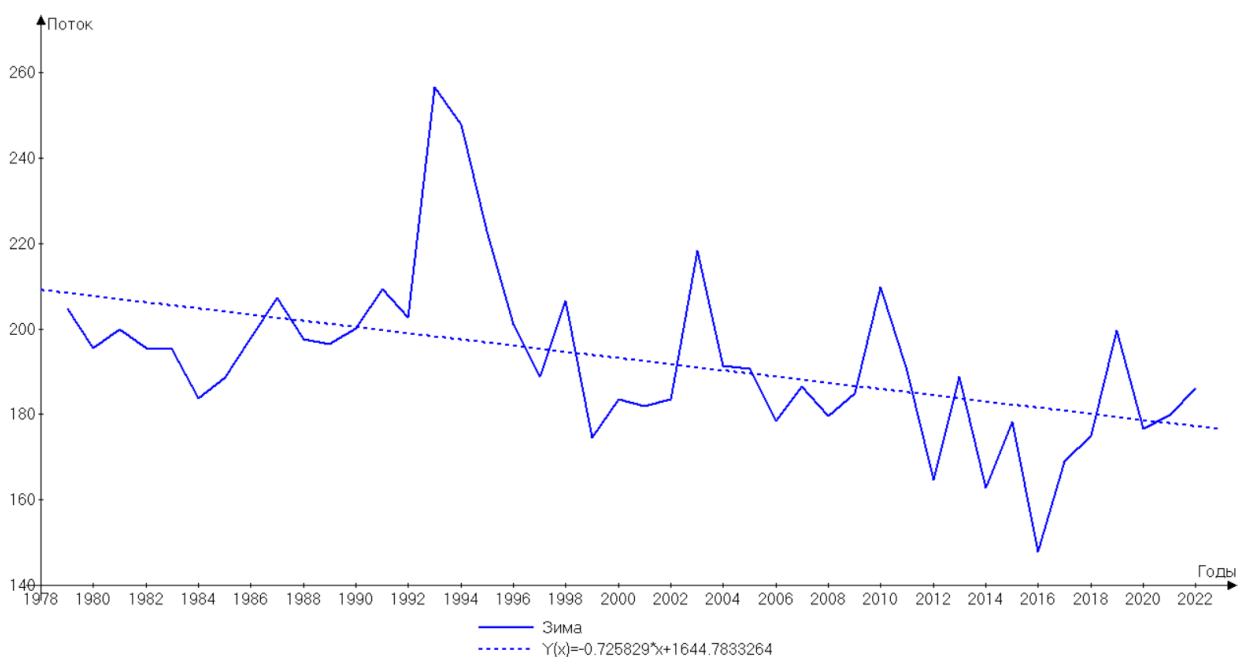


(а)

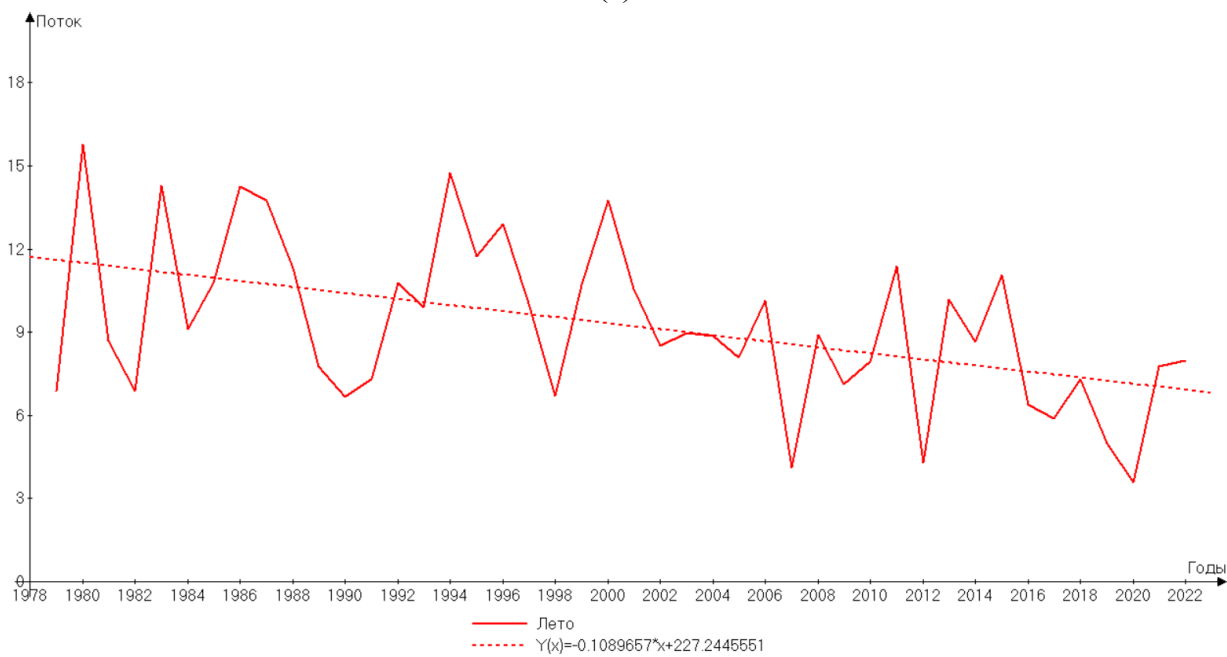


(б)

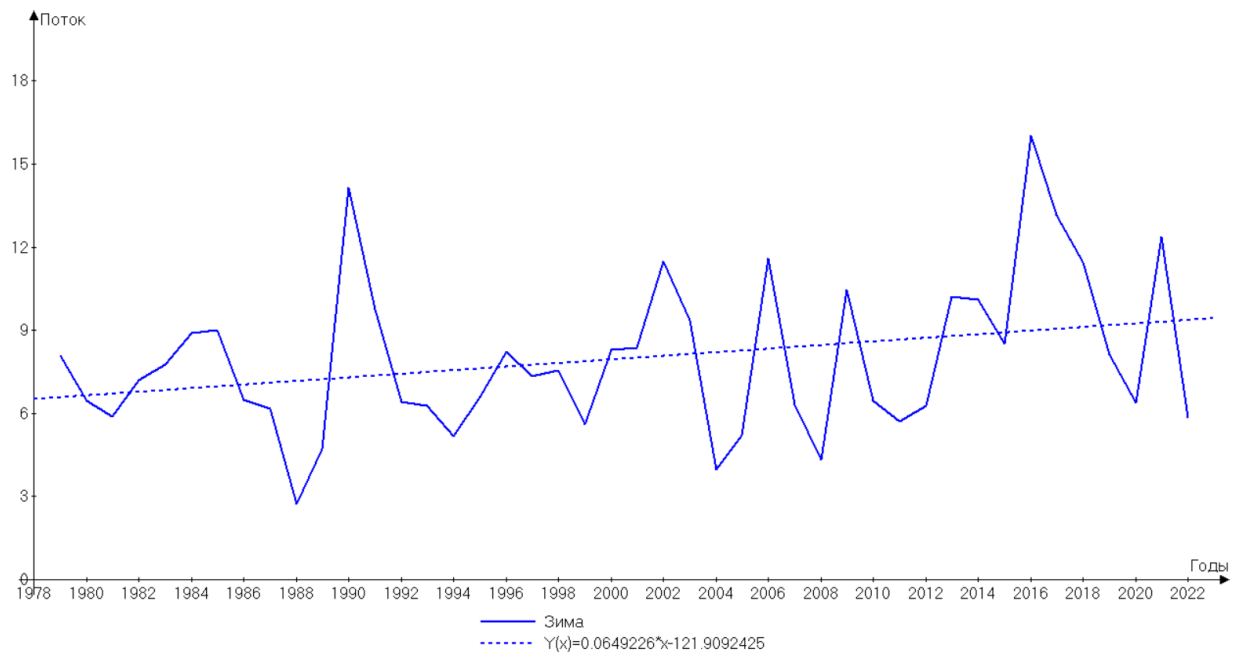
Турбулентный поток тепла для зимнего (а) и летнего (б) периодов времени для района №27, а также турбулентный поток тепла из океана в атмосферу в зимний период с учетом сплоченности льда



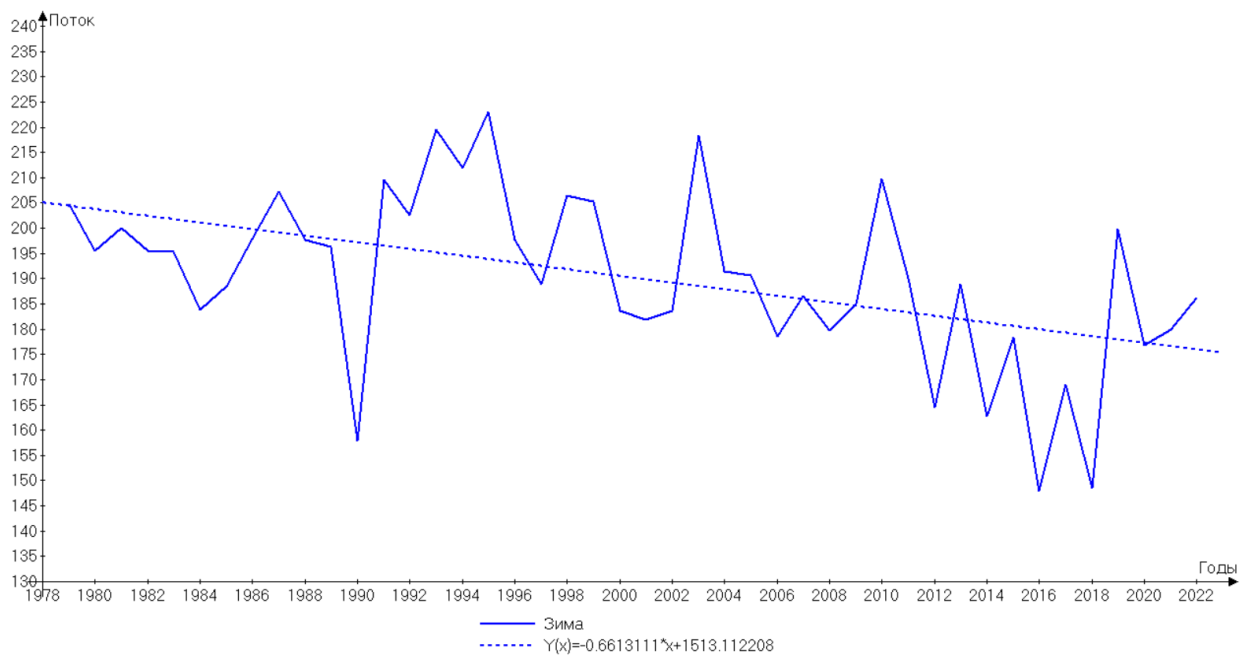
(а)



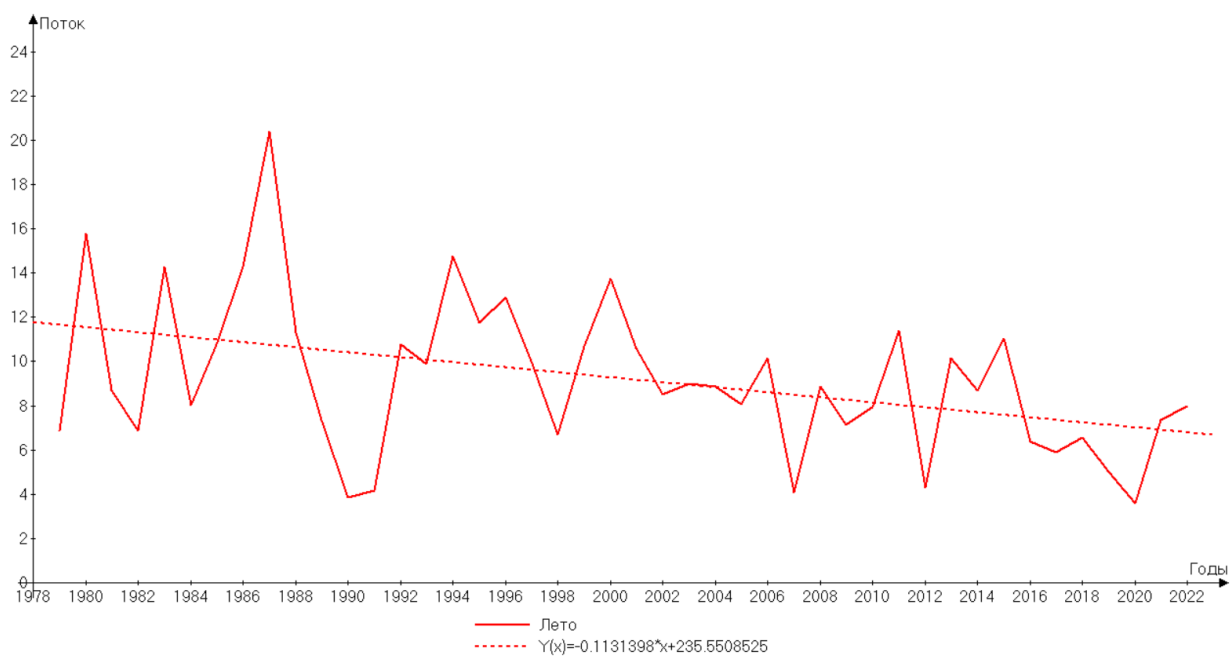
(б)



Турбулентный поток тепла для зимнего (а) и летнего (б) периодов времени для района №34, а также турбулентный поток тепла из океана в атмосферу в зимний период с учетом сплоченности льда



(а)



(б)

