

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Тисленко Даниил Игоревич

**Исследование изменений ледово-океанографического режима фьордов
острова Западный Шпицберген в условиях современных изменений
климата.**

Магистерская диссертация

«К ЗАЩИТЕ»

Научный руководитель:
к.г.н., доцент Б. В. Иванов
« __ » _____ 2016

Заведующий кафедрой:
к.г.н., доцент П. Н. Священников
« __ » _____ 2016

Санкт-Петербург
2016

Содержание

Список сокращений	3
Введение	4
Глава 1. Современные изменения климата в Арктике	7
Глава 2. Физико-географическое описание района	19
Глава 3. Используемые данные и методы обработки	24
3.1. Используемые данные	24
3.2. Методы обработки	27
Глава 4. Анализ временной изменчивости приземной температуры воздуха, температуры трансформированных атлантических вод и ледовых условий в районе архипелага Шпицберген	29
4.1 Приземная температура воздуха	29
4.2 Ледовые условия	36
4.3 Температура трансформированных атлантических вод	45
Глава 5. Сравнительный анализ временной изменчивости параметров океана, атмосферы и морского льда. Взаимосвязи в климатической системе архипелага Шпицберген	50
Глава 6. Анализ континентальности и аномальности климата в районе острова Западный Шпицберген по данным наблюдений за приземной температурой воздуха во второй половине XX века	55
Заключение	60
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	62

Список сокращений

ААНИИ – Научно-исследовательский Институт Арктики и Антарктики

АБ – Арктический бассейн

АВ – Атлантические воды

ВГТ – Восточно-Гренландское течение

ВШТ – Восточно-Шпицбергенское течение

ВНИИГМИ-МЦД - Всероссийский научно-исследовательский гидрометеорологический институт

ГНЦ – Государственный научный центр

ГБЦДМЛ – Глобальный банк цифровых данных по морскому льду

ЗФИ – Земля Франца-Иосифа

ЗШТ – Западно-Шпицбергенское течение

ПАВМ – Промежуточная Атлантическая Водная Масса

ПТ – Прибрежное течение

ПТВ – Приземная температура воздуха

СГТ – Северо-Гренландское течение

СКО – среднее квадратическое отклонение

СЛО – Северный Ледовитый океан

ТАВ – Трансформированная атлантическая водная масса

ТЮМ – Течение южного мыса

ЮШТ – Южно-Шпицбергенское течение

ЦАБ – Центральный Арктический бассейн

Введение

В последние десятилетия климат нашей планеты претерпевает серьёзные изменения. Наиболее заметные климатические изменения наблюдаются в Арктическом регионе. Например, рекордное уменьшение площади ледяного покрова, повышение температуры промежуточных атлантических вод (АВ), повышение приземной температуры воздуха (ПТВ). Все это указывают на существенное потепление, наблюдаемое в Арктике в последние два десятилетия XX и первую декаду XXI веков. Подобные процессы уже были зафиксированы исследователями в 1920 – 1940 гг. и вызвали большой научный интерес, который выразился в формировании гипотез о причинах наблюдаемого явления. В связи с этим встает вопрос об изучении приатлантического сектора Арктики, а именно акватории пролива Фрама, района со сложным взаимодействием теплых атлантических и холодных арктических водных и воздушных масс.

В районе архипелага Шпицберген (через пролив Фрама) происходит поступление атлантических вод в Арктический бассейн Северного Ледовитого океана, а также интенсивное взаимодействие теплых атлантических вод и холодных поверхностных арктических вод. Одной из ярких особенностей Шпицбергена, по сравнению с другими арктическими архипелагами, является наличие фьордов, в которых наблюдается сложное взаимодействие элементов атмосферы, гидросферы и криосферы.

Актуальность данной работы заключается в том, что изучение и мониторинг ледово-океанографического режима, являющегося значимым индикатором климатических изменений, позволяет наиболее объективно оценить изменения, наблюдаемые в климатической системе архипелага Шпицберген.

Цель работы – изучение ледово-океанографического режима фьордов архипелага Шпицберген и сравнение двух периодов потепления на примере данного района. Для реализации указанной цели был сформулирован ряд задач:

- 1) Обзор отечественной и зарубежной научной литературы, посвященной описанию первого и второго потепления Арктики (причины возникновения, сходство и различие обоих процессов, характерные особенности каждого из потеплений) и многолетней изменчивости атлантических вод в указанные периоды потеплений;
- 2) Изучение структуры и вычислительных возможностей БД «Северных морей», созданной в отделе взаимодействия океана и атмосферы ААНИИ;
- 3) Подбор дополнительных данных о температуре атлантических вод, отражающих долгопериодную изменчивость океанологических характеристик в XX и начале XXI веков;

- 4) Формирование специализированного электронного архива данных по температуре атлантических вод (средние оценки для июля-сентября) в фьордах острова Западный Шпицбергена (Конгс-фьорд, Ис-фьорд, Бельсунн, Хорнсунн);
- 5) Проведение анализа многолетней изменчивости ледовых, атмосферных и океанографических условий в районе архипелага Шпицберген за весь доступный период инструментальных и дистанционных наблюдений;
- 6) Сравнительный анализ долгопериодной изменчивости нормированных аномалий температуры воды в слое ТАВ, ПТВ, ледовитости в районе архипелага Шпицберген;
- 7) Предварительный анализ аномальности климата в районе архипелага Шпицберген по данным ПТВ за весь доступный период инструментальных наблюдений.

В ходе выполнения работы были использованы данные из следующих источников: архив Всероссийского научно-исследовательского гидрометеорологического института (ВНИИГМИ МЦД, г. Обнинск), архив данных Норвежского Полярного института, база данных «Северных морей», созданная в отделе взаимодействия океана и атмосферы ГНЦ ААНИИ и данные института Океанологии Польской Академии Наук. Для анализа временной изменчивости ПТВ были использованы данные Норвежского Метеорологического института. Для изучения ледовых условий в районе архипелага Шпицберген были использованы данные «Глобального банка цифровых данных по морскому льду» (ГБЦДМЛ), созданного в лаборатории режимных пособий ГНЦ ААНИИ.

Личный вклад автора заключается в следующем:

- 1) Сбор и критический анализ архивных океанографических данных для фьордов острова Западный Шпицберген;
- 2) Формирование специализированного электронного архива данных по температуре АВ (средние оценки для июля-сентября) для фьордов острова Западный Шпицбергена (Конгс-фьорд, Ис-фьорд, Бельсунн, Хорнсунн);
- 3) Получение количественных оценок проявлений первого и современного потеплений на примере характеристик АВ в заливах острова. Западный Шпицберген;
- 4) Получение количественных оценок скорости изменения ПТВ в терминах линейного тренда в период первого и современного потеплений в районе острова Западный Шпицберген;
- 5) Анализ временной изменчивости ледовых условий в районе архипелага Шпицберген за период с 1979 по 2015 гг.;

- 6) Получение среднегодовых и сезонных количественных оценок скорости изменения площади ледяного покрова в терминах линейного тренда для ряда районов вокруг архипелага Шпицберген;
- 7) Проведение первичного сравнительного анализа долгопериодной изменчивости температуры АВ в фьордах архипелага Шпицберген, ПТВ и ледовитости, омывающих архипелаг акваторий.
- 8) Формулирование предварительных выводов и заключений по теме работы.

Ряд результатов работы был апробирован и представлен на различных научных конференциях: «Большой географический фестиваль» в 2015, 2016 гг. (СПб, ИНЗ СПбГУ), «География: развитие науки и общества» в 2015, 2016 гг. (СПб, РГПУ им. Герцена), «Arctic student forum» в рамках международной конференции Arctic Frontiers – 2016 (Норвегия, г. Тромсе). Тезисы указанных докладов опубликованы. По теме выпускной квалификационной работы также опубликованы 2 статьи в научных журналах: «Проблемы Арктики и Антарктики» (РИНЦ), «Czech Polar Reports» (Scopus).

Выпускная квалификационная работа состоит из списка используемых сокращений, введения, 6 глав, заключения и списка использованной литературы.

Глава 1. Современные изменения климата в Арктике

Прежде чем перейти к литературному обзору предшествующих исследований, посвященных проблеме потеплений в Арктике, зафиксированных в первой половине XX века и в современный период, уточним такие понятия как: «климат», «климатическая переменная», «изменение климата», «современный климат» и «климатическая система».

Для более корректной формулировки указанных понятий нам кажется вполне уместным процитировать д.ф.-м.н, профессора РАН Г.В. Грузу («Изменение климата», №31, 2012, стр. 5-8). «...**Климат** в узком, но широко распространенном смысле, есть обобщение изменений погоды, и представляется набором условий погоды в заданной области пространства в заданный интервал времени. Для характеристики климата используется статистическое описание в терминах средних, экстремумов, показателей изменчивости соответствующих величин и повторяемостей явлений за выбранный период времени. Все эти дескриптивные статистики называются **климатическими переменными**...»

«...**Глобальная климатическая система** состоит из пяти основных компонентов: атмосферы, гидросферы, криосферы, поверхности континентов и биосферы, взаимодействие которых существенно влияет на колебания погоды за длительные промежутки времени... **Климатическая система** изменяется во времени под воздействием собственной внутренней динамики и в результате внешних воздействий, например, извержения вулканов, вариаций потока солнечной радиации и воздействий, обусловленных хозяйственной деятельностью человека, таких как изменение состава атмосферы и изменения в землепользовании...»

«...**Изменение климата** для заданной области или для Земного шара в целом характеризуется разностью между некоторыми климатическими переменными для двух заданных интервалов времени. Это изменение может считаться реальным, если оно превосходит вероятную ошибку вычисления соответствующих климатических переменных...»

«...В качестве стандартного периода для оценивания климатических переменных, характеризующих **текущий или современный климат**, по рекомендации Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) используется период в 30 лет. В настоящее время это 1961 – 1990 годы. Термин "норма" по умолчанию означает среднее значение переменной величины именно за указанный период, а отклонение этой величины от "нормы" называют "аномалией"...»

Арктика составляет важную часть планетарной климатической системы, связанную с другими частями посредством переноса тепла и влаги в атмосфере и океане.

Формирование и вынос распресненных поверхностных вод из центральной части Арктического бассейна в значительной степени влияет на распространение морских льдов, термохалинную циркуляцию в примыкающих районах Северной Атлантики, а также на региональный и глобальный климат. (Алексеев, 2003; Никифоров, Шпайхер, 1980).

Наблюдаемые изменения климата Арктики, происходящие в последние десятилетия на фоне глобального потепления, вызывают большой интерес у современных исследователей. Мы постарались обобщить взгляды ряда современных российских и зарубежных ученых об основных изменениях климата (климатических тенденциях), наблюдаемых в арктическом регионе за период XX и первого десятилетия XXI веков.

Для оценки изменения климата в региональном и глобальном масштабах, наиболее часто специалистами используется информация о ПТВ (Алексеев, 2003; Груза, Ранькова, 2012). Колебания температуры воздуха в разных широтных зонах Северного полушария за вековой период измерений указывают на два периода потепления в 1920 - 1940-е и в 1980 – 2010-е гг. Первое потепление было наиболее заметно в Северной полярной области, а второе выражено во всех широтных зонах (Alekseev et al., 2001).

Среднегодовая температура воздуха в Арктике значительно изменялась в течение всего XX века и достигла максимальных значений в 1920 – 1940-е и в 1980 – 2010 гг. При этом, первый период был теплее с августа по январь, а второй - с февраля по июль. Различия наблюдаются также и в регионах максимального проявления потеплений. Так приатлантическая часть Арктики, в среднем за год, была теплее в первый период, а тихоокеанская – во второй (Алексеев, 2003; Ионов, 2006).

Следует отметить, что первое потепление Арктики (1920 – 1940 гг.) привлекло внимание исследователей еще в первой половине прошлого века. В.Ю. Визе (основатель современной кафедры океанологии в СПбГУ) в своей статье «Причины потепления Арктики» (1937 г.) охарактеризовал потепление Арктики в 1920 – 1930 гг. как наиболее сильное по своим размерам климатическое колебание, зарегистрированное на тот момент с помощью регулярных метеорологических наблюдений. Им было отмечено, что повышение температуры воздуха обнаруживаются в Арктике не только в холодное время года, но и в среднем за год. В качестве примера, в вышеуказанной статье «Причины потепления Арктики» на стр. 1, В.Ю. Визе приводит следующие данные: «... за последний период в 10 – 15 лет средняя годовая температура воздуха оказалась выше средней многолетней величины на Шпицбергене на 1.7 °С...».

В.Ю. Визе пришел к выводу, что потепление Арктики стало следствием усиления общей циркуляции атмосферы на Земном шаре, с которым связана интенсификация всех центров действия атмосферы. Включая выраженность Исландского минимума и

Сибирского максимума, при которой усиливался поток вод и льдов из Арктического бассейна в Гренландское море. В поисках причины той сильной аномалии, которая имела следствием столь исключительное потепление Арктики и уменьшение ледовитости арктических морей, В.Ю. Визе предположил, что, так как аномалия охватила весь Земной шар, искать причину следует вне Земли, вероятнее всего в изменениях солнечной активности (Визе, 1937).

В работах (Alekseev et al., 2009; Алексеев и др., 2015) рассматриваются климатические изменения в Арктике, происходящие в период современного потепления (конец 1980-х – н/в). Авторами отмечается, что на этот период приходится резкое сокращение площади, занимаемой морскими льдами в конце летнего периода, а также распространение положительных аномалий температуры воды в промежуточном слое атлантических вод в Арктическом бассейне. Показано, что для данного региона наблюдается резкое увеличение средних значений температуры воздуха для зимних (после 1998 г.) и летних (после 1996 г.) месяцев, которое достигло максимальных значений в 2012 г. Сравнение периодов потепления 1920 – 1940-х и 1990 – 2000-х гг. в работе (Алексеев и др., 2010а) было проведено для 30 метеорологических станций, расположенных севернее 60° с. ш. Анализ был выполнен как для отдельных сезонов года: зима (средняя ПТВ за ноябрь – март) и лето (средняя ПТВ за июнь – август), так и для средних за год значений. Скорость развития потепления оценивалась линейными трендами за указанные периоды. Авторами получены следующие результаты: за первый период потепления коэффициенты сезонных трендов изменяются от 0,49 до 0,60 град/год, во второй период потепления коэффициенты наклона сезонных трендов изменяются от 0,34 до 0,81 град/год, а для средних за год трендов, соответственно, 0,054 и 0,069 град/год. На основе проделанного анализа исследователями сделан вывод о более быстром развитии потепления в современный период, за исключением весны. Также указывается (Алексеев, 2014; Alekseev et al., 2009), что уменьшение летней площади морских льдов за 1997 – 2007 гг. во всей Арктике составило 26%, а минимума сокращения площади морских льдов в Арктике достигло в сентябре 2012 г. На основании оценок, сделанных с помощью линейной и квадратичной модели (Алексеев и др., 2015), выдвигается следующая гипотеза. При сохранении текущих темпов потепления в Арктике к периоду 2030 – 2040 гг. может произойти полное исчезновение ледяного покрова в конце летнего сезона.

Одновременно с этим отмечается (Алексеев и др., 2015; Алексеев и др., 2010б), что временная изменчивость максимальной площади морского льда в Арктике связана не только с короткопериодными колебаниями, определяемыми воздействием атмосферной циркуляции, но также и с колебаниями поступления теплых и соленых АВ и смещениями

границы их распространения в приатлантической части Арктики. Так поступающие в южную часть Баренцева моря теплые АВ воды зимой препятствуют распространению льда на юг.

В 1990-е годы наблюдалось значительное повышение температуры в слое АВ на всей акватории Арктического бассейна. Этот период выделяется абсолютным преобладанием положительных аномалий температуры АВ (Alekseev et al., 2003). Предшествующий период положительных аномалий температуры АВ продолжался с середины 1920-х по конец 1940-х гг. (Алексеев, 2003). Наиболее значительные отрицательные аномалии отмечены в конце XIX - начале XX столетий. Второй период пониженного теплового состояния слоя АВ в Арктическом бассейне приходится на 1950 – 1980-е годы. В эти годы отмечались, как отрицательные, так и положительные аномалии температуры, но в основном преобладали отрицательные аномалии (Алексеев, 2003; Ионов, 2006).

В статье (Polyakov et al., 2004) рассмотрена многолетняя изменчивость температуры АВ для акватории Северного Ледовитого океана в целом, начиная с конца девятнадцатого века и заканчивая началом 2000-х годов. Несмотря на значительные пропуски во временных рядах в работе (Polyakov et al., 2004), было показано, что температура АВ во многом зависит от фазы низкочастотного колебания с периодом 50 – 80 лет (рис. 1). Для положительной фазы низкочастотного колебания характерны следующие особенности – это увеличение притока в Арктику теплых АВ и теплого воздуха из Северной Атлантики, поднятие к поверхности промежуточных АВ и интенсивный вынос избытка льда и пресной воды через пролив Фрама за счет усиления циклонической деятельности. Для отрицательной фазы низкочастотного колебания характерны следующие особенности: усиление антициклонического дрейфа льда и антициклонической поверхностной циркуляции, конвергенция поверхностных течений, а также заглублиение слоя АВ. Значительное сходство между изменчивостью температуры АВ и изменчивостью ключевых атмосферных параметров, предполагает тесную взаимосвязь между крупномасштабной атмосферной циркуляцией с одной стороны и ледово-океаническими условиями в Арктике с другой (Polyakov et al., 2004).

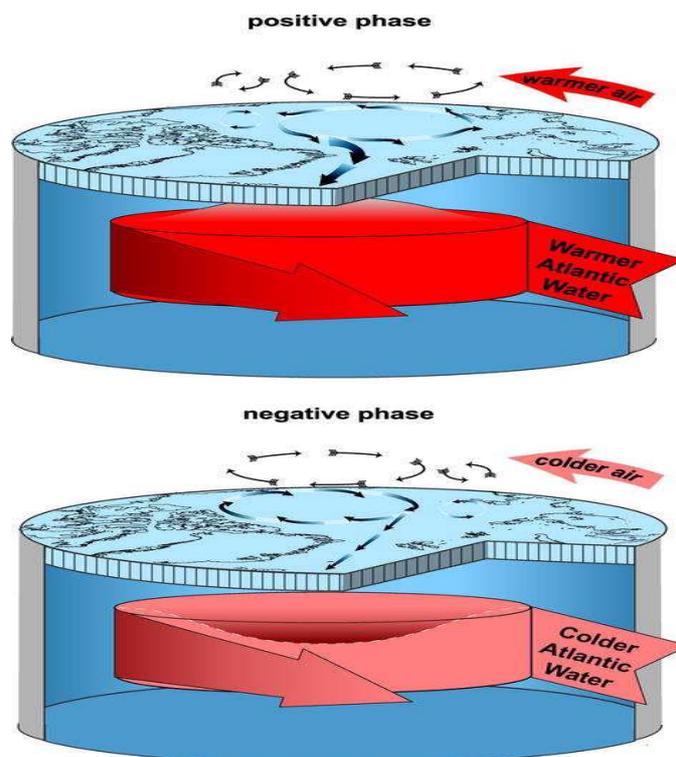


Рисунок 1 - Схема атмосферной и океанической циркуляции в период двух фаз низкочастотного колебания в Арктике. Адаптировано из (Polyakov et al., 2004)

Отдельно исследователями оценивается роль меридионального переноса в атмосфере в усилении потепления в Арктике. В работе (Алексеев, 2015) показано, что интенсификация меридионального переноса в атмосфере вносит существенный вклад в тренд средней ПТВ в Арктике за период 1969 – 2008 гг. Отмеченный тренд описывает около 80% изменчивости во все сезоны, кроме лета (55%), и почти 90% в среднем за год. Вклад меридионального переноса по оценкам авторов определяет и значительную часть наблюдаемого тренда (73%) средней за сезоны ПТВ Северного полушария (за исключением лета) и более половины тренда глобальной температуры на Земле (год 68%, зима 57%, осень 63%).

Гипотезу В.Ю. Визе, которая рассматривает интенсификацию атмосферной циркуляции и солнечную активность как главные причины первого потепления в Арктике, в качестве основной используют в своих работах, и специалисты ГНЦ ААНИИ (Гудкович и др., 2012). Исследователи отмечают, что характерной чертой изменений климата в нашу эпоху является цикличность, а наиболее значимыми являются циклы с периодичностью в 60 и 200 лет (Rasporov et al., 2004; Башкирцев, Машнич, 2004). С первым циклом соотносится смена теплых и холодных интервалов времени, в основном, в полярных и умеренных широтах. А со вторым – вековая тенденция, которая особенно проявляется в умеренных и низких широтах (Фролов и др., 2010а). По мнению авторов (Гудкович и др.,

2012) в конце XX – начале XXI века совпали положительные максимумы обоих циклов, что в итоге и привело к значительному увеличению температуры воздуха в нижних слоях атмосферы, но потепление не было глобальным.

В соответствии с данной точкой зрения ряд отечественных специалистов (Frolov et al., 2009; Гудкович, Ковалев, 2002; Lyubushin, Klyashtorin, 2012), рассматривая современные изменения в климате Земли, высказывает мнение о скорой смене тенденции в развитии ледовых процессов и потепления в Арктике в целом. Авторы работы (Фролов и др., 2010б) отмечают, что значительное влияние на изменение климата Земли оказывает состояние циркумполярных вихрей, которое, в свою очередь, существенно зависит от солнечной активности. Увеличение солнечной активности, по мнению авторов, приводит к углублению циркумполярных вихрей и усилению западно-восточного переноса в атмосфере, а уменьшение – наоборот, к ослаблению. При этом ослабление циркумполярных вихрей сопровождается увеличением повторяемости полярных антициклонов и смещением их на запад.

В работе (Гудкович и др., 2013) представлен анализ развития ледовых и метеорологических условий в Арктике за период 2007 – 2013 гг. По данным авторов за период 2007 – 2013 гг. наблюдается усиление Арктического антициклона в зимнее полугодие и смещение его в западном направлении на величину порядка 1500 км. Интенсификация Арктического антициклона и смещение его на запад, по мнению авторов, приводит к блокированию атлантических циклонов, вследствие чего наблюдается интенсивный вынос тепла в зону арктических морей (Баренцева, Карского) и прилегающих районов в центральной части Арктического бассейна (ЦАБ). Этими же авторами были рассмотрены изменения в режимных характеристиках ледяного покрова арктических морей сибирского шельфа за период 2007 – 2013 гг. В связи с указанной выше постепенной сменой циркуляции с циклонической на антициклоническую в холодное время года (октябрь – май) наблюдались существенные различия в образовании ледяного покрова в западных (Баренцево, Карское, Лаптевых) и восточных (Восточно-Сибирское, Чукотское) арктических морях. При этом анализ метеорологических и ледовых условий проводился для двух периодов времени: 2007 – 2009 и 2010 – 2012 гг. Авторы отмечают, что усиление Арктического циклона от 2007 к 2012 г. над территорией восточных морей привело к увеличению площади припая, средней площади остаточных льдов, а также к уменьшению повторяемости появления заприпайных полыней в данном районе. В тоже время в приатлантической части Арктики продолжался теплый период. Выдвигается предположение о наблюдающемся в восточном секторе Российской Арктики переходе от «теплого» климатического периода к «холодному».

Одним из наиболее важных выводов, сделанных в работе (Гудкович и др., 2012) является заключение о специфике термохалинной циркуляции вод в Арктике, полученное из сравнительного анализа периодов потепления и похолодания. Авторы работы (Гудкович и др., 2012; Polyakov et al., 2008) отмечают, что периодам потепления соответствует увеличение солености в поверхностном слое Арктического бассейна, а периодам похолодания – распреснение. В статьях (Гудкович и др., 2012; Polyakov et al., 2004) указывается, что осолонению вод, также способствует интенсификация поступления АВ в теплые периоды, и ослабление притока АВ в периоды похолодания.

Данный факт обосновывается исследователями (Гудкович и др., 2012), как с помощью натурных данных, так и на основании теоретических рассуждений. Так как в высоких широтах плотность воды определяется в первую очередь ее соленостью (Зубов, 1945), то в Арктике антициклонической ситуации соответствует увеличение количества относительно легких (распреснённых) поверхностных вод, а депрессиям увеличение объемов более плотных (соленых) вод (Гудкович и др., 2012). Периоды потепления в Арктике сопровождаются установлением фона с пониженным давлением (усилением Исландского минимума) (Фролов и др., 2007; Walsh et al., 1996), следовательно, данные интервалы времени характеризуются осолонением поверхностных вод. Как уже указывалось выше, авторы (Гудкович и др., 2012) обосновали данный факт, используя натурные данные о солености верхнего слоя из работы (Тимохов и др., 2011) для Евразийского суббассейна. В нашей работе, приводится рисунок 2 (адаптировано из (Гудкович и др., 2012)), на котором демонстрируется два характерных периода упомянутых выше. Первый период приходится на интервал времени 1960 – 1980 гг., с наблюдающимся распреснением вод. Второй период характеризуется интенсивным осолонением вод и приходится на интервал времени с 1980 по 1993 гг. Особенно отмечается совпадение первого периода с годами, когда наблюдалось понижение температуры воздуха и повышение ледовитости, и соответствие второго периода потеплению климата и уменьшению площади льдов. (З.М. Гудкович, В.П. Карклин, В.М. Смоляницкий, И.Е. Фролов, «ООС: изменение климата», «Что происходит с климатом Земли?», 2012, стр. 39)

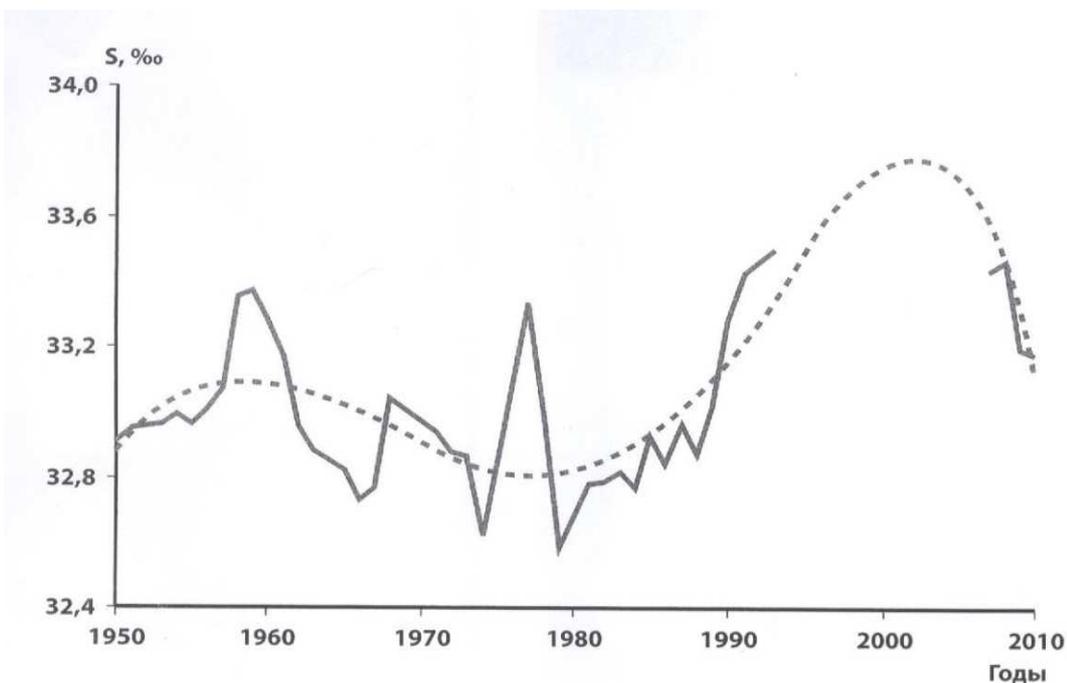


Рисунок 2 - Изменения солёности верхнего слоя вод в Евразийском суббассейне в 1950 – 2010 гг. по данным работы (Тимохов и др., 2011).

Адаптировано из (Гудкович и др., 2012)

В работе (Матишов и др., 2014) следующим образом изложен взгляд на современные климатические тенденции, наблюдаемые в Арктике. С начала XXI века в Западной Арктике сохраняется продолжительная теплая аномалия (Матишов и др., 2011; Serezze, Barry, 2011), которая сравнима по интенсивности с хорошо известным «первым» потеплением Арктики, наблюдавшимся в первой половине прошлого столетия. Отметим, что это утверждение согласуется с мнением специалистов ААНИИ (Гудкович и др., 2012) о существовании 60-летнего цикла колебаний ледовитости арктических морей, а также 200-летней цикличности, связанной с изменениями в поступлении солнечной радиации. По мнению авторов работы (Матишов и др., 2014), суперпозиция этих циклов дает основания полагать, что к 2030–2040 гг. более вероятно не усиление потепления, а понижение температуры и увеличение ледовитости.

Изучение климата и состояния морских экосистем Северной Атлантики и Арктики невозможно без учета внутривековой изменчивости. В связи с этим, специалисты, исследующие изменчивость климата, выделяют циклы меньшей продолжительности, включая 11-летний цикл (Монин, 1969), связанный с изменениями солнечной активности.

«Современное» потепление Арктики 1990-х–2000-х гг. происходит в условиях интенсивного западно-восточного переноса в средних широтах. По данным работы (Матишов и др., 2014), в последние годы увеличилась повторяемость и особенно

продолжительность ситуаций антициклонического блокирования над Евразией, способствующих усилению континентальности климата (рис. 3). При этом авторами (Матишов и др., 2014) отмечается, что траектории североатлантических циклонов смещаются в высокие широты, что способствует положительным аномалиям температуры воды и уменьшению ледовитости арктических морей как в теплый, так и в холодный периоды года.

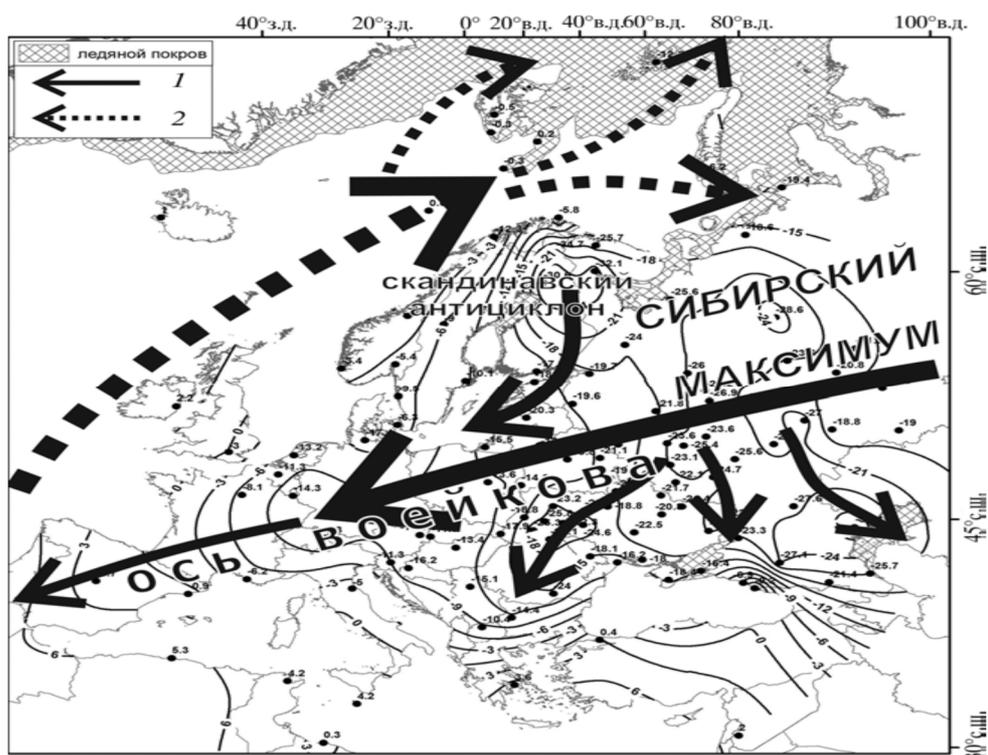


Рисунок 3 - Аномальное распространение отрога сибирского антициклона: 1 – затоки холода в атмосфере; 2 – затоки тепла в атмосфере и гидросфере.

Адаптировано из (Матишов и др., 2014).

Описывая изменения в климате Арктики за XX и начало XXI вв. необходимо рассмотреть изменение ледовых условий. В работе (Жичкин, 2015) были рассмотрены межгодовые и сезонные колебания аномалий ледовитости Баренцева моря за период с 1899 по 2013 гг., в том числе выделены однородные периоды с преобладающим знаком аномалий и проведен анализ временного распределения крупных и очень крупных аномалий ледовитости Баренцева моря за указанный временной интервал. На основе выполненного анализа автором делается вывод о выделении ряда периодов похолоданий и потеплений в данном районе Арктики. Указывается на наличие квазитридцатилетних циклов холодных и теплых фаз, которые входят в состав 50 – 60-летних низкочастотных колебаний в Арктическом бассейне. За рассматриваемый период времени к фазе похолодания отнесены

1899 – 1929 гг., 1962 – 1982 гг., а к фазе потепления 1930 – 1961 гг., 1983 – 2013 гг. Отдельно отмечается, что наиболее крупные положительные аномалии ледовых условий приходятся на первое тридцатилетие XX века (1899 – 1929 гг.), а наиболее крупным отрицательным аномалиям соответствуют первые 13 лет XXI века с максимальными значениями отрицательных аномалий ледовитости в 2006 и 2012 гг.

Временная изменчивость площади ледяного покрова в Российской Арктике за период с 1933 по 2006 гг. рассматривается также в работе (Mahoney et al., 2008). Основываясь на данных ААНИИ за указанный период авторы делают вывод о двух периодах уменьшения площади ледяного покрова (1930 – 1950 гг., середина 1980-х гг. – настоящее время) и одном периоде увеличения площади, занимаемой льдами (середина 1950-х – середина 1980-х гг.) в Российской части Арктики в XX столетии. При этом авторы статьи обращают внимание на тот факт, что периоды потепления отличаются друг от друга как по пространственным, так и по сезонным особенностям. Первое потепление в целом наблюдалось для всей Российской части Арктики, но не для каждого моря в отдельности, в случае второго потепления характерно сокращение площади ледяного покрова для всех морей Российской Арктики. К сезонным особенностям авторы относят уменьшение площади ледяного покрова в Баренцевом и Карском морях в зимние месяцы, которое наблюдается только в период современного потепления.

Ряд работ (Haas et al., 2008; Renner et al., 2014) посвящен проблеме изменения толщины ледяного покрова в Арктике в первое десятилетие XXI века. Авторы рассматривали изменчивость толщины ледяного покрова в районе Северного полюса (Haas et al., 2008) и в проливе Фрама (Renner et al., 2014). Представленные в работах результаты исследований указывают на уменьшение толщины льда в Арктике на протяжении 2000 – 2012 гг. Для района Северного полюса за период с 2001 по 2007 год наблюдалось уменьшение средней толщины ледяного покрова в августе-сентябре на 44%. В качестве важнейшего фактора предполагается повышение значений ПТВ (Haas et al., 2008). Для района пролива Фрама уменьшение толщины льда за период 2003 – 2012 гг. составило более 50%, а наиболее сильное уменьшение наблюдалось с 2003 по 2008 год. Рассчитанный для периода 2003 – 2008 гг. тренд составляет – 0,3 м/год. После 2008 года значимых трендов в изменении толщины льда не наблюдалось.

Изучению климата в районе арх. Шпицберген посвящено большое количество отечественных и зарубежных научных публикаций. В работах (Nordli et al., 2014a; Nordli, Isaksen, 2010; Иванов и др., 2012; Тисленко, Иванов, 2015) рассмотрены изменения в климатической системе архипелага Шпицберген на протяжении XX и первого десятилетия XXI веков. В работе (Nordli et al., 2014) был представлен анализ временной изменчивости

ПТВ за период 1898 – 2012 гг. Исходя из полученных в данной статье результатов, можно заключить, что для района архипелага Шпицберген за прошедшие 100 лет в терминах линейного тренда наблюдается повышение ПТВ на 2,6 градуса. Долгопериодная изменчивость ПТВ на протяжении данного периода характеризуется наличием двух фаз потепления (1931 – 1960, 1990 – 2010 гг.) и двух фаз похолодания (1901 – 1930, 1961 – 1990 гг.). К наиболее холодным авторы относят 1901 – 1930 гг., а период последних 40 – 50 лет охарактеризован как период интенсивного роста ПТВ. При этом период 2005 – 2012 гг. оценен авторами как наиболее теплый за все время инструментальных наблюдений на архипелаге Шпицберген. Локальные минимумы соответствуют 1910-м, 1960-м годам, максимумы приходятся на 1930-е и 2000-е года. В работе (Иванов, Журавский, 2010) показано, что в заливе Грен-фьорд, где расположен российский шахтерский поселок Баренцбург, для периода 1973 – 2008 гг. по ряду основополагающих ледовых характеристик наблюдается смягчение ледовой обстановки. При этом авторы отмечают, что в заливе Грен-фьорд после зимних сезонов 2005 – 2006 и 2006-2007 гг., когда устойчивый ледяной покров (припай) не образовался, наблюдалось увеличение средней и максимальной толщины припая вплоть до 2011 г. Интересно отметить, что с осени 2011 по осень 2014 гг. в заливе Грен-фьорд снова наблюдался безледный режим.

Исследования, выполненные в работах (Тисленко, Иванов, 2015; Павлов и др., 2010; Павлов, 2011) посвящены анализу долгопериодной изменчивости температуры промежуточных АВ, проникающих в фьорды острова Западный Шпицберген. Авторами (Tislenko, Ivanov, 2015; Павлов и др., 2010) были рассчитаны средние и максимальные за период «арктического лета» температуры в слое ТАВ. Рассчитанные отклонения (аномалии) температуры воды от средней многолетней указывают на существование двух периода с положительными значениями аномалий температуры в слое ТАВ. Это хорошо известное первое «потепление» в Арктике 1920-1940 гг. и современное потепление, которое наблюдается для периода 1983–2010 гг. Более подробно полученные результаты анализа временной изменчивости температуры воды в слое ТАВ представлены и рассмотрены в главе 4 данной работы. Авторами работ (Павлов, 2011; Павлов и др., 2010) также отмечается и тот факт, что выявленные признаки долгопериодной изменчивости ТАВ в фьордах Шпицбергена, в общем, совпадают с особенностями многолетней изменчивости промежуточной Атлантической водной массы (ПАВМ) в СЛО, полученными в работе (Polyakov et al., 2004). При этом разница фаз (наступление максимума потепления), очевидно, связана с запаздыванием климатического (атлантического) сигнала при перемещении АВ из района пролива Фрама в ЦАБ.

Из представленного обзора, посвященного изменению климата в районе архипелага Шпицберген и прилегающих районах Арктики, можно сделать вывод, что долгопериодные изменения основных характеристик атмосферы и океана в последние десятилетия имели устойчивую тенденцию к потеплению. Этим можно объяснить и смягчение ледовой обстановки в заливе Грен-фьорд в течение последних 30 лет. Устойчивая тенденция к смягчению климата в районе архипелага Шпицберген в целом соответствует хорошо известной концепции «быстрого потепления» Арктики за период 1980-х – 2015 гг. (Алексеев и др., 2015; Жичкин, 2015; Polyakov et al., 2002; Bekryaev et al., 2010).

Глава 2. Физико-географическое описание района

Архипелаг Шпицберген – один из обширных полярных архипелагов, расположенный в Северном - Ледовитом океане, между 74° и 81° северной широты, 10° и 35° восточной долготы (рис.4). Общая площадь архипелага 64 тыс. км². Крупнейшими островами являются о. Западный Шпицберген и о. Северо-Восточная Земля. Омывается Гренландским, Баренцевым и Норвежским морями.

Рельеф Шпицбергена – гористый. Покрытые снегами вершины, нередко чередуются здесь с обширными горными плато и протянувшимися на десятки километров прибрежными равнинами.

Ледники – неотъемлемая и наиболее характерная черта рельефа Шпицбергена. Они занимают свыше 35 тыс. км², или чуть более 50 % общей площади Шпицбергена. Основная масса ледников приурочена к периферийным районам архипелага при относительно слабом развитии оледенения в его центральной части (это наиболее характерно для о-ва. Западный Шпицберген).

Реки на Шпицбергене ледникового и снегового питания, большинство из них берет свое начало у края ледников. Для шпицбергенских рек характерны сезонные и суточные колебания уровня. В конце весны и начале лета, когда происходит активное таяние снежного покрова, реки многоводны и выносят в заливы большое количество взвешенного вещества.

В середине лета и осенью реки сильно мелеют, а иногда превращаются в небольшие ручьи или совсем пересыхают. Зимой реки и ручьи, как правило, промерзают до дна. Речная сеть наиболее развита на о. Западный Шпицберген, где находятся наиболее крупные реки архипелага: Рейндален, Сассендален и Адвентдален.

Таким образом, тающие весной ледники не только сами по себе являются значительными источниками поступления во фьорды вод с большим количеством взвешенных частиц, но также дают начало многочисленным рекам и ручейкам, выносящим взвешенные седименты в прибрежные воды.

Характерной особенностью архипелага является наличие фьордов. К фьордам относят узкие, извилистые и глубоко врезавшиеся в сушу морские заливы, и проливы со скалистыми берегами, свойственные горным странам в высоких широтах. Длина фьордов, как правило, в несколько раз превосходит их ширину. Наиболее крупными фьордами архипелага являются Ис-фьорд, Стур-фьорд, Белльсунд, Конгс-фьорд, Ван-Майен.

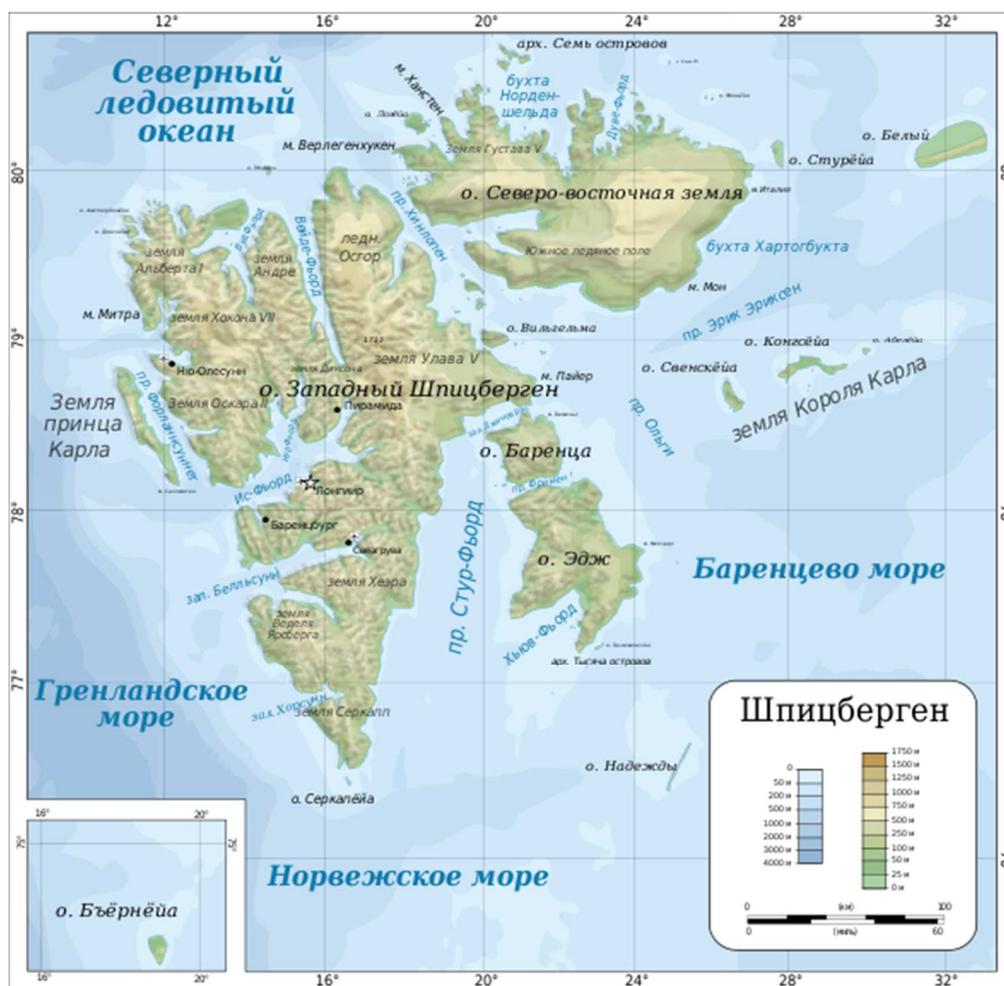


Рисунок 4 - Физико-географическая карта архипелага Шпицберген

Климат на Шпицбергене арктический, морской, смягченный теплыми атлантическими водами. Между отдельными районами архипелага наблюдаются существенные климатические различия. Для западного побережья характерен относительно мягкий и влажный климат, центральным районам архипелага, присущи особенности континентального климата, сравнительно холодные и влажные климатические условия наблюдаются на юго-востоке, а на северо-востоке архипелага – типично арктический климат. Здесь располагается «полюс холода» Шпицбергена. Даже в разгар лета температура в этом районе редко превышает 0°C , а зимой иногда опускается и ниже -40°C .

Для архипелага характерны сравнительно низкие температуры. Наиболее холодный месяц – март, наиболее теплый – июль. Благодаря Гольфстриму зимой могут наблюдаться оттепели.

Количество выпадающих осадков неодинаково для отдельных частей архипелага. По направлению к западному побережью Шпицбергена количество выпадающих осадков увеличивается, а к югу, юго-востоку, и особенно северо-востоку – уменьшается и лишь на самом восточном побережье вновь несколько увеличивается. На западном побережье

Шпицбергена выпадает около 400 мм осадков в год, а на Северо-Восточной Земле чуть более 200 мм осадков в год. Максимальное количество осадков приносят южные и юго-западные ветры. В горах выпадает в 2,5 – 3 раза больше осадков, чем в низменных местах, что оказывает существенное влияние на накопление льда.

Осадки выпадают в основном в виде слабых, но продолжительных по времени снегопадов. Мощные снегопады и дожди случаются редко. Ежегодно на архипелаге бывает около 240 дней с осадками, в том числе 170 – со снегом и 70 – с дождем.

В абсолютном выражении содержание влаги в воздухе на архипелаге невелико, однако вследствие постоянных низких температур здесь в течение всего года повсеместно наблюдается высокая относительная влажность (>80%).

В течение года на Шпицбергене преобладает облачная погода. Максимум облачности приходится на лето (август). В это время иногда бывают грозы. Средняя годовая облачность составляет 7 – 8 баллов.

Одной из наиболее характерных особенностей гидрологического режима Шпицбергенских вод является ледяной покров. В районе архипелага проходит граница распространения плавучих льдов. Она из года в год значительно меняет свое местоположение, перемещаясь иногда на значительные расстояния. К западу от Шпицбергена граница плавучих льдов под влиянием теплого Западно-Шпицбергенского течения в зимний период существенно изгибается к северу. В отдельные благоприятные в ледовом отношении зимы сплошной ледяной покров может отсутствовать у западного побережья архипелага. При этом граница дрейфующих льдов наблюдается только вдоль самого побережья у его южной оконечности (мыс Серкапп). Поскольку рассмотренные нами фьорды находятся на западном побережье архипелага, они, как правило, покрываются льдом в ноябре-январе, а уже в мае освобождаются от ледяного покрова. В некоторые годы фьорды не замерзают вообще.

Обобщая выше сказанное, можно сделать вывод, что на климат архипелага Шпицберген влияют: общая циркуляция атмосферы, сезонные колебания освещенности, степень распространения арктического льда и океанические течения (в особенности Западно-Шпицбергенское течение). Крупномасштабная циркуляция определяется положением Исландского минимума давления и областей высокого давления над Гренландией и Северным Ледовитым океаном, которые определяют интенсивность поступления теплого и влажного воздуха из Северной Атлантики в направлении к Норвежскому и Баренцеву морям. Большая разница температуры Атлантической и Арктической воздушных масс вызывает значительные колебания в погодных условиях, особенно в зимний период. Западно-Шпицбергенское течение является причиной

отсутствия дрейфующих льдов вдоль западного побережья, практически, в течение всего года и частично, даже зимой, к северу от Шпицбергена.

Циркуляция вод омывающих архипелаг определяется 4 основными течениями (рис.5): Западно-Шпицбергенским течением (ЗШТ), Восточно-Шпицбергенским течением (ВШТ), Прибрежным течением (ПТ) и течением Южного мыса (ТЮМ). Океанологические условия во фьордах сильно связаны с характеристиками течений вокруг архипелага. Большое количество тепла и солей поступает посредством ЗШТ, северным ответвлением Норвежского течения (Hanzlick, 1993; Rudels et al., 2000). Температура воды в поверхностном (до 600-800 м) слое этого течения составляет $+3^{\circ}$, $+5^{\circ}$ С зимой, и до $+7^{\circ}$ С летом. Теплая и солёная АВ в системе ЗШТ распространяется к северу вдоль континентального (западного) склона побережья Западного Шпицбергена по причине сохранения потенциальной завихренности (Педлоки, 1984). Поэтому поверхность океана к западу от шельфа обычно свободно ото льда. В последние годы площадь распространения морского льда в Арктике уменьшилась, а температура Атлантической воды в ЗШТ возросла (Журавский, Иванов, 2010; Павлов и др., 2010).

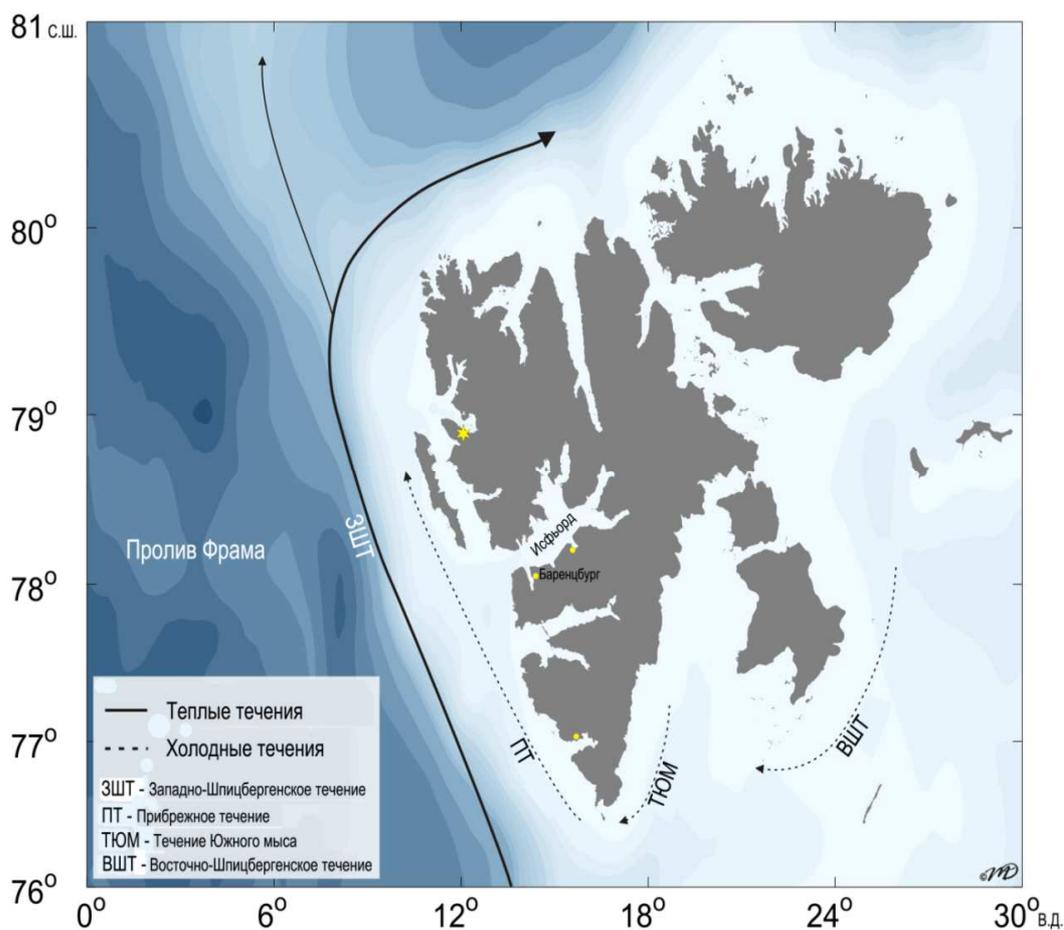


Рисунок 5 - Схема основных течений в районе арх. Шпицберген

Глава 3. Используемые данные и методы обработки

3.1. Используемые данные

В данной главе представлено описание данных, которые были использованы в процессе выполнения исследования. Как уже указывалось выше, в работе были использованы данные наблюдений за ПТВ, собранные Норвежским Метеорологическим институтом (Nordli et al, 2014b). Временной ряд охватывает период времени с 1900 по 2013 гг., при этом данные включают в себя средние за месяц значения ПТВ в районе архипелага Шпицберген за указанный период (Nordli et al, 2014b). Он был получен путем объединения наблюдений, проводившихся в норвежском поселке Лонгйирбюэн (административная столица Шпицбергена) и во временных пунктах наблюдений (экспедиции охотников, геологов и т.п.) в ближайшей части архипелага. Временной ряд был сформирован с использованием специальных методов интерполяции для заполнения имеющихся пропусков (Nordli et al, 2014a). Для совместного анализа использовались средние месячные данные для вышеуказанного промежутка времени. Помимо этого, в работе были использованы данные инструментальных наблюдений за ПТВ в других пунктах арх. Шпицберген: Нью-Олесунн, Пирамида, Баренцбург, Хорнсунн, Исфьорд Радио. Все пункты наблюдений представлены на рисунке 7.

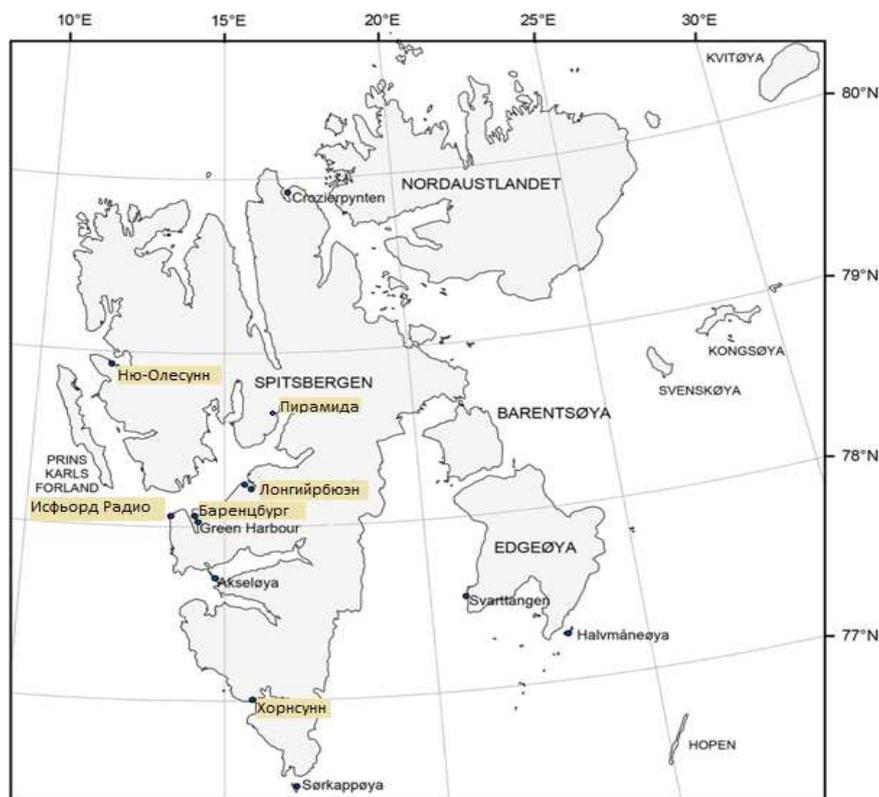


Рисунок 7 - Пункты наблюдений за ПТВ на острове Западный Шпицберген

Также в работе изучается временная изменчивость температуры ГАВ в фьордах Западного Шпицбергена в период первого (1920 – 1940 гг.) и современного потепления в

Арктике. Выбор этих акваторий обусловлен их географическим положением (непосредственный контакт с водами ЗШТ) и тем обстоятельством, что именно эти фьорды в наибольшей степени, по сравнению с другими районами архипелага, обеспечены данными глубоководных океанографических наблюдений.

Измерения океанографических характеристик в этих фьордах начались в конце девятнадцатого века. Массив данных на начальном этапе работы представлял собой набор океанологических станций (более 900), выполненных с 1901 по 2012 года с различными по продолжительности перерывами между наблюдениями. Для большинства станций имелись данные по следующим океанологическим параметрам: глубина (стандартные горизонты), температура и солёность. Источники информации – архив Всероссийского научно-исследовательского гидрометеорологического института (ВНИИГМИ МЦД, г. Обнинск), архив данных Норвежского Полярного института, база данных «Северных морей», созданная в отделе взаимодействия океана и атмосферы ГНЦ ААНИИ (Кораблев и др., 2007), и данные института Океанологии Польской Академии Наук.

Следует отметить, что, так как большая часть наблюдений выполнялась по объективным причинам (отсутствие льда) в летние месяцы (июль – сентябрь или, так называемое, «арктическое лето»), то для более объективного анализа долгопериодной изменчивости температуры ТАВ, было принято решение использовать станции, выполненные именно в этот период года. В итоге, в процессе критической обработки исходного массива данных, количество океанографических станций, используемых для дальнейшего анализа, сократилось до 317 (рис. 8).

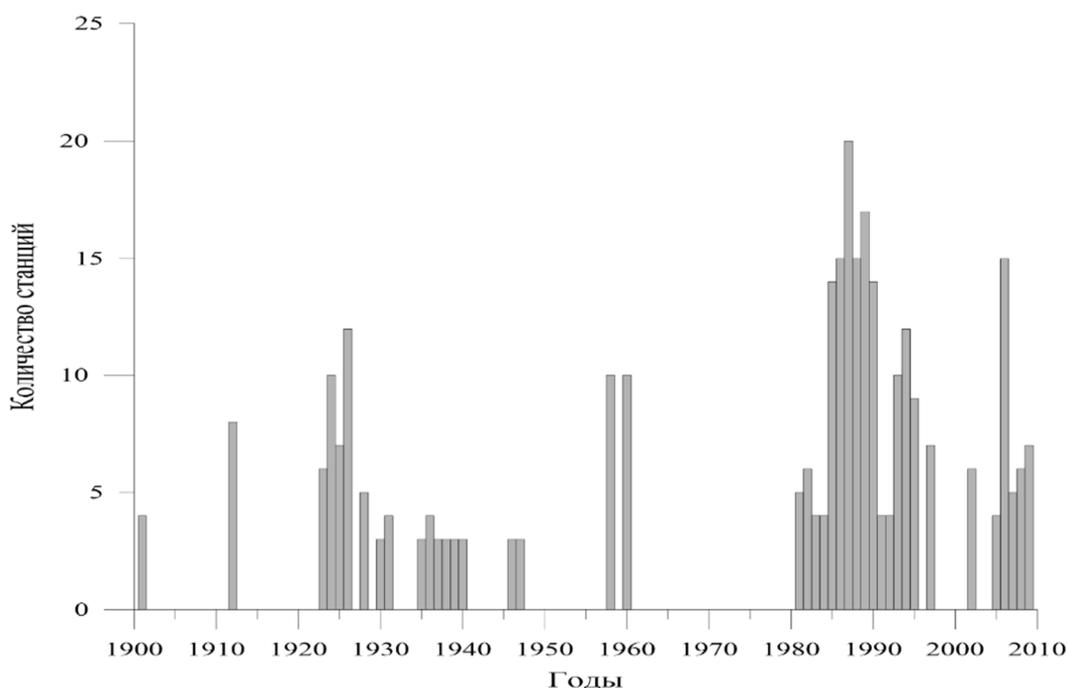


Рисунок 8 - Распределение океанографических станций по годам

Данные о площади ледяного покрова для района архипелага Шпицберген были получены из «Глобального банка цифровых данных по морскому льду» (ГБЦДМЛ), созданного в лаборатории режимных пособий ААНИИ (<http://wdc.aari.ru/>). На рисунке 9 представлена карта районов, по которым были получены средние за месяц данные о площади льда за период 1979 – 2015 гг. Выбор районов обусловлен географическим принципом с учетом влияния течений, омывающих архипелаг, а также для удобства оценки мезоклиматических особенностей.

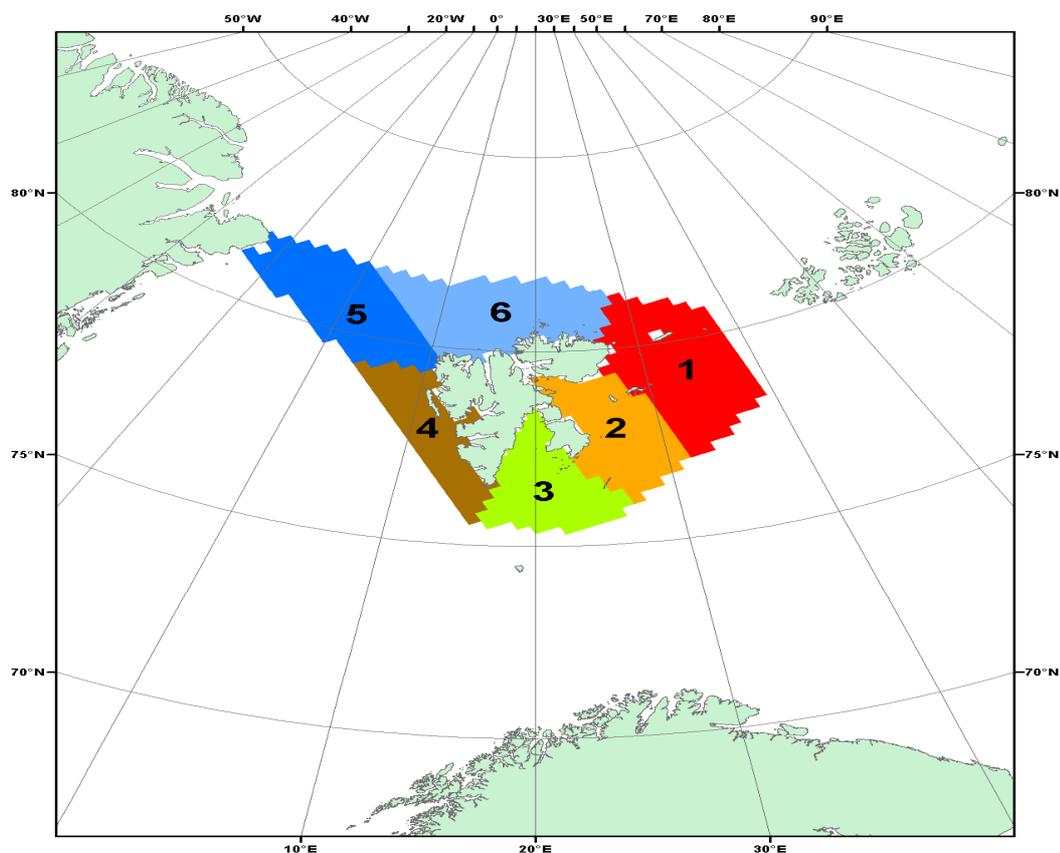


Рисунок 9 - Карта районов, для которых были получены данные о ледовых условиях в районе архипелага Шпицберген

3.2. Методы обработки

В ходе выполнения выпускной работы были использованы различные методы обработки данных. Отметим, что изучение многолетней изменчивости каких-либо процессов или величин может осуществляться как методами математического моделирования, так и методами статистического анализа (Меншуткин, 2010; Рожков, 2002). В нашей работе для анализа долгопериодной изменчивости температуры воды в слое ТАВ, ПТВ и ледовитости, а также для оценки взаимосвязи между указанными характеристиками мы использовали методы статистического анализа.

Предваряя описание методов обработки данных, необходимо указать критерии для выделения АВ. АВ имеют следующие характеристики: температура > 3 °С, солёность $> 34,9$ ‰. ТАВ имеет температуру и солёность в пределах $1-3$ °С и $34,7-34,9$ ‰. Она является продуктом смешения собственно АВ и местных поверхностных водных масс фьордов, образующихся там в различные сезоны года (Cottier, Tverberg, 2005).

На первом этапе производился отбор океанографических станций, имеющих одновременные измерения температуры и солёности. Далее выбирались года, в течение которых в период июль-сентябрь было выполнено не менее 3-х океанографических станций. На втором этапе вычислялись средние значения температуры в слое ТАВ. Осреднение проводилось для каждой отдельной станции в пределах конкретного года. Расчеты производились с помощью лицензионных программных продуктов Golden Software Grapher, Microsoft Office Excel, STATISTICA.

Для анализа временной изменчивости средней температуры в слое ТАВ в период «арктического лета», ПТВ и площади ледяного покрова были рассчитаны аномалии соответствующих характеристик относительно среднего значения за весь временной ряд. Полученные величины отклонений позволяют более точно выделить временные интервалы повышенных или пониженных значений температуры воды, воздуха или ледовитости.

Для анализа многолетней изменчивости аномалий площади ледяного покрова за исследуемый период в районе арх. Шпицберген было принято решение перейти от абсолютной величины (площадь ледового покрова в тыс. км²) к относительной, т.е. к ледовитости. В соответствии с общепринятым определением под «ледовитостью» понимается *«...выраженное в процентах отношение площади, занятой льдом любой сплоченности, к общей площади моря или какого-либо большого географического района. Этот район может быть глобальным, включающим площадь морей целого полушария, или ограниченным какой-либо частью океана или моря, например, Баренцево море или Баффинов залив...»* (Международная ..., 1984).

Выявление тенденции во временных рядах ПТВ, как для средних за год значений, так и для конкретных месяцев и сезонов проведено методом скользящего среднего с шагом 11 лет. Выбор периода осреднения в 11 лет обусловлен существованием хорошо известного цикла изменения солнечной активности (Витинский и др., 1986; Монин, 1969; Прист, 1985).

В случае сравнительного анализа многолетней изменчивости температуры в слое ТАВ, ПТВ и ледовитости были использованы нормированные отклонения, которые представляют собой отношение аномалии, рассчитанной для каждого года, к среднеквадратическому отклонению соответствующего параметра. Таким способом мы получаем безразмерные величины, которые можно сравнивать между собой. Данный метод был впервые предложен для анализа долгопериодной изменчивости температуры атлантических вод в работе (Алексеев и др., 2003).

Также была предпринята попытка анализа многолетней изменчивости характеристик, путём расчета линейных трендов (уравнений линейной регрессии). Сама прямая строится с использованием метода наименьших квадратов. Суть этого метода заключается в минимизации квадратов отклонений реальных значений какой-либо величины от значения на линии регрессии (Рожков, 2002). В качестве числовых характеристик линейного тренда приняты его величина (угол наклона (a), град/год), коэффициент детерминации (%), выражающий долю дисперсии исходного ряда описываемую полученным трендом, и уровень статистической значимости выявленного тренда (Грешилов и др., 1997; Рожков, 2002). В ходе выполнения работы была выполнена, и оценка статистической значимости рассчитанных коэффициентов взаимной корреляции. Для коэффициентов корреляции статистическая значимость оценивалась также в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе (Рожков, 2002).

Как указывалось, выше, для графической визуализации временной изменчивости характеристик атмосферы, океана и морского льда использовались лицензионные программные продукты (графические редакторы). Возможности, которые предлагают данные приложения, вполне достаточно для выполнения объективного статистического анализа, имеющихся в нашем распоряжении, данных.

Глава 4. Анализ временной изменчивости приземной температуры воздуха, температуры трансформированных атлантических вод и ледовых условий в районе архипелага Шпицберген

4.1 Приземная температура воздуха

Поскольку основной целью данной работы является исследование ледово-океанографического режима фьордов архипелага Шпицберген, то, следуя основополагающим методологическим подходам (Алексеев, 2003; Визе, 1937) необходимо рассмотреть особенности временной изменчивости приземной температуры воздуха, как одной из важнейших характеристик термического режима атмосферы, оказывающей существенное влияние на ледово-океанографический режим фьордов. Как уже было указано в главе 3, временной ряд средних месячных значений ПТВ покрывает период с 1900 по 2013 гг. На рисунке 10 представлены графики временной изменчивости среднегодовых значений ПТВ, а также графики, построенные с использованием фильтра 5-ти и 11-ти летнего скользящего среднего для указанной характеристики (Грешилов и др., 1997). Использование фильтра скользящего среднего объясняется существенной межгодовой изменчивостью температуры воздуха и необходимостью выявить возможные многолетние закономерности временной изменчивости.

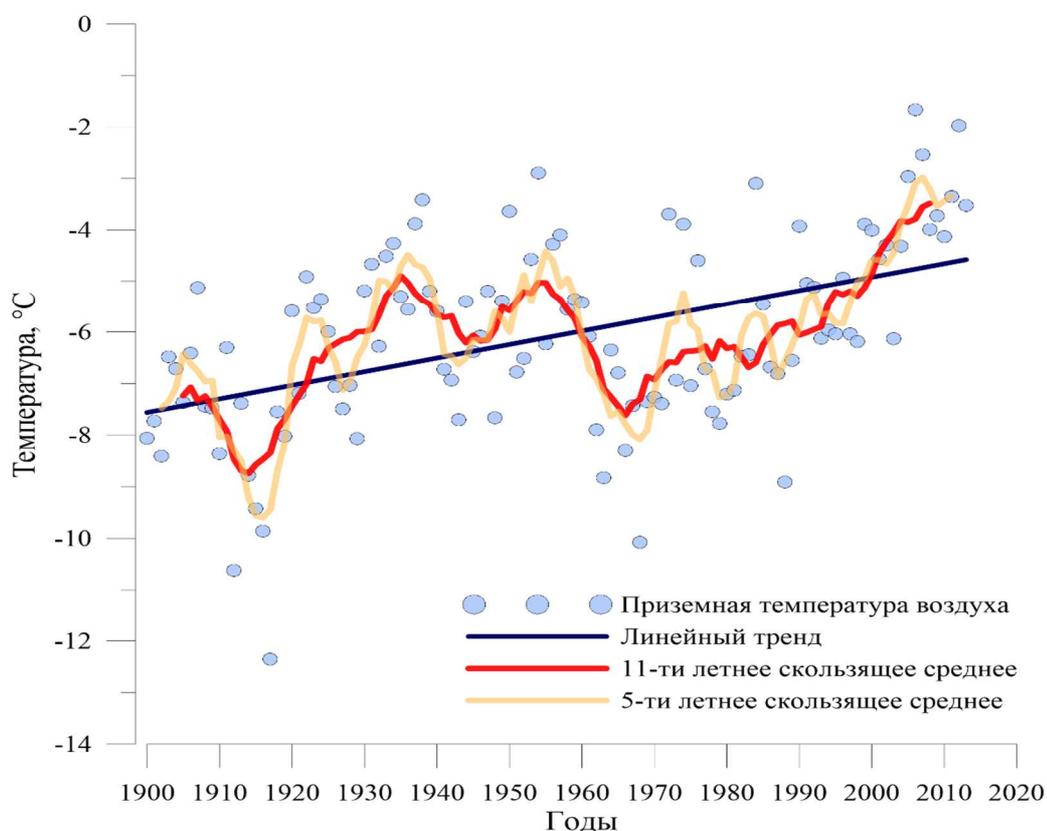


Рисунок 10 - Изменчивость приземной температуры воздуха за период с 1900 по 2013 гг.

Графики пятилетнего и одиннадцатилетнего скользящего среднего наглядно описывают внутреннюю структуру первого и современного потеплений. Так первое потепление для района архипелага Шпицберген приходится на 1915 – 1965 гг. Необходимо отметить, что в этот временной интервал на фоне общего увеличения температуры выделяются и кратковременные периоды её уменьшения («похолодания») в 1920 – 1925 гг. и 1935 -1945 гг.

Наиболее интенсивное увеличение температуры воздуха, следуя кривой пятилетнего скользящего среднего, наблюдается с середины 1980-х гг. до нашего времени – «современный» период потепления. Данный период существенного увеличения ПТВ в районе архипелага Шпицберген совпадает с периодом хорошо известного «Арктического усиления» («Arctic amplification»), под которым понимается значительное увеличение температуры воздуха в 1980 – 2010 гг. в масштабах всей Арктики (Serezzе, Barry, 2011). В «современный» период потепления также наблюдаются кратковременные периоды уменьшения температуры (локальные «похолодания»), но при значительно меньших амплитудах и временных масштабах по сравнению с периодом «первого» потепления.

График одиннадцатилетнего скользящего среднего описывает изменчивость с масштабами более 11 лет, исключая «высокочастотные» колебания с меньшим периодом. Выбор периода осреднения в 11 лет обусловлен существованием хорошо известного цикла изменения солнечной активности (Монин, 1969; Витинский и др., 1986; Прист, 1985). Для первого потепления, как и в случае с пятилетним скользящим средним, характерно наличие периодов локального понижения температуры воздуха (1935 – 1945 гг.) на общем фоне её увеличения. Период интенсивного (современного) увеличения ПТВ смещен на начало 1980-х годов. Расчет линейного тренда ПТВ показывает, что потепление происходит, в среднем, со скоростью 0,026 градус/год, и в целом составило 2,9 градуса за весь период наблюдений (см. Таб. 1).

На рисунке 11 представлен график временной изменчивости аномалий среднегодовой ПТВ, а также график, построенный с помощью 11-ти летнего скользящего среднего для указанной характеристики. Среднее многолетнее значение ПТВ для всего временного ряда составило -6,1 °С. Из представленного на рисунке 15 графика, можно сделать следующие выводы. Во-первых, выделяются два периода с положительными аномалиями среднегодовой ПТВ. Первый период приходится на 1915 – 1965 гг., а второй наблюдается с 1980-х по настоящее время. Во-вторых, в терминах отклонений от среднего «современное» потепление является более мощным. Максимальные значения отклонений за период «современного» потепления составили 4,4 и 4,1 градуса и наблюдались в 2006 и 2012 гг. соответственно. Положительные отклонения в период «первого» потепления в

Арктике значительно ниже и составляют 2,7 и 3,2 градуса для 1938 и 1954 гг. Преобладание отрицательных аномалий соответствует временным интервалам 1900 – 1920 и 1965 – 1980 гг. Максимальное отрицательное отклонение составляет -6,3 градуса и наблюдалось в 1917 г.

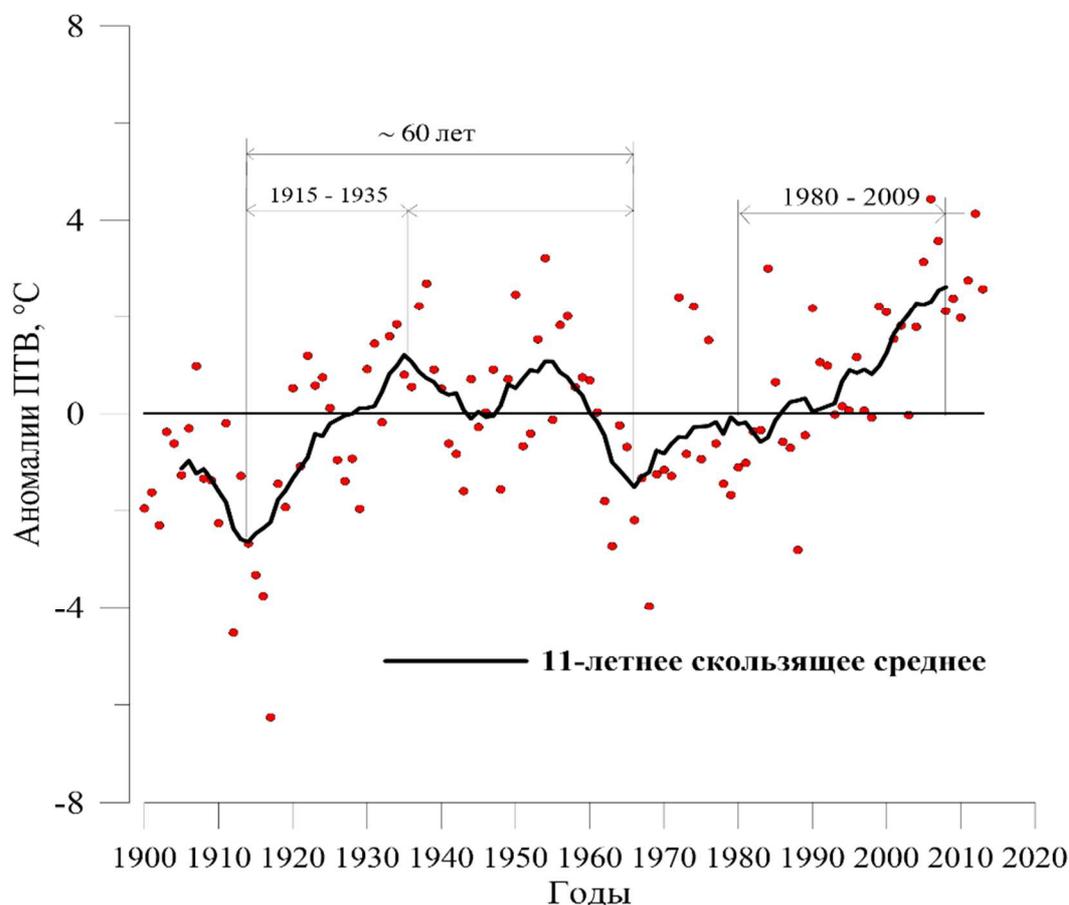


Рисунок 11 - Временная изменчивость аномалий среднегодовой ПТВ

Далее мы проанализировали величины потепления в районе архипелага Шпицберген для каждого месяца года в отдельности для всего периода инструментальных наблюдений. Результаты анализа представлены в таблице 1.

Наибольшее потепление наблюдалось в феврале, марте, апреле и ноябре: повышение температуры воздуха для указанных месяцев составляло 4–5 градусов за столетие.

Уравнения линейной регрессии являются статистически значимыми на уровне $P < 0,05$. Исключение составляют тренды для приземной температуры воздуха в январе и декабре, которые статистически значимы на уровне $P < 0,15$.

Таблица 1. Величины потепления для отдельных интервалов времени

Интервал времени	Изменение ПТВ, (Коэффициент линейного тренда, градус/год)	Коэффициент детерминации R^2
<i>Январь</i>	0,021	0,02
Февраль	0,052	0,14
Март	0,048	0,13
Апрель	0,038	0,12
Май	0,029	0,22
Июнь	0,009	0,06
Июль	0,015	0,22
Август	0,011	0,16
Сентябрь	0,020	0,17
Октябрь	0,016	0,05
Ноябрь	0,040	0,10
<i>Декабрь</i>	0,019	0,02
В среднем за год	0,026	0,22
Весь период наблюдений (1900-2013 гг.)	2,9 °С	

Примечание: курсивом выделены месяцы, для которых уравнения линейной регрессии не являются статистически значимыми на уровне $P < 0.05$.

Рассмотрим проявление потеплений для интервалов времени 1915 – 1935 гг. и 1980 – 2009 гг. более детально (см. Табл. 2). Как было указано выше, расчёт соответствующих уравнений линейной регрессии проводился для временных рядов, полученных с использованием фильтра скользящего осреднения. Сравнивая полученные результаты по среднегодовым значениям ПТВ в районе архипелага Шпицберген, можно утверждать, что для обоих потеплений наблюдается более интенсивное увеличение температуры, чем за весь наблюдаемый период 1900 – 2013 гг. В первом потеплении коэффициент линейного тренда ПТВ составляет 0,17 град/год, во втором – 0,11 град/год. Таким образом первое и второе потепления происходят со скоростями близкими, но при этом существенно большими, чем в целом за весь период наблюдений (0,026 град/год).

Сравним проявление потеплений по месяцам для интервала времени с 1915 по 1935 гг. и с 1980 по 2009 гг. (см. рис. 12), когда наблюдалась наиболее интенсивная скорость изменения температуры воздуха. Проверка на статистическую значимость показала, что уравнения линейной регрессии статистически значимы на уровне $P < 0,05$, за исключением июня в период первого потепления (выделен в таблице 2 курсивом). Отметим, что для рассматриваемых интервалов времени характерны положительные значения углов наклона

линейного тренда по месяцам, за исключением июня в период 1915 – 1935 гг., когда не наблюдалось никакой тенденции в изменении ПТВ. Наиболее значительная скорость изменения ПТВ наблюдается в следующие месяцы: ноябрь, декабрь, январь, февраль, март, апрель. Самое интенсивное увеличение ПТВ приходится на февраль для периода первого потепления – 0,45 градус/год. В целом по среднемесячным оценкам первое и второе потепления происходят с близкими скоростями, при этом выделяются два периода, первый: апрель – октябрь, второй: ноябрь - март. Для месяцев с апреля по март характерны практически равные значения скорости изменения ПТВ для обоих интервалов времени. Для месяцев холодного периода (ноябрь – март) года значения скорости изменения ПТВ в период первого потепления превосходят соответствующие величины скорости изменения ПТВ в период современного потепления в 1,5 – 2 раза. Отметим достаточно существенные различия коэффициентов детерминации, как между анализируемыми периодами потепления (для одноименных месяцев), так и внутри каждого временного интервала в отдельности. В случае первого потепления коэффициенты детерминации изменяются в широких пределах от 0,003 (июнь) до 0,98 (декабрь). Для современного потепления в целом характерны сопоставимые значения коэффициента детерминации: от 0,32 (март) до 0,96 (август). Также необходимо отметить практически синхронное изменение значений коэффициентов линейного тренда по месяцам как для первого, так и для современного потепления.

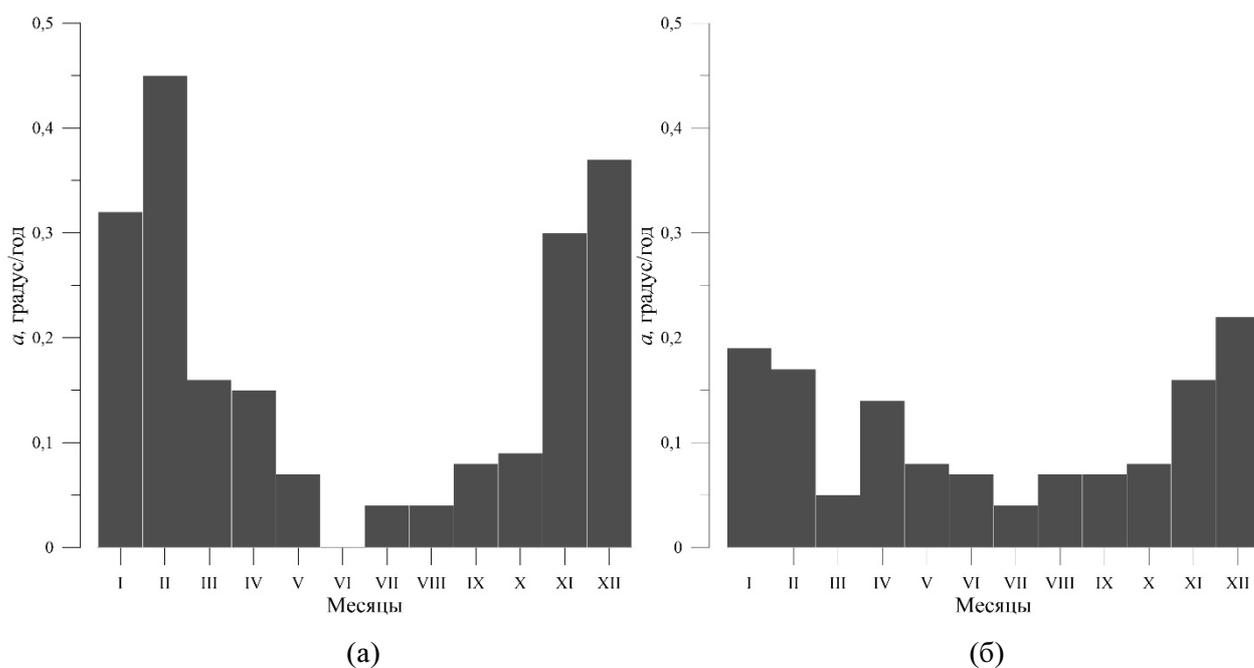


Рисунок 12 - Коэффициенты линейных трендов среднемесячной ПТВ в районе архипелага Шпицберген для первого 1915-1935 гг. (а) и современного 1980-2008 гг. (б) потеплений.

Таблица 2. Сравнение периодов потепления в районе архипелага Шпицберген

Интервал времени	Коэффициент линейного тренда, градус/год		Коэффициент детерминации; статистическая значимость (%)		Уравнение линейного тренда (1915 – 1935)	Уравнение линейного тренда (1980 – 2008)
	1915 – 1935	1980 – 2008	1915 – 1935	1980 – 2008		
Январь	0,32	0,19	0,90; 95	0,78; 95	$y = 0,32x - 624,62$	$y = 0,19x - 391,7$
Февраль	0,45	0,17	0,84; 95	0,69; 95	$y = 0,45x - 887,18$	$y = 0,17x - 353,9$
Март	0,16	0,05	0,84; 95	0,32; 95	$y = 0,16x - 328,18$	$y = 0,05x - 117,4$
Апрель	0,15	0,14	0,87; 95	0,93; 95	$y = 0,15x - 301,89$	$y = 0,14x - 286,2$
Май	0,07	0,08	0,61; 95	0,72; 95	$y = 0,07x - 148,46$	$y = 0,08x - 167,4$
<i>Июнь</i>	<i>0,00</i>	0,07	<i>0,003; 20</i>	0,92; 95	$y = -0,002x + 5,77$	$y = 0,07x - 139,8$
Июль	0,04	0,04	0,44; 95	0,77; 95	$y = 0,04x - 66,76$	$y = 0,04x - 82,2$
Август	0,04	0,07	0,63; 95	0,96; 95	$y = 0,04x - 73,89$	$y = 0,07x - 125,6$
Сентябрь	0,08	0,07	0,75; 95	0,88; 95	$y = 0,08x - 155,23$	$y = 0,07x - 141,3$
Октябрь	0,09	0,08	0,66; 95	0,52; 95	$y = 0,09x - 178,09$	$y = 0,08x - 155,8$
Ноябрь	0,30	0,16	0,97; 95	0,76; 95	$y = 0,30x - 592,62$	$y = 0,16x - 337,4$
Декабрь	0,37	0,22	0,98; 95	0,82; 95	$y = 0,37x - 716,31$	$y = 0,22x - 444,6$
Среднее за год	0,17	0,11	0,96; 95	0,92; 95	$y = 0,17x - 338,95$	$y = 0,11x - 228,6$

Примечание: курсивом выделены месяцы, для которых уравнения линейной регрессии не являются статистически значимыми на уровне $P < 0.05$.

Рассмотрим полученные результаты для района арх. Шпицберген в сравнении с другими работами, посвященными рассмотрению скорости изменения ПТВ в Арктике в XX столетии. В работе (Оценочный доклад ..., 2008) представлены данные о современных тенденциях изменениях ПТВ в виде географического распределения коэффициентов линейного тренда на территории России за 1976 – 2006 гг. Стоит отметить, что за указанный период для большей части территории Российской Арктики наблюдаются положительные значения коэффициентов линейного тренда, как в среднем за год, так и по сезонам, что соответствует современным изменениям ПТВ в районе арх. Шпицберген. При этом сравнение скорости изменения ПТВ по абсолютной величине показало, что при сопоставимых значениях коэффициентов линейного тренда для района арх. Шпицберген современное потепление происходит с несколько большей интенсивностью. Например, для района Кольского п-ова по среднегодовым значениям современное потепление происходит со скоростью 0,6 – 0,7 °C/10 лет, а для арх. Шпицберген 1,1 °C/10 лет.

4.2 Ледовые условия

Анализ и получение количественных оценок временной изменчивости ледовых условий в районе архипелага Шпицберген также являлись практическими задачами данного исследования. Для выполнения данных задач, как уже было указано выше, использовались данные полученные из «Глобального банка цифровых данных по морскому льду» (ГБЦДМЛ), созданного в лаборатории режимных пособий ААНИИ. В этой базе использованы следующие открытые российские и зарубежные источники ледовых данных:

- региональные 7-дневные ледовые карты из открытого архива Мирового центра данных по морскому льду ААНИИ (Гренландское, Баренцево моря за период 1997- 2015 гг., гридированных на сетку 12.5 x 12.5 км) (<http://wdc.aari.ru>);

- ежедневная информация об общей сплоченности (данные SSM/I-SSMIS гридированные на сетку 12.5 x 12.5 км за период 1991 - 2015 гг. из архива IFREMER) (<ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/psi-concentration/>);

- ежедневные данные об оценках общей сплоченности по алгоритму NASATEAM на основе данных SSMR-SSM/I-SSMIS на сетке 25 x 25 км за период 1978 - 2015 гг. из архива NSIDC (ftp://sidacs.colorado.edu/DATASETS/nsidc0051_gsfc_nasateam_seaice/final-gsfc/);

Исследуемый нами временной ряд охватывает период с ноября 1978 по ноябрь 2015 гг. и является объединением наблюдений за площадью ледового покрова в данном районе с использованием всех доступных источников информации (судовые и самолетные наблюдения, данные искусственных спутников Земли - ИСЗ). Площадь ледяного покрова была рассчитана для 6-ти районов вокруг архипелага Шпицберген (см. рисунок 9). На рисунке 13, в качестве примера, представлен график временной изменчивости среднегодовой площади морского льда для района №4, прилегающего к акватории пролива Фрама (наиболее сильное влияние АВ).

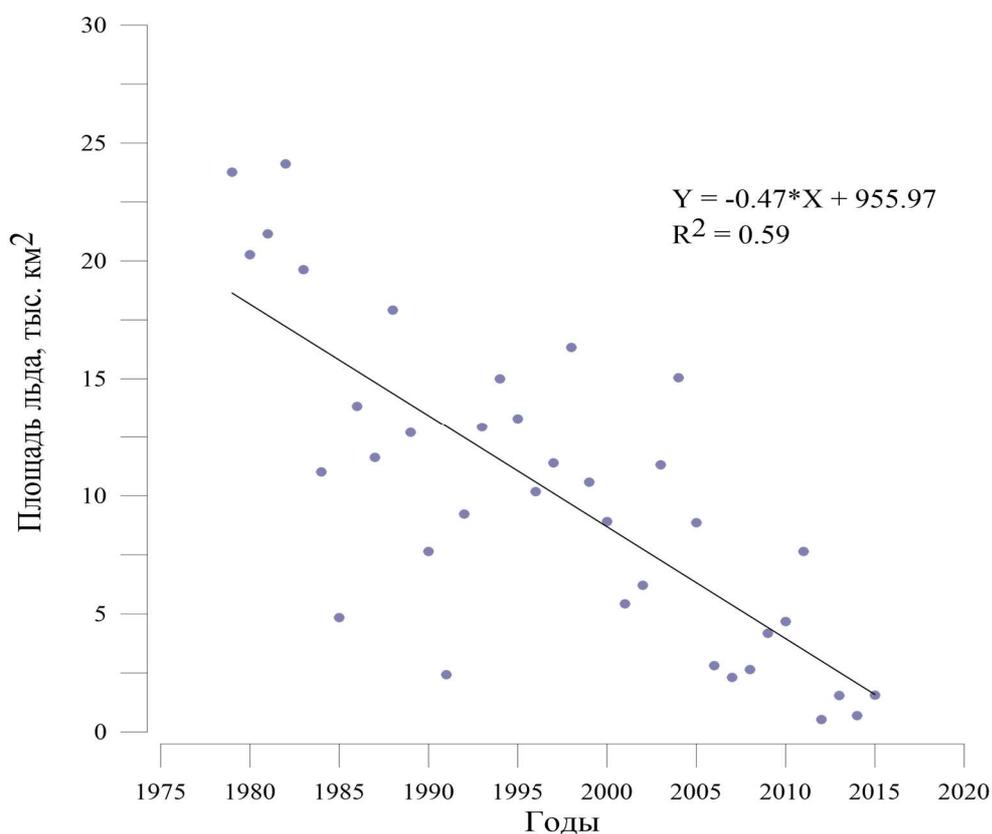


Рисунок 13 – Временная изменчивость площади ледового покрова для района №4 за период с 1979 по 2015 гг.

Временная изменчивость площади морского льда для западного побережья острова Западный Шпицберген характеризуется следующими особенностями. Первичный анализ представленного временного ряда указывает на общее уменьшение среднегодовой площади ледового покрова для всего рассматриваемого периода. В терминах линейного тренда сокращение пространства, занимаемого морским льдом составляет около 0.5 тыс. км² в год. Отметим, что уравнение линейной регрессии является статистически значимым на уровне $P < 0.05$. Таким образом для района №4 за последние 35 лет наблюдается устойчивая тенденция к уменьшению площади льда. Величина коэффициента детерминации составляет 0.59. Это говорит о том, что полученный линейный тренд описывает более 50% общей дисперсии анализируемого временного ряда.

В таблице 3 представлены коэффициенты углов наклона линейного тренда (a , тыс. км²/год), как для отдельных месяцев, так и для среднегодовых значений для всех 6-ти районов вокруг архипелага Шпицберген. Сокращение площади ледового покрова (среднегодовые значения) происходит практически с одинаковой скоростью (от 0,44 до 0,59 тыс. км²/год) для всех районов, за исключением района №5. Район №5 выделяется на общем фоне. Здесь для периода апрель – ноябрь линейные тренды не являются статистически значимы на уровне $P < 0,05$. В другие месяцы года сокращение площади ледяного покрова

происходит со скоростями в 2 – 6 раз меньшими, чем в других районах. По-видимому, такой характер изменчивости связан с особенностями циркуляции вод и льдов, характеризующийся достаточно постоянным и однонаправленным процессом – выносом многолетних льдов из центральных частей Арктического бассейна Восточно-Гренландским течением. Для остальных районов наблюдается, в целом, одинаковая картина изменчивости. Коэффициенты наклона линейного тренда максимальны в холодный период года (октябрь – март), минимальные в теплый (апрель – сентябрь). При этом для районов, расположенных к востоку от архипелага (районы 1-3), высокие значения скорости изменения площади льда наблюдаются также в июле – августе. Максимальные значения изменения площади ледяного покрова отмечаются в районе №1 в июле и сентябре и составляют -1,35 и -1,37 тыс. км²/год соответственно. Для среднегодовых значений максимальное сокращение площади льда за рассматриваемый период также наблюдается в районе №1 и составляет -0,59 тыс. км²/год. Таким образом, на основе полученных данных, можно сделать вывод, в водах, окружающих архипелаг Шпицберген, в течение последних 35-ти лет наблюдается устойчивая тенденция к смягчению ледовых условий, как в среднем за год, так и для отдельных сезонов.

Таблица 3. Коэффициенты наклона линейного тренда (*a*, тыс.км²/год)
для 6 районов архипелага Шпицберген

Район/Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1	-0,32	-0,28	-0,11	<u>-0,08</u>	<u>-0,27</u>	-0,94	-1,35	<u>-0,50</u>	<u>-0,15</u>	-1,02	-1,37	-0,45	-0,57
2	-0,42	-0,37	-0,18	<u>-0,10</u>	-0,35	-0,68	-0,69	-0,30	-0,14	-0,53	-1,05	-0,49	-0,44
3	-0,85	-0,68	-0,37	-0,37	-0,66	-0,68	-0,33	<u>-0,01</u>	<u>-0,01</u>	-0,17	-0,81	-1,03	-0,49
4	-0,86	-0,90	-0,74	-0,75	-0,59	-0,38	-0,23	-0,14	-0,04	-0,04	-0,29	-0,73	-0,47
5	-0,17	-0,24	-0,17	<u>-0,09</u>	<u>-0,07</u>	<u>-0,06</u>	<u>-0,09</u>	<u>0,02</u>	<u>0,11</u>	<u>0,004</u>	<u>-0,05</u>	-0,13	<u>-0,07</u>
6	-0,80	-0,77	-0,44	<u>-0,18</u>	<u>-0,23</u>	<u>-0,22</u>	-0,43	<u>-0,45</u>	<u>-0,36</u>	-0,53	-0,65	-0,72	-0,48

Примечание: подчеркнутым курсивом выделены значения *a*, которые не являются статистически значимыми на уровне $P < 0.05$

На рисунке 14 представлен график межгодовой изменчивости аномалий общей (для всех 6 районов) ледовитости в районе арх. Шпицберген за 1979 – 2015 гг. Анализ в терминах ледовитости был проведён по методике, предложенной в работе (Жичкин, 2014), которая посвящена рассмотрению ледовых условий в районе архипелага Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) за 1977 – 2011 гг.

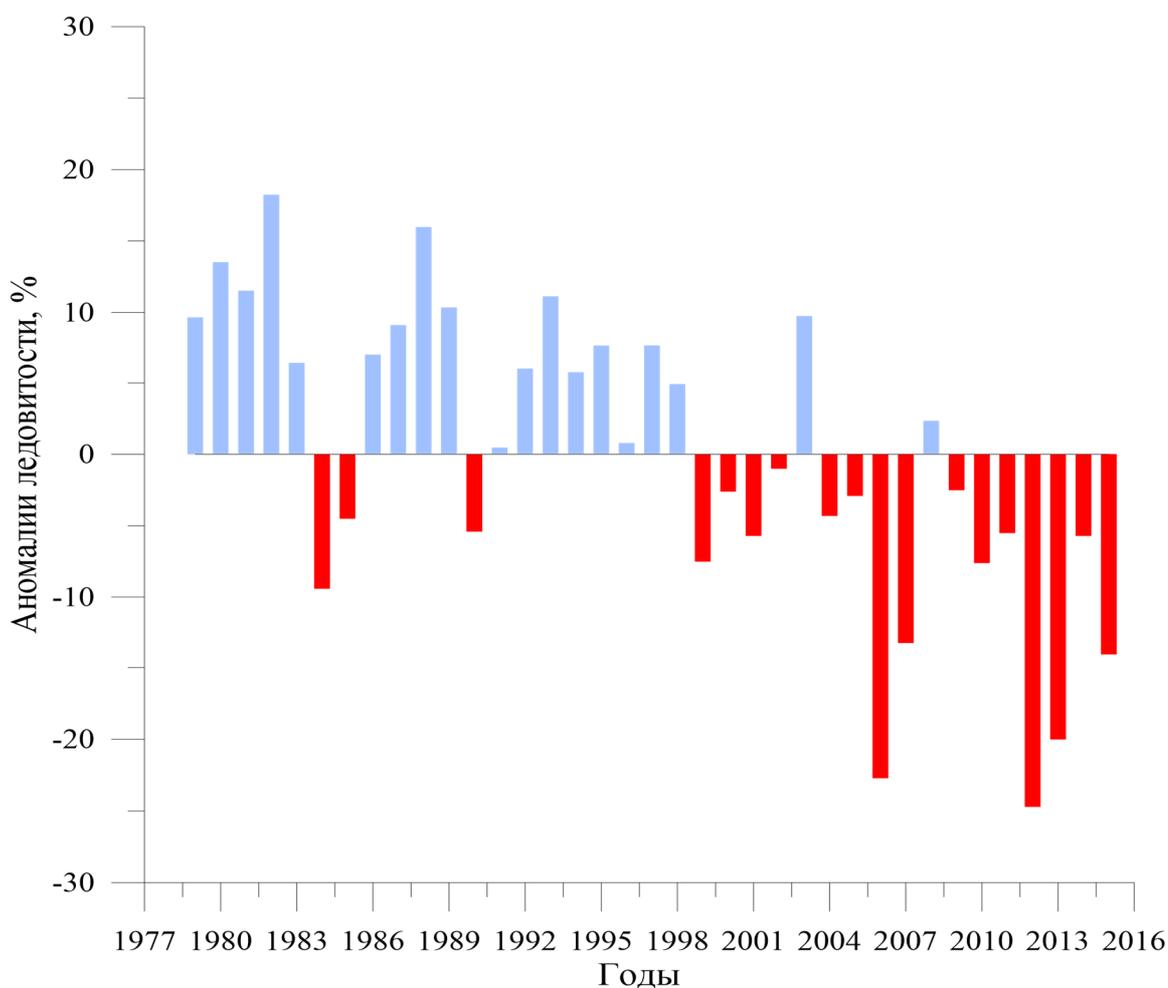


Рисунок 14 - Аномалии ледовитости в районе арх. Шпицберген за 1979 – 2015 гг.

Анализ полученных данных показал, что в водах, окружающих архипелаг Шпицберген, за последние 3 десятилетия наблюдаются значительные межгодовые ледовитости. Необходимо отметить, что для рассматриваемого периода характерно наличие двух противоположных по знаку аномалий интервалов времени. В период 1979 - 1998 гг. преобладали отрицательные аномалии, а с 1999 г. по настоящее время - положительные.

В таблице 4 представлены статистические характеристики ледовитости акватории архипелага Шпицберген для каждого месяца года.

Таблица 4. Статистические характеристики общей ледовитости (%) района арх. Шпицберген в течение годового ледового цикла (1979 – 2015 гг.)

Характеристика	Месяцы											
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
СРЕДНЕЕ	28,6	40,2	60,7	73,4	78,1	81,6	85,9	86,1	81,3	74,4	53,1	33,5
<i>Min</i>	9,6	16,2	21,7	28,6	36,8	42,6	53,6	53,3	42,8	34,3	19,2	8,7
<i>Max</i>	55,7	72,2	90,0	98,3	99,3	98,5	98,4	99,9	98,3	92,3	85,0	56,2
<i>(Max – Min)</i>	46,1	56,1	68,3	69,7	62,5	55,9	44,8	46,6	55,5	58,0	65,7	47,5
СКО	11,4	16,2	20,7	18,2	17,0	15,2	10,0	8,0	10,0	13,1	15,6	11,9

Ледяной покров в водах омывающих Шпицберген наблюдается, практически, в течение всего года. В среднем за исследуемый период к ноябрю большая часть акватории покрывается льдами. Однако, в последние 10 – 15 лет участились случаи, когда ледовитость в ноябре составляет не более 20-40 %. Отдельно можно выделить сезон 2006 – 2007 гг., когда вслед за закономерным увеличением площади ледяного покрова от сентября к октябрю, в ноябре было зафиксировано его заметное уменьшение, составившее, в среднем, от 7 до 12 %. Наибольшие значения ледовитости соответствуют периоду январь – май (78 – 86 %). Максимальные значения наблюдаются в марте – апреле. Абсолютный максимум зафиксирован в апреле 1979 г. Для периода март – май характерна наименьшая изменчивость площади льда, стандартное отклонение для этих месяцев составляет 8 – 10 %. Полного очищения исследуемых площадей морей, омывающих арх. Шпицберген, ото льда не наблюдалось ни в один из месяцев за исследуемый интервал времени. Наименее ледовитым месяцем можно считать сентябрь. В среднем ледовитость в данном месяце составляет 30%. Абсолютный минимум ледовитости в районе арх. Шпицберген наблюдался в августе 2004 г. и составил 9 %. Наибольшая изменчивость характерна для периода октябрь – январь и июля, стандартное отклонение составляет 16 – 21.

Стоит отметить, что для акватории арх. Шпицберген наблюдаются высокие значения разницы максимального и минимального значений для каждого из месяцев года, изменения лежат в диапазоне от 45 до 70 %. Максимальные значения размаха колебаний соответствуют июлю, ноябрю – декабрю, минимальные: марту – апрелю.

Для более детального анализа особенностей временной изменчивости ледовых условий в районе архипелага Шпицберген аналогичный статистический анализ был выполнен индивидуально для каждого из 6-ти районов. Результаты представлены в таблице 5. Изменения ледовитости по месяцам для всех районов, за исключением №4, имеет схожий характер с представленным выше для всего района в целом (см. табл. 4). Максимальные значения ледовитости наблюдаются в марте – апреле, минимальные в августе – сентябре. Для районов 1 – 4 наблюдаются отдельные месяцы (с июля по ноябрь) в исследуемых временных рядах, когда ледяной покров полностью отсутствует. Для районов 5 – 6 полного отсутствия морского льда по среднемесячным значениям не наблюдалось. Разница максимального и минимального значений многолетних изменений ледовитости находится в широком диапазоне для каждой акватории. Наименее изменчивым районом является №5, значения СКО по месяцам составляют от 6 до 16. Наибольшая изменчивость наблюдается в районе №4, где стандартное отклонение изменяется по месяцам от 2 до 32. Необходимо отметить, что наиболее сильные изменения в ледовых условиях для каждого из выбранных бассейнов наблюдаются в последние 10 – 15 лет.

Межгодовая изменчивость ледовитости в районе №4 (восточная часть пролив Фрама), находящегося под сильным влиянием атлантических вод (Западно-Шпицбергенское течение), требует несколько более подробного описания. Для данной акватории характерны наименьшие средние значения ледовитости по всем месяцам в сравнении с другими районами. За последние 10 лет средняя ледовитость данного района составляет не более 7 %. Также отмечается тот факт, что наиболее сильная изменчивость наблюдается не в теплый период, когда происходит сезонное таяние ледяного покрова, а в холодный (январь – апрель). Стандартное отклонение для периода январь – апрель составляет от 24 до 32 при разнице максимального и минимального значений 91 – 98 %, в июле – октябре от 2 до 8 и от 8 до 18 % соответственно.

Таблица 5. Статистические характеристики общей ледовитости (%) 6-ти районов вокруг арх. Шпицберген в течение годового ледового цикла (1979 – 2015 гг.)

Район №1												
Характеристика	Месяцы											
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
СРЕДНЕЕ	21,9	44,7	77,0	91,4	94,8	96,4	98,5	98,7	96,6	88,0	55,7	27,0
<i>Min</i>	0,0	0,0	0,0	19,3	51,3	61,2	82,2	59,4	32,2	14,8	0,0	0,0
<i>Max</i>	75,7	98,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,5	71,9
<i>(Max – Min)</i>	75,7	98,1	100,0	80,7	48,7	38,8	17,8	40,6	67,8	85,2	99,5	71,9
СКО	24,7	33,6	33,1	18,6	11,0	9,0	3,7	6,7	11,8	21,5	30,8	25,1

Район №2												
Характеристика	Месяцы											
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
СРЕДНЕЕ	5,0	24,1	65,4	84,1	89,2	91,7	95,1	96,3	92,7	81,3	43,1	9,1
<i>Min</i>	0,0	0,0	0,0	8,8	45,9	38,5	67,5	65,8	56,1	19,9	0,2	0,2
<i>Max</i>	51,8	80,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,5	58,5
<i>(Max – Min)</i>	51,8	80,0	100,0	91,2	54,1	61,5	32,5	34,2	43,9	80,1	95,3	58,4
СКО	10,7	24,8	35,4	25,0	15,2	13,7	7,9	6,3	11,1	24,0	26,3	14,4
Район №3												
Характеристика	Месяцы											
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
СРЕДНЕЕ	1,7	5,9	32,8	60,4	73,2	79,5	85,7	86,1	74,3	52,2	17,5	3,1
<i>Min</i>	0,2	0,2	0,4	1,1	4,8	13,2	22,7	48,8	22,2	2,8	0,7	0,7
<i>Max</i>	15,3	42,6	93,7	99,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	72,3	16,8
<i>(Max – Min)</i>	15,1	42,5	93,3	98,7	95,2	86,8	77,3	51,2	77,8	97,2	71,5	16,0
СКО	2,4	9,6	28,6	32,8	30,5	26,3	18,0	14,0	20,8	26,4	16,7	2,9
Район №4												
Характеристика	Месяцы											
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
СРЕДНЕЕ	2,7	1,9	8,6	22,8	38,7	43,2	45,6	38,5	23,7	17,7	10,3	6,4
<i>Min</i>	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,2	1,1	2,4	1,1	0,2	0,2
<i>Max</i>	7,8	8,4	53,2	90,9	97,6	93,1	94,8	99,4	88,7	51,9	31,0	18,4
<i>(Max – Min)</i>	7,8	8,4	53,2	90,7	97,4	93,1	94,6	98,3	86,4	50,9	30,7	18,2
СКО	2,0	1,7	12,6	24,0	31,6	31,7	28,1	24,2	21,9	14,2	8,3	4,6
Район №5												
Характеристика	Месяцы											
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
СРЕДНЕЕ	72,9	80,3	82,4	82,9	82,9	85,3	86,6	87,6	86,8	88,7	83,7	72,7
<i>Min</i>	40,5	66,8	67,4	71,1	69,2	67,2	73,5	71,5	67,5	73,8	63,5	13,1
<i>Max</i>	89,3	95,9	93,9	99,4	99,6	98,7	99,7	100,0	98,9	99,1	96,4	91,0
<i>(Max – Min)</i>	48,9	29,1	26,5	28,3	30,3	31,5	26,2	28,5	31,3	25,4	32,9	77,9
СКО	11,1	6,7	6,3	6,4	8,0	8,8	6,3	7,2	7,9	7,0	8,8	15,7
Район №6												
Характеристика	Месяцы											
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
СРЕДНЕЕ	48,6	58,4	71,2	76,9	73,9	79,1	89,0	92,0	90,8	91,5	81,6	62,0
<i>Min</i>	2,0	17,8	23,7	26,4	12,8	26,7	42,3	46,5	47,6	53,1	28,8	15,1
<i>Max</i>	83,7	96,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	92,7
<i>(Max – Min)</i>	81,6	78,8	76,3	73,6	87,2	73,3	57,7	53,5	52,4	46,9	71,0	77,6
СКО	23,8	22,7	22,9	21,5	24,7	22,1	14,3	10,7	11,5	10,6	18,8	22,6

По данным таблицы 5 был построен график изменения средней ледовитости акваторий, омывающих архипелаг Шпицберген, для каждого месяца года (рисунок 15). Хорошо видно, что по средним за месяц значениям ледовитости для временного интервала 1979 – 2015 гг. в районах 1 – 4 наблюдается ярко выраженный сезонный ход, при этом размах уменьшается при перемещении от района №1 (северо-восток архипелага Шпицберген) к району №4 (западное и юго-западное побережье о-ва Западный Шпицберген). Для районов 5 и 6 сезонный ход ледовитости выражен в меньшей степени.

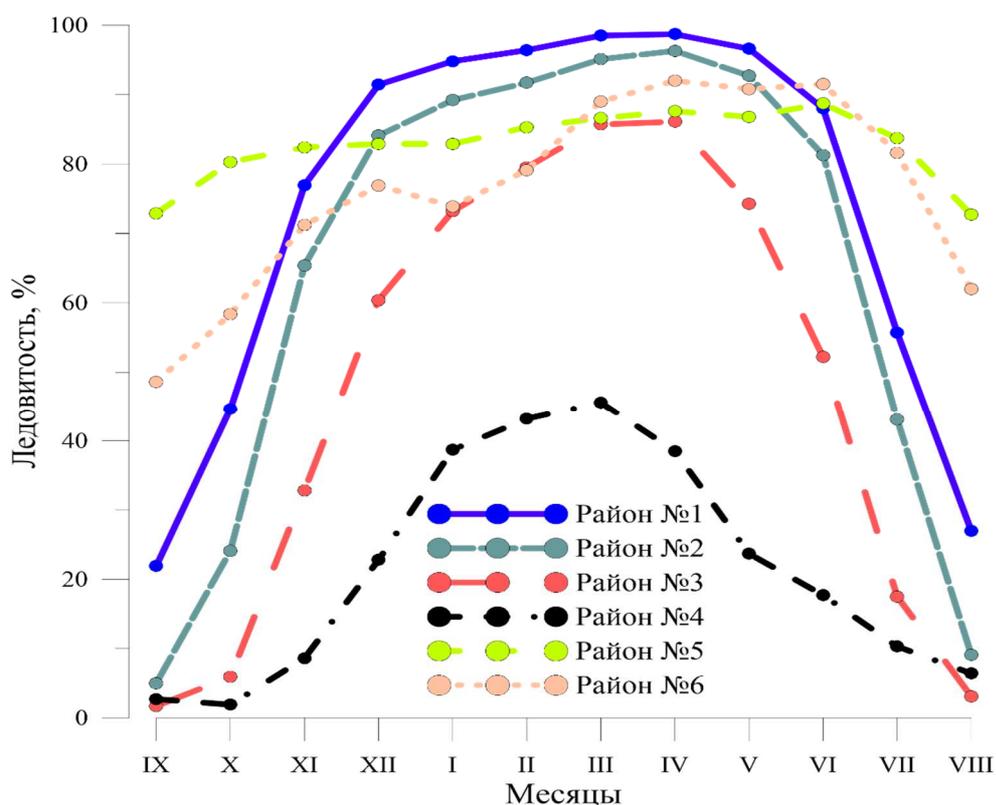


Рисунок 15 - Изменение общей ледовитости для 6 районов архипелага Шпицберген

Для более точной оценки временной изменчивости ледовых условий в данном секторе Арктики было выполнено сравнение полученных результатов для района Шпицбергена с результатами, представленными в вышеупомянутой работе (Жичкин, 2014), для района другого арктического архипелага (ЗФИ). Можно сделать следующие предварительные выводы. По средним за месяц значениям площади ледяного покрова район арх. ЗФИ является более ледовитым. Наименьшая изменчивость ледовитости в акватории ЗФИ приходится на холодный период года (ноябрь – апрель), стандартное отклонение изменяется от 0 до 2, а для арх. Шпицберген данным месяцам соответствует максимальная изменчивость, особенно периоду ноябрь – февраль (стандартное отклонение

изменяется от 15 до 21). Обратная картина наблюдается в теплый период года (август – сентябрь), в районе арх. Шпицберген разница максимального и минимального значений составляет 46 – 48 % (СКО равно 11 – 12) за 1979 – 2015 гг. для указанных месяцев, тогда как для акватории ЗФИ это величина равна 90 – 95 % (СКО равно 27).

Перейдём к рассмотрению общих особенностей ледовых условий рассматриваемых арктических архипелагов за период с 1979 по 2015 гг. Межгодовая изменчивость аномалий значений ледовитости имеет синхронный характер для обоих архипелагов. Особенно выделяются следующие моменты: ярко выраженное наличие двух фаз в климатической изменчивости ледовых условий в конце XX и начале XXI вв. (холодная фаза – с 1979 по 1998 гг., теплая фаза – с 1999 г. по настоящее время), переход от холодной фазы к тёплой произошел практически одновременно и имел резкий характер (для арх. Шпицберген с 1998 на 1999 гг., для ЗФИ с 1999 на 2000 гг.). На наш взгляд наличие указанных сходств в межгодовой изменчивости аномалий ледовитости для районов арх. Шпицберген и ЗФИ может указывать на наличие общего внешнего источника наблюдаемых изменений.

4.3 Температура трансформированных атлантических вод

Предваряя описание собственно изменчивости ТАВ во фьордах архипелага Шпицберген, кратко остановимся на общей классификации водных масс, омывающих архипелаг. По происхождению водные массы в данной части Северного Ледовитого океана классифицируются на следующие: Атлантическая водная масса, Полярная водная масса, Арктическая промежуточная водная масса, Арктическая поверхностная водная масса, донная (Гренландская, Норвежская, Канадская) водная масса (Swift, Aagaard, 1981).

Необходимо отметить, что в отличие от открытых акваторий, океанографические условия фьордов Западного Шпицбергена определяются сложным взаимодействием между водами Атлантического и Баренцевоморского происхождения, местными водами фьордов и материковым стоком. Поэтому для выделения водных масс фьордов Западного Шпицбергена была предложена региональная классификация (Cottier et al., 2005).

По данной классификации в рассматриваемом районе выделяют две основные водные массы внешнего происхождения – Атлантическую водную массу и Арктическую водную массу. К локальным (местным) водным массам относятся холодные и плотные воды зимнего происхождения, а также водная масса, формирующаяся в поверхностном слое фьордов в весенне-летний период. К перемешанным водным массам относится Трансформированная Атлантическая водная масса (ТАВ) (Павлов, 2011).

Как уже было сказано выше, одной из практических задач данной работы являлось получение количественных оценок долгопериодной изменчивости океанографических характеристик, а именно характеристик ТАВ в заливах острова Западный Шпицберген. Для анализа долгопериодной изменчивости термической структуры вод во фьордах архипелага Шпицберген, было отобрано 317 станций, выполненных в заливах: Ис-фьорд, Конгс-фьорд, Хорнсунн и Бельсунн (рис.16).

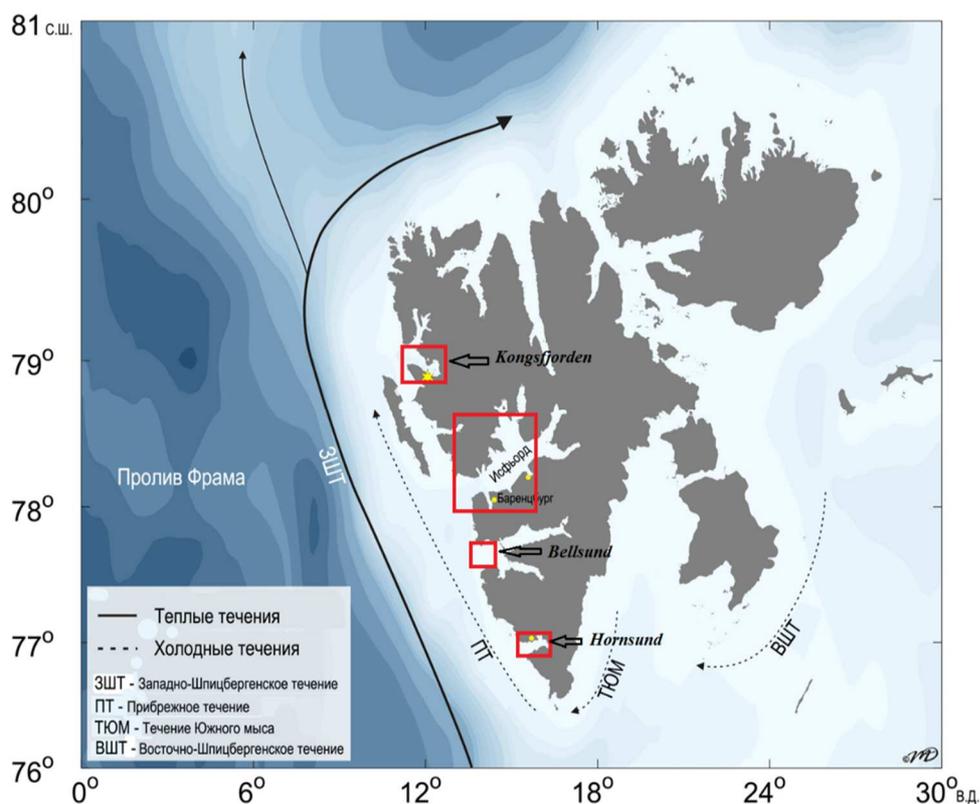


Рисунок 16 - Карта циркуляции морских течений в районе арх. Шпицберген (красным показаны фьорды, по которым были использованы данные из источников, указанных в главе 3, стр. 25)

Используемый нами временной ряд охватывает период с 1900 по 2012 гг. и является объединением наблюдений, выполненных в период «арктического лета», для 4 фьордов острова Западный Шпицберген (рис.16, выделены красными линиями). На рисунке 17 представлен график временной изменчивости среднегодовой температуры воды в слое ТАВ.

Временная изменчивость ТАВ во фьордах архипелага Шпицберген характеризуется следующими особенностями. Первичный анализ представленного временного ряда указывает на общее увеличение среднегодовой температуры в слое ТАВ для всего анализируемого периода. В терминах линейного тренда увеличение температуры воды составляет 0.15 градуса за десятилетие, отметим, что уравнение линейной регрессии является статистически значимым на уровне $P < 0.05$. В тоже время этот рост не был монотонным для всего периода наблюдений. Резкое повышение температуры наблюдалось с 1920 по 1940 год (хорошо известное первое «глобальное» потепление Арктики). Второй локальный максимум потепления приходится на период с 1980 по 2010 гг. Это период в научной литературе обозначается как, так называемое, «быстрое потепление Арктики»

(Polyakov et al., 2002). Абсолютный максимум среднегодовой температуры воды в слое ТАВ наблюдался в 2006 г. и составил 3.7 °С. Величина коэффициента детерминации составляет 0.37. Это говорит о том, что полученный линейный тренд описывает не более 37% общей дисперсии анализируемого временного ряда и, что, по-видимому, в первую очередь объясняется значительной межгодовой изменчивостью характеристик ТАВ.

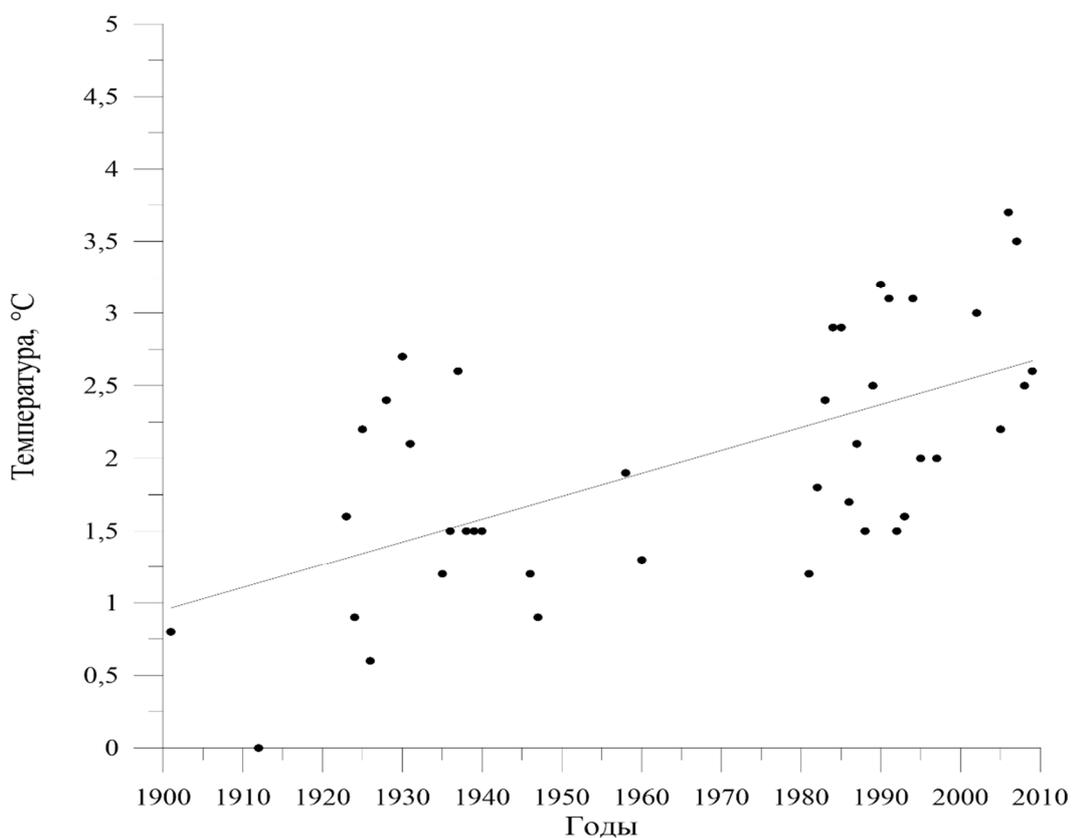


Рисунок 17 - Временная изменчивость средней температуры воды в слое ТАВ за период арктического лета в фьордах острова Западный Шпицберген, представленная в виде линейного тренда

В ходе анализа долгопериодной изменчивости характеристик ТАВ во фьордах острова Западный Шпицберген были рассчитаны аномалии средней температуры воды в слое распространения ТАВ. Результаты расчетов представлены на рисунке 18. Среднее многолетнее значение температуры ТАВ для всего временного ряда составило 1.9 °С. Из представленного на рисунке 12 графика, можно сделать следующие выводы. Во-первых, выделяются два периода с положительными аномалиями среднегодовой температуры воды в слое ТАВ. Первый период приходится на 1920 – 1940 гг., а второй на 1985 – 2010 гг. Во-вторых, в терминах отклонений от среднего «современное» потепление является более мощным. Максимальные значения отклонений за период «современного» потепления составили 1.8 и 1.6 градуса и наблюдались в 2006 и 2007 гг. соответственно.

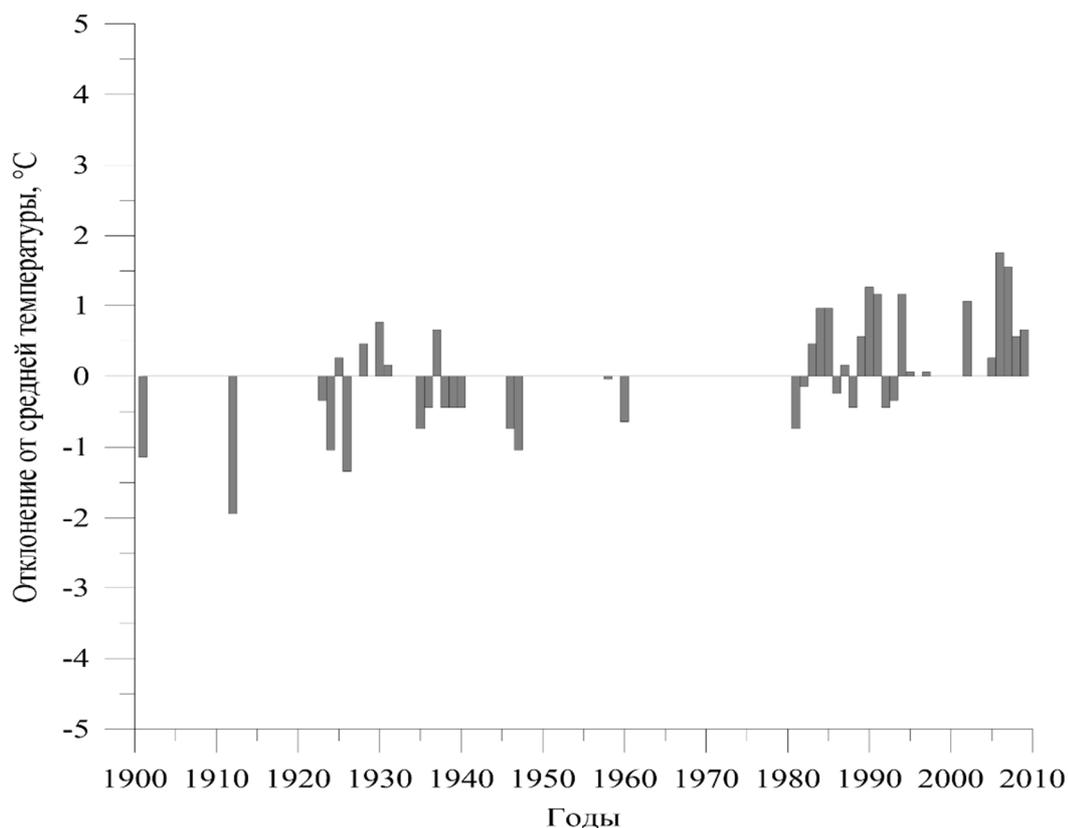


Рисунок 18 - Изменчивость аномалий средней температуры в слое ТАВ в фьордах острова Западный Шпицберген

Отдельно была рассмотрена скорость изменения температуры в слое атлантических вод для периода «современного» потепления. На рисунке 19 представлена изменчивость средней температуры воды в слое ТАВ «арктическим летом» для периода 1981 – 2009 гг. Величина коэффициента детерминации составляет 0,19. Следовательно, полученный линейный тренд описывает не более 19 % общей дисперсии анализируемого временного ряда. Несмотря на достаточно низкое значение коэффициента детерминации (0,19) полученный линейный тренд проходит проверку на статистическую значимость на уровне $P < 0,05$. Таким образом, можно сказать, что потепление, наблюдаемое с 1980 гг. прошлого столетия происходит со скоростью 0,3 градуса за десятилетие, что в 2 раза превышает значение для всего периода наблюдений – 0,15 градуса за десятилетие. Более подробный статистический анализ изменения температуры ТАВ для периода «первого» потепления не является возможным из-за отсутствия достаточного количества данных.

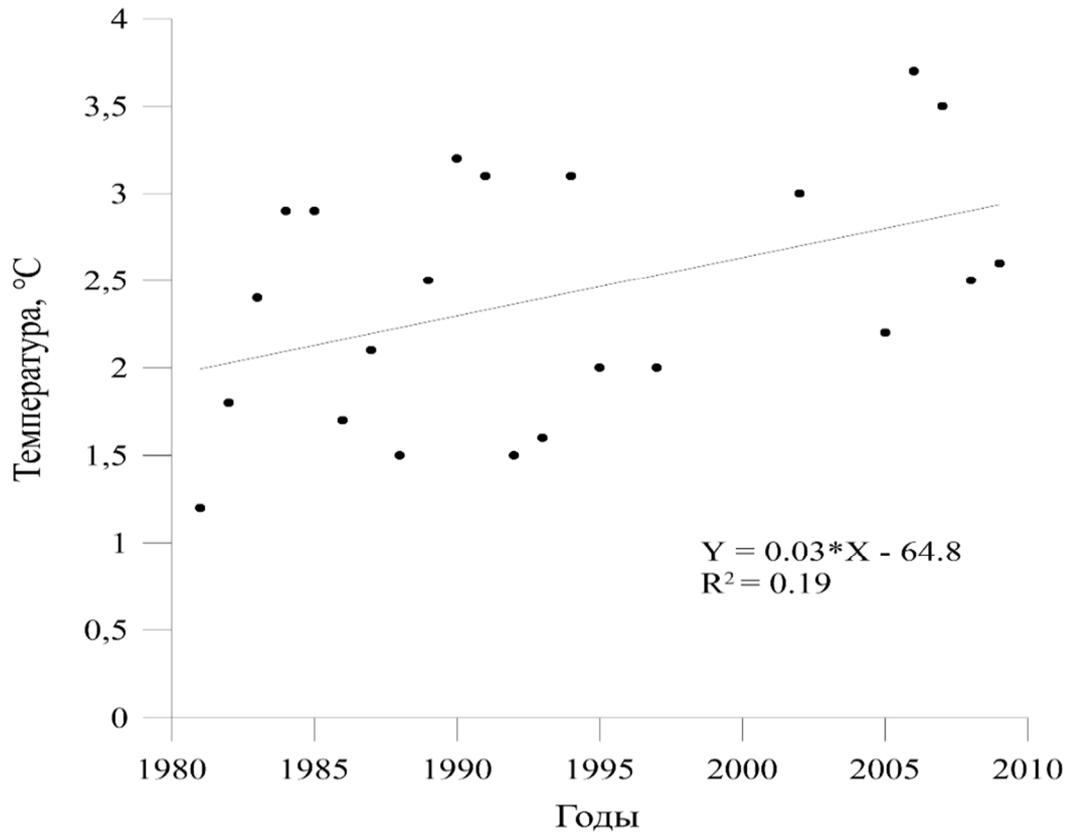


Рисунок 19 - Средняя температура в слое ТАВ арктическим летом (1981-2009 гг.)

Сравним средние значения температуры воды в слое ТАВ за весь период наблюдений и выделенные периоды положительных аномалий температуры воды. Для всего периода наблюдений (1901 – 2009 гг.) среднее значение составило 2,0 °С, в случае первого потепления (1923 – 1940 гг.) среднее значение несколько ниже 1,7 °С, а для современного потепления среднее значение выше чем для всего периода наблюдений и составляет 2,4 °С.

Глава 5. Сравнительный анализ временной изменчивости параметров океана, атмосферы и морского льда. Взаимосвязи в климатической системе архипелага Шпицберген

В ходе выполнения работы нами также была предпринята попытка провести сравнительный анализ многолетней изменчивости температуры воды в слое ТАВ и ПТВ в районе архипелага Шпицберген. Для осуществления анализа был использован метод, предложенный Алексеевым Г.В. (глава 3), напомним, что в основе метода лежит сравнение нормированных аномалий каких-либо характеристик. Под нормированными аномалиями понимается – отношение отклонения величины от среднего значения для каждого конкретного года к среднеквадратическому отклонению временного ряда данной характеристики (Алексеев и др., 2003). На рисунке 20 представлены результаты проделанных вычислений. В данном случае многолетняя изменчивость нормированных отклонений ПТВ вследствие сильной межгодовой изменчивости снова представлена в виде графиков, полученных при использовании фильтров 5-ти и 11-ти летнего скользящего среднего.

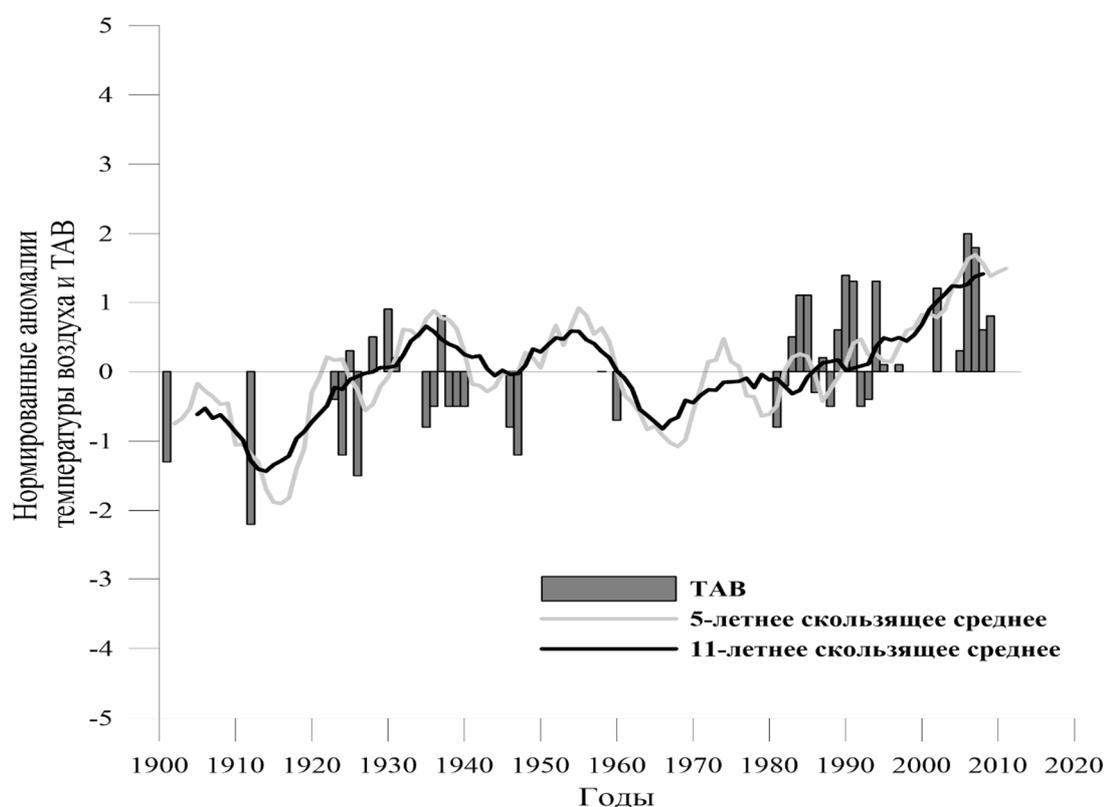


Рисунок 20 - Нормированные отклонения от средней температуры воздуха и температуры воды в слое ТАВ во фьордах Западного Шпицбергена (1900 – 2013 гг.)

Рассматривая представленные результаты, можно сказать, что долгопериодная изменчивость обеих величин имеет схожий временной ход. Несмотря на большие пропуски во временном ряду температуры воды в слое ТАВ, можно сравнить многолетнюю изменчивость указанных величин в период первого (1920 – 1940 гг.) и «современного» потеплений в Арктике. Из рисунка 15 видно, что в случае потепления 1920 – 1940 гг. положительные аномалии температуры воды наблюдаются в 1925 – 1930 гг., а положительные аномалии ПТВ смещены в 1930 – 1940 гг. Для современного потепления характерны значительные положительные нормированные отклонения температуры воды в слое ТАВ на протяжении всего периода с 1980 по 2010 гг. Временной ход ПТВ в виде 5-ти и 11-ти летнего скользящего среднего для данного периода показывает, что с 1980 по 1990 гг. существенных аномалий (ни положительных, ни отрицательных) не наблюдалось, а существенные нормированные аномалии температуры воздуха наблюдаются только с середины 1990-х гг.

Следует отметить, что наличие больших пропусков во временном ряду для среднегодовых значений температуры воды в слое ТАВ не позволяет достаточно точно судить о степени корреляции (взаимосвязи) между представленными характеристиками. Однако имеет место общая тенденция изменчивости, особенно для современного периода – это увеличение температуры воды в слое ТАВ и ПТВ. Очевидно можно предположить о существовании общего внешнего источника наблюдаемых изменений обеих величин. Вероятно, что это колебания общей энергии Солнца (солнечной активности), поступающей к планете Земля. Отметим, что данная гипотеза соответствует идеям В.Ю. Визе и многих современных исследователей (Гудкович и др., 2012; Визе, 1937; Матишов и др., 2014). Выявить признаки запаздывания одного процесса от другого по имеющимся данным затруднительно.

На рисунке 21 представлен график нормированных аномалий ледовитости района №4 и приземной температуры воздуха за период 1979 – 2015 гг. Как видно из представленного рисунка изменчивость рассматриваемых величин имеет разнонаправленный характер. Для периода 1979 – 1990 гг. характерно преобладание положительных значений нормированных аномалий ледовитости. Максимальные нормированные аномалии ледовитости наблюдались во временной интервал 1979 – 1984 гг. одновременно с отрицательными значениями нормированных аномалий ПТВ. В 90-х годах XX века наблюдались незначительные нормированные аномалии обеих величин. В последние 10 – 15 лет наблюдаются значительные положительные нормированные аномалии ПТВ и отрицательные значения аномалий ледовитости. Коэффициент

детерминации между рассматриваемыми характеристиками равен 0,64. В целом, полученные результаты соответствуют ранее представленным выводам.

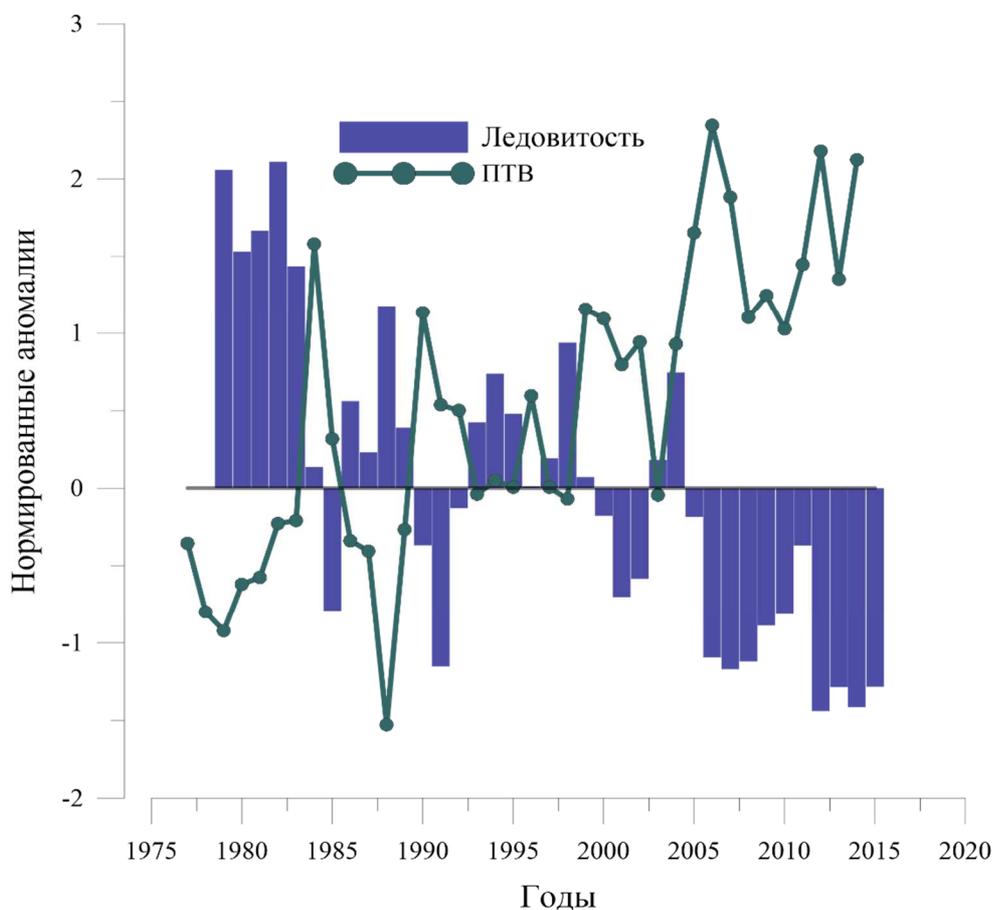


Рисунок 21 - Нормированные отклонения от средней температуры воздуха на станции Лонгйрбюэн и ледовитости района №4 (1979 – 2015 гг.)

В ходе выполнения исследования также был проведён сравнительный анализ многолетней изменчивости нормированных аномалий температуры воды в слое ТАВ и ледовитости района №4, наиболее сильно подверженного влиянию атлантических вод, для периода 1979 – 2015 гг. (рис. 22). Как и в рассмотренном выше случае сравнения нормированных отклонений ПТВ и ледовитости, изменчивость носит разнонаправленный характер, что соответствует фундаментальным представлениям о взаимосвязях в системе «океан – морской лёд». Наличие пропусков во временном ряду температуры воды в слое ТАВ осложняет определение признаков запаздывания в изменчивости рассматриваемых характеристик, но не смотря на это можно выделить основные закономерности. На фоне преобладания повышенных значений температуры воды в слое ТАВ в фьордах острова Западный Шпицберген на протяжении последних 30 – 35 лет наблюдается тенденция перехода от положительных значений аномалий ледовитости к отрицательным, что

наглядно представлено в виде графика 5-ти летнего скользящего среднего (зеленая линия). При этом в начале 1980-х наблюдаются значительные положительные аномалии ледовитости. Временной интервал с 1985 по 2005 гг. характерен переходами от положительных аномалий к отрицательным, как в случае ледовитости, так и температуры воды в слое ТАВ. С 2005 г. процесс имеет однонаправленный характер к повышению температуры воды и соответственно к уменьшению площади льда. Коэффициент детерминации между рассматриваемыми величинами равен 0,45.

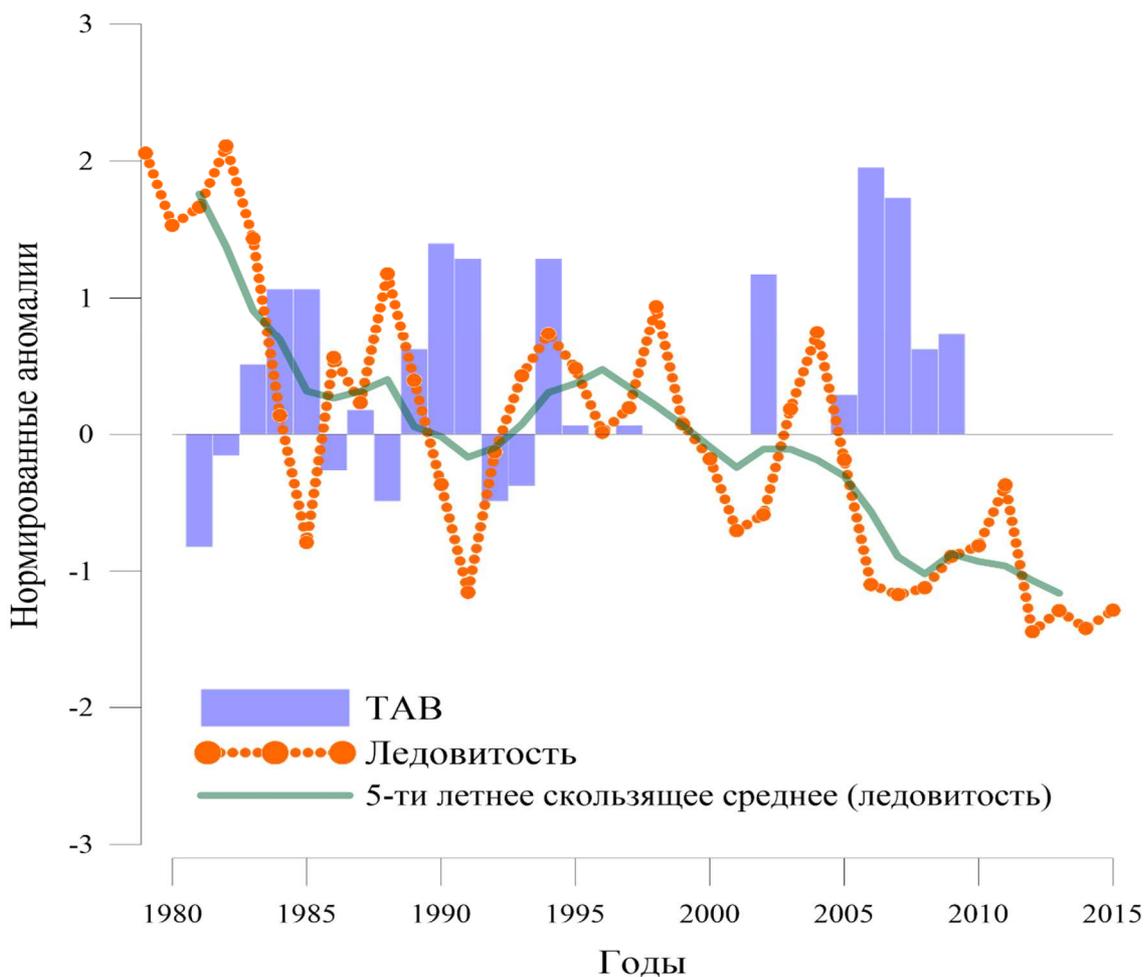


Рисунок 22 - Нормированные отклонения от средней температуры воды в слое ТАВ и ледовитости района №4 (1979 – 2015 гг.)

Для определения степени взаимосвязи между компонентами климатической системы были рассчитаны коэффициенты корреляции между ПТВ в районе архипелага Шпицберген и площадью ледяного покрова района №4 (таблица 4) для доступного периода наблюдений (1979 – 2014 гг.). Максимальные значения коэффициентов корреляции соответствуют зимним месяцам (декабрь, январь, февраль) и находятся в диапазоне -0,7/-

0,8, для наиболее теплых месяцев значения коэффициентов корреляции минимальны (-0,05/-0,34). Для средних за год значений коэффициент корреляции равен -0,78.

Поскольку к западу от арх. Шпицберген поступление льда обусловлено его дрейфом из северо-западной части Баренцева моря, было принято решение рассмотреть «со сдвигом» по месяцам влияние ледовитости (поступление большего или меньшего количества льда) на температурный режим в районе арх. Шпицберген (таблица 5). При анализе корреляционных связей между данными характеристиками был получен следующий предварительный вывод: максимальные значения коэффициентов корреляции наблюдаются при нулевом сдвиге во все месяцы, за исключением июля, сентября и октября. По мере увеличения сдвига связь убывает и становится статистически не значимой (красный подчеркнутый курсив).

Таблица 5. Коэффициенты корреляции: площадь ледяного покрова района №4 – ПТВ в районе арх. Шпицберген (1979 – 2014 гг.)

<i>ПТВ</i> Площадь льда	<i>Январь</i>	<i>Февраль</i>	<i>Март</i>	<i>Апрель</i>	<i>Май</i>	<i>Июнь</i>	<i>Июль</i>	<i>Август</i>	<i>Сентябрь</i>	<i>Октябрь</i>	<i>Ноябрь</i>	<i>Декабрь</i>
<i>Январь</i>	-0,7	-0,65	<i><u>-0,10</u></i>	<i><u>-0,14</u></i>	-0,40	-0,52	<i><u>-0,21</u></i>	-0,34	-0,39	<i><u>-0,19</u></i>	<i><u>-0,22</u></i>	<i><u>-0,28</u></i>
<i>Февраль</i>		-0,75	<i><u>-0,13</u></i>	<i><u>-0,18</u></i>	-0,52	-0,58	<i><u>-0,22</u></i>	-0,40	-0,42	<i><u>-0,16</u></i>	<i><u>-0,27</u></i>	-0,40
<i>Март</i>			-0,45	<i><u>-0,23</u></i>	-0,45	-0,57	<i><u>-0,15</u></i>	<i><u>-0,29</u></i>	-0,41	<i><u>-0,13</u></i>	<i><u>-0,25</u></i>	-0,44
<i>Апрель</i>				-0,39	-0,57	-0,73	<i><u>-0,20</u></i>	-0,48	-0,37	-0,33	<i><u>-0,22</u></i>	-0,44
<i>Май</i>					-0,59	-0,76	<i><u>-0,23</u></i>	-0,48	-0,39	<i><u>-0,15</u></i>	<i><u>-0,21</u></i>	<i><u>-0,32</u></i>
<i>Июнь</i>						-0,64	<i><u>-0,13</u></i>	-0,37	-0,52	<i><u>-0,17</u></i>	<i><u>0,00</u></i>	<i><u>-0,24</u></i>
<i>Июль</i>							<i><u>-0,10</u></i>	<i><u>-0,31</u></i>	-0,38	<i><u>-0,15</u></i>	<i><u>0,00</u></i>	<i><u>-0,25</u></i>
<i>Август</i>								-0,34	-0,33	<i><u>-0,16</u></i>	<i><u>-0,13</u></i>	-0,39
<i>Сентябрь</i>									<i><u>-0,05</u></i>	<i><u>-0,15</u></i>	<i><u>-0,13</u></i>	<i><u>-0,29</u></i>
<i>Октябрь</i>										<i><u>-0,29</u></i>	<i><u>-0,13</u></i>	-0,37
<i>Ноябрь</i>											-0,55	-0,53
<i>Декабрь</i>												-0,78

Примечание: красным подчеркнутым курсивом выделены значения статистически незначимые на уровне $P < 0,05$.

Глава 6. Анализ континентальности и аномальности климата в районе острова Западный Шпицберген по данным наблюдений за приземной температурой воздуха во второй половине XX века

Учитывая, что ПТВ является одной из наиболее подходящих характеристик для оценки изменений климата в региональном масштабе, а также учитывая, что режим ПТВ определяется взаимодействием в системе «океан-атмосфера-морской лёд», было принято решение провести анализ пространственного и временного изменения ПТВ для района острова Западный Шпицберген по имеющимся данным. Для указанного анализа использовались временные ряды 6 метеостанций: Ис-фьорд (радио), Баренцбург, Лонгйир (аэропорт), Пирамида, Нью-Олесунн, Хорнсунн. При этом первые 4 станции расположены в акватории залива Ис-фьорд по оси запад – восток в указанном порядке (см. рис. 7).

В таблице 6 представлены средние значения разницы между максимальной и минимальной температурой воздуха в течение года по среднемесячным значениям (размах) по имеющимся данным наблюдений. Как видно из таблицы 5 для 4-х станций, расположенных в акватории залива Ис-фьорд, наблюдается усиление континентальности климата по мере продвижения в восточном направлении, что является вполне закономерным. Так в районе станции «Ис-фьорд - Радио», расположенной в проливе Фрама на входе в залив Ис-фьорд, размах ПТВ составляет 18,8 °С. При продвижении вглубь залива данная величина увеличивается и достигает 25,0 °С для станции «Пирамида», расположенной в северо-восточной части фьорда. Станция «Хорнсунн» находится в южной части о-ва Западный Шпицберген. Она расположена, как и станция «Ис-фьорд - Радио» на входе во фьорд (пролив Фрама). Значения размаха колебаний для данного пункта составляет 18,7 °С. Станция «Нью-Олесунн» расположена в северной части о-ва Западный Шпицберген, но по своему местоположению, находясь на достаточном удалении от входа во фьорд со стороны пролива Фрама, больше соответствует станции «Баренцбург», что также подтверждается и средней величиной размаха среднемесячных температур – 21,1 °С.

Таблица 6. Средние значения разницы между максимальной и минимальной температурой воздуха в течение года по среднемесячным значениям

Станция	Размах колебаний, °С (период наблюдений)
Ис-фьорд - Радио	18,8 (1935 – 1940, 1947 – 2014 гг.)
Баренцбург	21,8 (1932 – 1940, 1947 – 2014 гг.)
Лонгйир (аэропорт)	24,4 (1899 – 2014 гг.)
Пирамида	25,0 (1940, 1948 – 2014 гг.)

Хорнсунн	18,7 (1935 – 1940, 1947 – 2014 гг.)
Нью-Олесунн	21,1 (1935 – 1940, 1947 – 2014 гг.)

Так как имеющиеся данные обеспечивают достаточно полное описание изменений ПТВ для района острова Западный Шпицберген, начиная со второй половины XX в., мы провели предварительный анализ аномальности климата для данного района в пространственном отношении за рассматриваемый интервал времени. Для данного исследования были выбраны два индекса, описывающие аномальность климата. Первый из них – индекс аномальности климата (*CAI* – Climate Anomaly Index), который определяется как Евклидово расстояние между точкой описывающей текущее состояние климата, и точкой, представляющей состояние среднего значения по времени (норму) (Груза, Ранькова, 2012, с.55):

$$CAI = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta T_i}{\sigma_i} \right)^2 \right]}, \quad (1)$$

где: n – число станций, i – порядковый номер станции, ΔT_i – аномалия температуры, σ – среднеквадратическое отклонение (СКО).

Чем больше *CAI*, тем дальше удалена точка, представляющая мгновенное состояние климата, от «центра» точек-состояний климата. Расчёт положения центра для данного индекса наиболее часто осуществляется по всему доступному периоду наблюдений (Груза, Ранькова, 2012, с.55).

В качестве второй интегральной характеристики, описывающей аномальность температурного поля для района острова Западный Шпицберген, был выбран параметр Токарева (K_T), позволяющий учитывать не только величину аномалии, но и её знак (Токарев, 1983):

$$K_T = \frac{1}{N+M} \cdot \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta T_{+i}}{\sigma_i} \right)^2 - \sum_{i=1}^M \left(\frac{\Delta T_{-i}}{\sigma_i} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где: N – количество точек с положительной аномалией ΔT_{+i} ; M – количество точек с отрицательной аномалией ΔT_{-i} ; i – порядковый номер станции.

Исходя из представленных выше определений рассматриваемых индексов для каждого года на каждой станции рассчитывались отклонения температуры (ΔT_i), как разность между фактической температурой и климатической нормой (средней за 1947 – 2014 гг.) и СКО (y_i). Затем полученные величины аномалий нормировались на СКО для получения более однородной сопоставимой картины. На рисунках 23 и 24 представлен временной ход рассчитанных значений CAI и K_T .

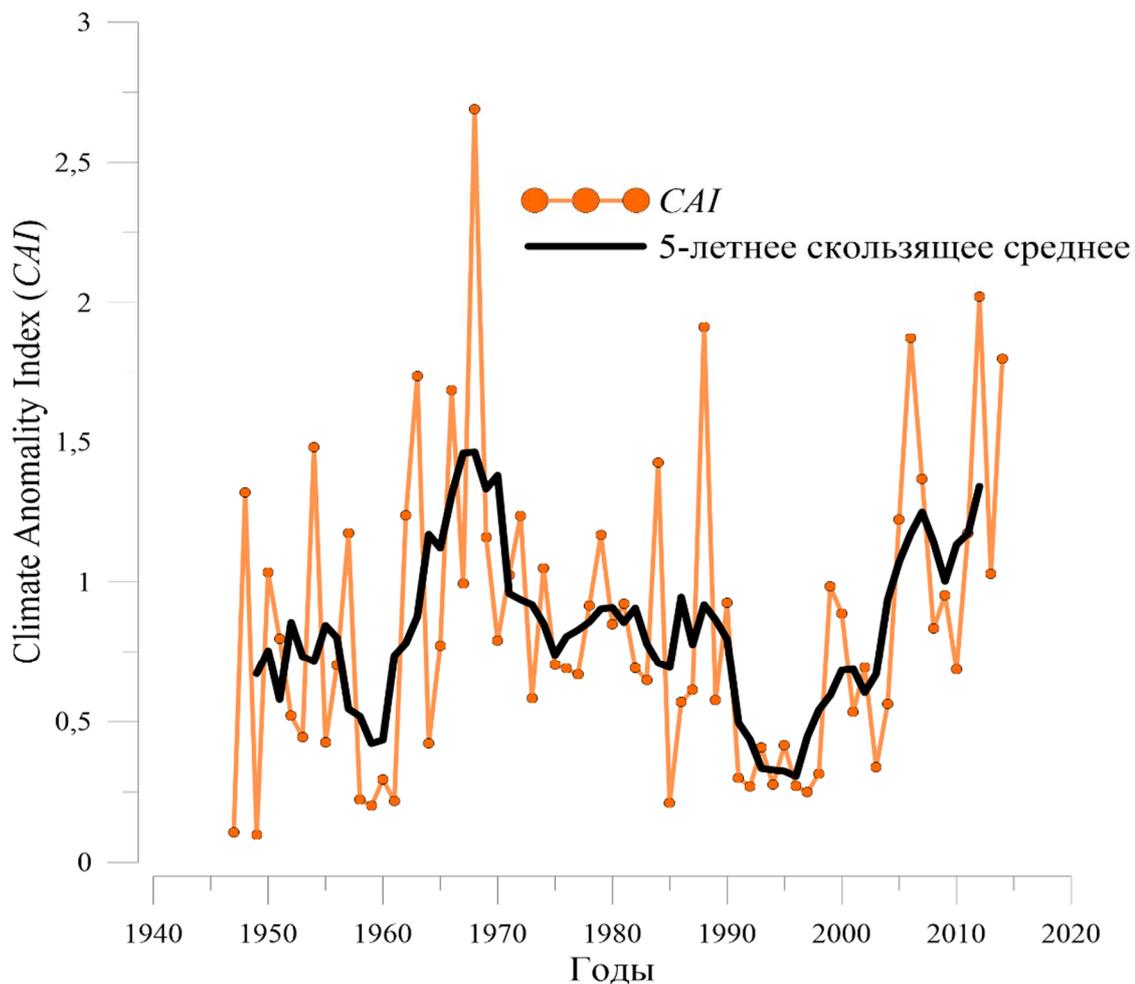


Рисунок 23 - Временной ход индекса аномальности климата (CAI) в районе острова Западный Шпицберген за период 1947 – 2014 гг.

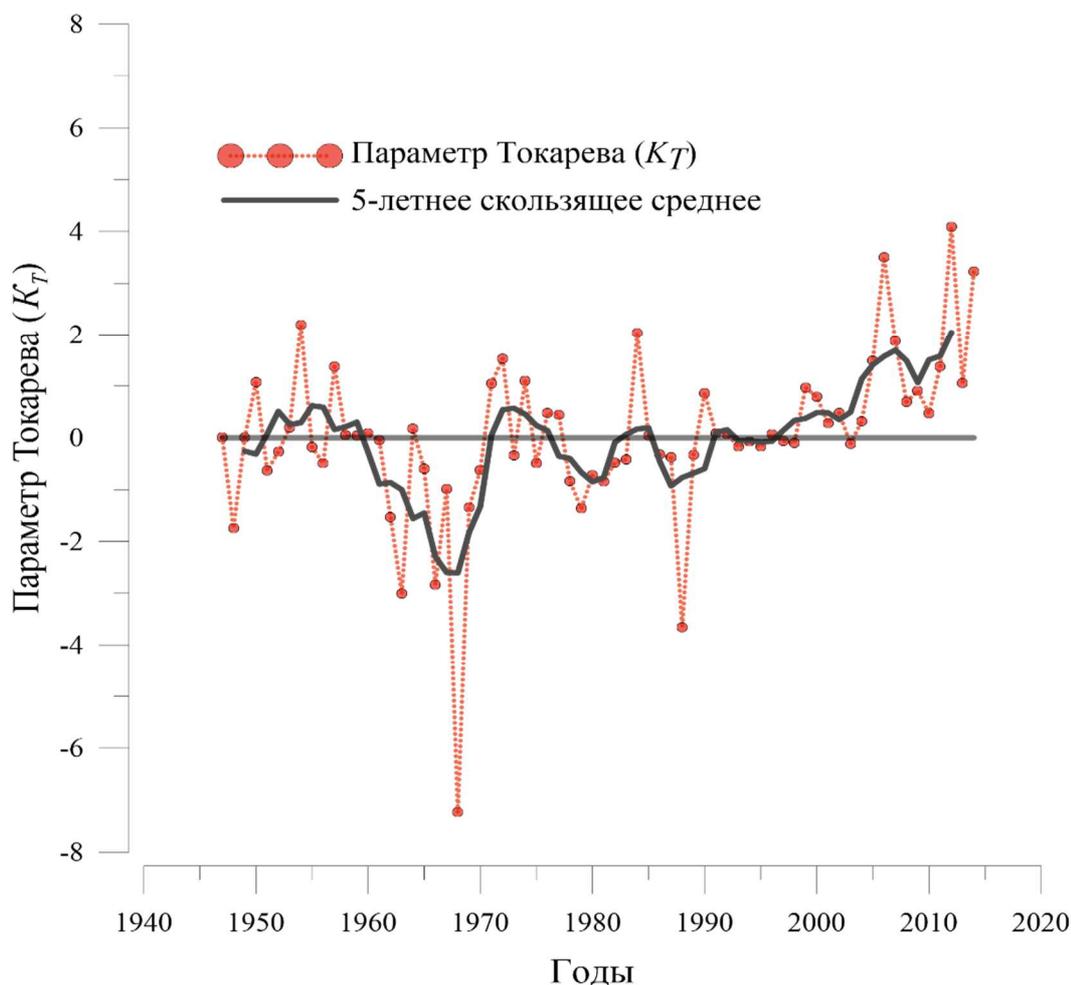


Рисунок 24 - Временной ход параметра Токарева (K_T) в районе острова Западный Шпицберген за период 1947 – 2014 гг.

Для более точного выделения периодов с ярко выраженной аномальностью в терминах ПТВ использовался фильтр скользящего среднего с шагом осреднения 5 лет. Как видно из представленных рисунков максимальная аномальность климата в районе архипелага Шпицберген соответствует двум временным интервалам 1960 – 1970 гг., 2005 – 2014 гг. Для первого временного интервала (1960 – 1970 гг.) наблюдается аномальность со знаком «-», при этом максимальное значение индексов CAI и K_T приходится на 1968 г. и является наибольшей аномалией для всего исследуемого периода. Второй период (2005 – 2014 гг.) характеризуется положительными значениями аномальности климата в районе острова Западный Шпицберген, максимальное значение индексов CAI и K_T для данного периода наблюдалось в 2012 г. Также хотелось бы отметить, что для района архипелага Шпицберген относительно принятой климатической нормы в 1990 – 2000 гг. не наблюдалось значительных аномалий ПТВ ни с отрицательным, ни с положительным знаком, аналогичный характер изменчивости характерен и для периода 1950 – 1960 гг.

Общее число лет, когда $CAI > 1$ (т.е. рассчитанная средняя величина аномалии превышает значение СКО) для района Шпицбергена равно 22. Что составляет 32% от всего временного ряда. При этом в 1968 и 2012 г. зафиксированы случаи, когда $CAI > 2$ (3% от всего временного ряда).

Для временного ряда CAI также можно выделить аномальные годы, рассчитав отклонения относительно среднего значения и СКО, а затем по полученным данным выделить крупные и очень крупные (экстремали) аномалии. Так экстремальная аномальность ($> 2\sigma$) температурного поля в районе острова Западный Шпицберген зафиксирована в 1968, 1988, 2012 гг., необходимо отметить, что значение аномалии в 1968 г. превышает СКО в 3 раза.

Заключение

Выполненная работа посвящена анализу долгопериодной изменчивости температуры ТАВ в фьордах острова Западный Шпицберген, анализу многолетней изменчивости ПТВ в районе арх. Шпицберген, анализу временной изменчивости ледовых условий в акваториях омывающих архипелаг, а также включает в себя сравнительный анализа временной изменчивости указанных гидрометеорологических величин.

В ходе выполнения магистерской диссертационной работы были получены следующие результаты:

1) В изучаемых фьордах Западного Шпицбергена (Ис-фьорд, Конгс-фьорд, Хорнсунн, Бельсунн) наблюдается увеличение среднегодовой температуры воды в слое ТАВ для анализируемого периода. В терминах линейного тренда увеличение температуры воды составляет 0,15 градуса за десятилетие.

2) Для многолетней изменчивости температуры ТАВ характерно наличие двух пиков потепления, первый из которых приходится на 20 – 30-е года 20 века, а второй наблюдался в 1980 – 2010 гг. На основе, полученных в ходе работы количественных оценок среднегодовой температуры ТАВ, можно сделать вывод, что современное потепление (1980 – 2010 гг.) в слое ТАВ во фьордах острова Западный Шпицберген является более мощным по сравнению с первым потеплением 1920 – 1940 гг.

3) Выявлено повышение ПТВ на 2,9 градуса по оценкам коэффициента линейной регрессии за весь период инструментальных наблюдений. Для всего периода наблюдений наиболее значительное увеличение температуры воздуха наблюдается в феврале, марте, апреле и ноябре. В эти месяцы увеличение ПТВ составило 4 – 5 градусов за столетие.

4) Рост ПТВ в период первого потепления составил 0,17 градус/год, в период современного потепления – 0,11 градус/год. Анализ скорости изменения ПТВ для отдельных месяцев года показал, что наиболее интенсивный рост ПТВ приходится на февраль в период первого потепления – 0,45 градуса за год. Данная величина в 2,5 раза больше, чем представленная выше для среднегодовых значений для данного периода. Только в мае и августе для периода современного потепления характерны более высокие значения скорости изменения ПТВ, чем для периода первого потепления;

5) На основе проанализированных данных, сделан вывод, что в водах, омывающих архипелаг Шпицберген, в течение последних 35 лет наблюдается устойчивая тенденция к смягчению ледовых условий, как в среднем за год, так и для отдельных сезонов. Сокращение площади ледяного покрова в терминах линейного тренда по среднегодовым значениям составляет 2,6 тыс. км² в год.

6) Ярко выражено наличие двух периодов в климатической изменчивости ледовых условий в конце XX начале XXI веков для района архипелага Шпицберген. Временной интервал с 1979 по 1998 гг. характеризуется преобладанием положительных аномалий ледовитости, а с 1999 г. по настоящее время наблюдаются крупные отрицательные аномалии;

7) Получены количественные показатели нормированных аномалий температуры воды в слое ТАВ, температуры воздуха в районе арх. Шпицберген и площади ледяного покрова для акваторий омывающих архипелаг;

8) Сравнительный анализ временного хода нормированных аномалий температуры воды в слое ТАВ и ПТВ в районе арх. Шпицберген показал наличие практически синхронной изменчивости указанных характеристик. По нашему мнению причиной данного явления может считаться общий внешний источник;

9) Анализ аномальности климата в районе архипелага Шпицберген по данным ПТВ с использованием индексов CAI и K_T позволил выделить временные интервалы, которые характеризуются наибольшими отклонениями от климатической нормы (1947 – 2014 гг.). Максимальная аномальность климата в районе архипелага Шпицберген соответствует двум временным интервалам 1960 – 1970 гг., 2005 – 2014 гг. Для первого временного интервала (1960 – 1970 гг.) наблюдается аномальность со знаком «-» с максимумом в 1968 г., второй период (2005 – 2014 гг.) определяется положительными значениями аномальности климата в районе острова Западный Шпицберген, максимальное значение индексов CAI и K_T для данного периода наблюдалось в 2012 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2015. Том 1. С. 11 – 26
2. Алексеев Г.В. Арктическое измерение глобального потепления // *Лед и снег*, 2014. № 2. С. 53–68.
3. Алексеев Г.В. Исследования изменения климата Арктики в XX столетии // СПб.: «Гидрометеиздат». Тр. ААНИИ, 2003. Т. 446. С. 6 -19.
4. Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Пнюшков А.В., Балакин А.А. Изменения климата в морской Арктике в начале XXI века // *Проблемы Арктики и Антарктики*, 2010б г. №3(86). С. 22 – 34
5. Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Анискина О.Г., Харланенкова Н.Е. Естественные и антропогенные составляющие изменений приповерхностной температуры воздуха в Арктике в XX веке по данным наблюдений и моделирования // СПб.: «Гидрометеиздат». Тр. ААНИИ, 2003. Т. 446. С. 22-30
6. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // *Проблемы Арктики и Антарктики*, 2015. №1(103). С. 32 – 41
7. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Климатические изменения в Арктике и северной полярной области // *Проблемы Арктики и Антарктики*, 2010а г. №1(84). С. 67 – 80
8. Башкирцев В.С., Машнич Г.П. Переменность Солнца и Климат Земли // *Солнечно-земная физика*, 2004. №6. С. 135 – 137.
9. Визе В. Ю. Причины потепления Арктики // *Сов. Арктика*, 1937. №1. С. 10 -19.
10. Витинский Ю. И., Копецкий М., Куклин Г. В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986, 295 с.
11. Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А. Математические методы построения прогнозов. М.: Радио и связь, 1997, 112 с.
12. Груза Г.В. Исследование климата и его изменений // *Изменение климата*, 2012. №31. С. 5-8.
13. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012, 194 с.
14. Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. Что происходит с климатом Земли? // *ООС: изменение климата*, 2012. №5. С. 34 – 41.
15. Гудкович З.М., Ковалев Е.Г. О некоторых механизмах циклических изменений климата в Арктике и Антарктике // *Океанология*, 2002. Т. 42. №6. С. 1 – 7.

16. 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.
17. Жичкин А.П. Особенности межгодовых и сезонных колебаний аномалий ледовитости Баренцева моря // Метеорология и Гидрология, 2015. №5. С. 52 – 62
18. Жичкин А.П. Ледовые условия в районе архипелага Земля Франца-Иосифа // Труды Кольского научного центра, Океанология. Выпуск 2, 2014. №4. С. 82 – 89.
19. Зубов Н.Н. Льды Арктики. М.: Издательство Главсевморпути, 1945, 359 с.
20. Иванов Б.В., Журавский Д.М. Ледовые условия в заливе Грён-фьорд (Шпицберген) в течение 1974–2008 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики, 2010. № 2 (85). С. 27–31.
21. Иванов Б.В., Павлов А.К., Андреев О.М., Священников П.Н. Исследования снежно-ледяного покрова залива Грён-фьорд (арх. Шпицберген): исторические данные, натурные исследования, моделирование // Проблемы Арктики и Антарктики, 2012. №2 (92). С. 43 – 54.
22. Ионов В.В. Потепление в Арктике в 1920 – 1940-х и 1990-х годах: сходства и отличия // Комплексные исследования природы Шпицбергена. – Вып. 6. Апатиты: Изд. КНЦ РАН. 2006. С. 26 - 29.
23. Кораблев А.А., А.В. Пнюшков, А.В. Смирнов. Создание океанографической базы данных для мониторинга климата в Северо-Европейском бассейне Арктики // СПб.: «Гидрометеиздат». Труды ААНИИ, 2007, т. 447, С. 85–108.
24. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Жичкин А.П., Моисеев Д.В. Климат морей Западной Арктики в начале ХХІ века // Известия РАН. Серия географическая, 2011. № 3. С. 17 – 32.
25. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Моисеев Д.В., Жичкин А.П. О природе крупных гидрометеорологических аномалий в арктических и южных морях России. // Известия РАН. Серия географическая, 2014. №1 С. 36 – 46.
26. Меншуткин В.В. Искусство моделирования. Изд-во: Петрозаводск – Санкт-Петербург. 2010. 416 с.
27. Монин А. С. Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969, 184 с.
28. Никифоров Е.Г., Шпайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Ленинград: Гидрометеиздат, 1980, 269 с.
29. Павлов А.К. Диссертация на тему: «Формирование термического режима вод заливов Западного Шпицбергена», 2011.

30. Павлов А.К., Б.В. Иванов, Д.М. Журавский, В. Тверберг. Потепление в заливах Западного Шпицбергена кратковременное явление или устойчивая тенденция // Проблемы Арктики и Антарктики, 2010. №3.С. 1 – 13.
31. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. Т1. М.: Мир, 1984, 398 с.
32. Печуров Л.В. Шпицберген. М.: Мысль, 1983, 150 с.
33. Прист Э. Р. Солнечная магнитогидродинамика. М.: Мир, 1985, 592 с.
34. Рожков В.А. Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. Кн. 2. СПб.: Гидрометеоздат, 2002, 780 с.
35. Тимохов Л.А., Ашик И.М., Карпий В.Ю., Кассенс Х., Кириллов С.А., Поляков И.В., Соколов В.Т., Фролов И.Е., Чернявская Е.А. Экстремальные изменения температуры и солености воды арктического поверхностного слоя в 2007 – 2009 гг. // Океанография и морской лед, 2011. С. 118 – 137.
36. Тисленко Д.И., Иванов Б.В. Долгопериодная изменчивость температуры атлантических вод во фьордах острова Западный Шпицберген в период первого (1920 – 1940 гг.) и современного потепления в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики, 2015. №2 (104).С. 93 – 101.
37. Токарев В.Г. Об изменчивости и аномальности средней сезонной температуры воздуха в первую половину лета в Западной Сибири // Тр. ЗапСибНИИ, 1983. Вып. 59. С. 20-26.
38. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб.: «Наука», Научные исследования в Арктике, 2007. Т. 2. 136 с.
39. Фролов И. Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Изменения климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин // Проблемы Арктики и Антарктики, 2010а. №2.С. 52 – 61.
40. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Изменения климата – результат действия естественных причин // Экологический Вестник России. 2010б. № 1. С. 49–54.
41. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1: Изменения климата. М.: РОСГИДРОМЕТ, 2008. – 227с.
42. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов / Под общей редакцией Б.А. Крутских. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 56 с.
43. Alekseev G.V., Danilov A.I., Kattsov V.M., Kuz'mina S.I., Ivanov N.E. Changes in the Climate and Sea Ice of the Northern Hemisphere in the 20th and 21st Centuries from Data of

- Observations and Modeling// *Izvestiya Atmospheric and oceanic physics*. Vol. 45. No. 6. 2009. P. 675 – 686.
44. Alekseev G.V., Zakharov V., Bulatov L., Polyakov I., Colony R.L., Johnson M., Carmack E., Jones P., Ivanov V. and McLaughlin F. Changes of Atlantic water temperature in the Arctic Basin in the 20th century// Submitted to *Deep-sea Research*. 2003.
45. Alekseev G.V., Zakharov V.F., R.L. Colony, M. Johnson. Warming of the Arctic in 1920s-1930s and 1980s-1990s / Second Wadaty Conference On Global Change and Polar Climate. March 7 – 9, 2001, Epochal Tsukuba, International Congress Center, Tsukuba Science City, Japan // *Extend Abstract*, 2001. P.22-25.
46. Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming // *Journal of Climate*, vol. 23, American Meteorological Society, 2010. P. 3888 – 3906.
47. Coachman L.K., Aagaard K. Physical oceanography of the Arctic and Sub-Arctic Seas // Herman Y. (Ed.) *Marine Geology and Oceanography of the Arctic Ocean*. - New York, Springer, 1974. P72
48. Cottier F.R., Tverberg V., Inall M.E., Svendsen H., Nilsen F., Griffiths C. Water mass modification in an Arctic fjord through cross-shelf exchange // *J. Geophysical Research*, 2005. vol. 110. –: C12005.
49. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolanitsky V.M. Climate change in Eurasian Arctic Shelf seas // *Praxing publishing ltd.*, Chichester, UK, 2009. 164 p.
50. Ganachaud A. & Wunsch C. Improved estimates of global ocean circulation, heat transport and mixing from hydrographic data // *Nature*, 2000. Vol. 408. P. 453 – 456.
51. Haas C., Pfaffling A., Hendricks S., Rabenstein L., Etienne J.-L., Rigor I. Reduced ice thickness in Arctic Transpolar Drift favors rapid ice retreat // *Geophysical Research Letters*, 2008. Volume 35. Issue 17.
52. Hanzlick D. J. The West Spitsbergen Current: Transport, forcing and variability // Ph. D. thesis. University of Washington, Seattle, 1993. 127 p.
53. IPCC. Climate change: the IPCC third assessment. 2001.
54. Lyubushin A.A. and Klyashtorin L.B. Short Term Global DT Prediction using (60-70) Years Periodicity. // *Energy and Enviroment*, vol. 23, №1, 2012. P. 2 – 12.
55. Mahoney A. R., Barry R. G., Smolyanitsky V., Fetterern F. Observed sea ice extent in the Russian Arctic, 1933–2006 // *Journal of geophysical*. VOL. 113. 2008. C11005
56. Nansen F. The Norwegian North Polar Expedition 1893-1896. Scientific results. – Christiania, Jacob Dybward, 1900. Vol. 1-6. 597 p.

57. Nordli Ø., Przybylak R., Ogilvie A.E.J., Isaksen K. Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898 – 2012 // *Polar Research*, 2014.
58. Nordli Ø., Przybylak R., Ogilvie A.E.J., Isaksen K. Long-term climate variations on Svalbard using early instrumental observations // *Polar Research*. 2014. Vol. 33. <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v33.21349>
59. Nordli O. and Isaksen K. Long-term climate variations on Svalbard using early instrumental observations // *Geophysical Research*, 2010. vol. 12.
60. Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U., Colony R., Johnson M. A., Karklin V. P., Makshtas A.P., Walsh D. and Yulin A.V. Observationally based assessment of polar amplification of global warming // *Geophys. Res. Lett.*, 2002. 29. P.1878.
61. Polyakov I.V., Alexeev V.A., Belchansky G.I., Dmitrienko I.A., Ivanov V.V., Kirillov S.A., Korablev A.A., Steele M., Timokhov L.A., Yashayaev I. Arctic ocean Freshwater changes over Past 100 Years and their Causes. // *Journal of Climate*, vol. 21, American Meteorological Society, 2008. P. 364 – 384.
62. Polyakov I. V, Alekseev G. V., Timokhov L. A., Bhatt U. S., Colony R. L., Simmons H. L., Walsh D., Walsh J. E., and Zakharov V. F. Variability of the Intermediate Atlantic Water of the Arctic Ocean over the Last 100 Years // *J. of Climate*, 2004. vol. 17. P. 4485-4497.
63. Polyakov I. V, Bekryaev R.V., Alekseev G. V., Bhatt U. S., Colony R. L., M.A. Johnson and A.P. Makshtas. Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 1875 – 2010 // *Journal of Climate*, American Meteorological Society, 2003. vol. 16. P. 2067 – 2077.
64. Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kolstrom T.H. Cyclicity of Solar Activity and Relation to Climate Variability // *Solar Physics*, 2004. vol. 224. P. 455 – 463.
65. Renner A. H.H., Gerland S., Haas C., Spreen G., Beckers J.F., Hansen E., Nicolaus M., Goodwin H Evidence of Arctic sea ice thinning from direct observations // *Geophysical Research Letters*, 2014. Volume 41, Issue 14. P. 5029–5036
66. Rudels B., Meyer R., Fahrbach E., Ivanov V.V., Østerhus S., Quadfasel D., Schauer U., Tverberg V., and Woodgate R.A. Water mass distribution in Fram Strait and over the Yermak Plateau in summer 1997 // *Annales Geophysicae*, 2000. vol. 18. P. 687-705.
67. Serezze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // *Global and planetary change*, vol. 77, 2011. P. 85–96.
68. Swift J.H., and Aagaard K. Seasonal transitions and water mass formation in the Iceland and Greenland Seas, 1981.
69. Tislenko D.I., Ivanov B.V. Long-period variability of Atlantic water in the Svalbard fjords in conditions of modern warming // *Czech Polar Reports*, 2015. N 2. P. 134 – 142

70. Walsh J.E., W.L. Chapman, T.L. Shy. Recent decrease of sea level pressure in the central Arctic //Journal of Climate, 1996. vol. 9. P. 480 – 486.

Ресурсы сети Интернет:

1. <http://wdc.aari.ru/>- региональные 7-дневные ледовые карты из открытого архива Мирового центра данных по морскому льду ААНИИ
2. <ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/psi-concentration/> - ежедневная информация об общей сплоченности
3. ftp://sidacs.colorado.edu/DATASETS/nsidc0051_gsfc_nasateam_seaice/final-gsfc/ - ежедневные данные об оценках общей сплоченности по алгоритму NASATEAM