

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (РГГМУ)

На правах рукописи
УДК [551.515.1:551.513.22](215-13+215-17)

Топтунова Ольга Николаевна

Анализ циклонических режимов северного и южного полушарий

Специальность: 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
к. ф.-м. н., доцент
каф. метеорологических прогнозов

О. Г. Анискина

Санкт-Петербург 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.	
	Введение 4
1	Методы идентификации циклонов, исследования их основных характеристик и дальних связей в атмосфере 14
1.1	Используемые данные и методики анализа исследования основных характеристик циклонов 34
1.2	Метод идентификации циклонов 39
1.3	Метод определения геометрических характеристик циклонов 46
1.4	Метод оценки глубины циклонов и индекса циклонической активности.... 48
1.5	Исследование рядов на скрытые циклы колебаний 51
2	Характеристики циклонов на основе реанализа NCEP/NCAR. 54
2.1	Анализ количества циклонов..... 54
2.2	Исследование глубины циклонов по данным реанализа NCEP/NCAR 63
2.3	Исследование площади циклонов по данным реанализа NCEP/NCAR..... 67
2.4	Исследование объема переносимого циклонами приземного воздуха на основе данных реанализа NCEP/NCAR..... 69
2.5	Исследование циклонической активности на основе данных реанализа NCEP/NCAR..... 70
2.6	Связь Северо-Атлантического колебания и характеристик циклонов северного полушария..... 78
2.7	Связь Южного колебания (Эль-Ниньо/Ла-Нинья) и характеристик циклонов северного и южного полушарий 88
2.8	Связь между Атлантической мульти-декадной осцилляцией и характеристик циклонов северного полушарий..... 98
2.9	Исследование характеристик циклонов на скрытые колебания..... 104
3	Анализ характеристик циклонических режимов на основе данных реанализа ERA-INTERIM..... 114

3.1 Анализ количества циклонов.....	114
3.2 Исследование глубины циклонов на основе результатов реанализа ERA-INTERIM.....	119
3.3 Исследование площади циклонов на основе результатов реанализа ERA-INTERIM.....	122
3.4 Исследование объема переносимого циклонами приземного воздуха на основе результатов реанализа ERA-INTERIM	123
3.5 Исследование циклонической активности на основе данных реанализа ERA-INTERIM.....	125
3.6 Связь Северо-Атлантического колебания и характеристик циклонов северного полушария.....	131
3.7 Связь Южного колебания (Эль-Ниньо/Ла-Нинья) и характеристик циклонических режимов северного и южного полушария	134
4 Сравнение количества и характеристик «экстремальных» циклонов по результатам идентификации в реанализе NCEP/NCAR и ERA-INTERIM.....	139
4.1 Анализ количества «экстремальных» циклонов	139
4.2 Исследование глубины «экстремальных» циклонов	142
Заключение	147
Список использованных источников.....	151

ВВЕДЕНИЕ

Общей циркуляцией атмосферы определяется распределение всех метеорологических элементов. Важнейшими звеньями общей циркуляции атмосферы являются циклоны. С ними связаны резкие изменения атмосферного давления, облачности, температуры, сильные осадки, усиления скорости ветра, наводнения и пр. Изменения в числе и характеристиках циклонов влекут за собой перераспределение всех метеорологических величин.

Изучение изменения циклонической активности очень важно для полноценного понимания крупномасштабной динамики атмосферы, для исследования долгопериодной изменчивости происходящих в ней процессов, в вопросах изучения изменений климата, для повышения качества долгосрочных прогнозов погоды, а также для диагностики происходящих региональных и глобальных изменений. Циклоны играют исключительно важную роль в формировании атмосферных процессов, они отвечают за транспортировку тепла и влаги, кроме того, тесно связаны с опасными явлениями погоды. Например, более 80 % экстремальных волн с высотой более 14 м в Северной Атлантике вызывается взрывными циклонами, скорость углубления которых превышает 1 гПа в час [1]. Еще одним примером могут служить наводнения в Невской губе Финского залива. Причиной их также является атмосферная циклоническая деятельность, происходящая на границе раздела воздушных масс арктических и умеренных широт [2]. Серия циклонов 5-7 декабря 2015 года, образовавшихся над Северной Атлантикой, вызвала очень сильный ветер, сильные осадки в Европе и над европейской частью России. Позднее, быстро смещающиеся на восток циклоны с теплым и влажным воздухом из Атлантики, принесли с собой штормовую погоду на значительной территории континента. Кроме всего прочего естественно, что прохождение таких циклонов влечет за собою огромный экономический ущерб.

В последние десятилетия Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC) отметила значительные изменения глобальной температуры, с которыми связаны изменения в количестве, интенсивности, размерах и в других характеристиках циклонических вихрей [3]. В некоторых работах авторы связывают глобальное потепление с интенсификацией циклонической циркуляции [4].

Климат Земли менялся на протяжении всей ее геологической истории. Изменение тепло- и влагооборота, а также атмосферной циркуляции некоторые исследователи связывают с колебаниями эксцентриситета земной орбиты, наклоном оси вращения Земли к плоскости эклиптики и замедлением скорости вращения Земли [5]. Причину изменения циркуляции, а соответственно и климата многие ученые видят в изменении интенсивности Гольфстрима [6-16], некоторые из них предполагают, что циркуляция меняется из-за антропогенного изменения газового и аэрозольного состава атмосферы [17]. Однако отношение к этим утверждениям неоднозначно. Хотя парниковые газы уменьшают амплитуду колебаний температуры у земной поверхности, сокращая ночное выхолаживание, они уменьшают и дневной нагрев. Что касается морских течений, то они, безусловно, влияют на мезомасштабные и даже на отдельные макросиноптические процессы, но воздействие их на атмосферную циркуляцию северного полушария и уж тем более всего земного шара в целом весьма спорно. Также немало исследователей видят ответ вопрос об изменении циркуляции, а соответственно и климата, во влиянии процессов, происходящих на Солнце и в межпланетной среде [18-25].

Традиционно же изменения циркуляции связывают с Северо-Тихоокеанским, Северо-Атлантическим, Арктическим колебаниями и Южной осцилляцией (Эль-Ниньо/Ла-Нинья), причину изменения которых многие исследователи также находят не только в антропогенном влиянии, но и в солнечно-земных связях [26]. Атмосферную циркуляцию, важнейшими элементами которой являются циклоны, принято характеризовать через центры

действия атмосферы – устойчивые во времени и пространстве области высокого или низкого давления. Центры действия делятся на постоянные и сезонные, однако все они напрямую связаны с климатическими вариациями полей метеорологических величин.

Сегодня нет однозначного ответа на вопрос о реальных механизмах формирования изменений в атмосферной циркуляции. Всё потому что, несмотря на огромную научную значимость вышеупомянутых исследовательских работ, во всех них для анализа изменчивости циркуляции использовались осреднённые климатические поля. Такой подход не позволяет понять природу происходящих физических процессов, поскольку реальные механизмы формируются на синоптическом масштабе. Именно поэтому в современных реалиях более перспективным представляется рассмотреть происходящие атмосферные процессы более детально. Значит необходимо рассматривать именно циклоны и антициклоны, которые определяют атмосферную циркуляцию и формируют реальную погоду и климат. Циклоны возникают в результате перехода относительно устойчивого состояния атмосферы в неустойчивое. Чаще всего их возникновение связано с атмосферными фронтами, но существуют также термические и орографические циклоны. Термические циклоны представляют собой малоподвижные низкие циклоны, развивающиеся под непосредственным воздействием теплой подстилающей поверхности, орографические же циклоны, как правило, развиваются с подветренной стороны горного препятствия [27]. Все это – и неравномерный нагрев и сдвиг ветра – приводит к неравномерному распределению давления и, как следствие, к формированию атмосферного вихря. Однако в силу короткого времени жизни (термические) и стационарности (орографические) циклоны не оказывают влияния на глобальную циркуляцию, а влияют на локальную погоду и климат. Фронтальные же зоны являются зонами наибольших запасов потенциальной энергии, которая и переходит в кинетическую энергию вихревой циркуляции.

Из-за неравномерного нагрева воздушных масс во фронтальной зоне, а также из-за бароклинной неустойчивости появляется неравномерность распределения давления, которая, в свою очередь, является необходимым условием для формирования атмосферных вихрей разных масштабов. В виду того, что циклоны возникают как возмущения на фронте между двумя основными воздушными течениями, именно прохождение циклонов влечет за собой резкое изменение погодных условий. Благодаря перемещению циклонов формируется обмен теплом и влагой между широтами.

В данной работе основное внимание уделяется анализу повторяемости циклонов и изучению их характеристик в северном и южном полушариях Земли. В виду того, что все большее количество исследователей интересуются причинами изменений климата, вопрос о важности изучения климатологической изменчивости атмосферных процессов особенно актуален. В контексте изучения изменений климата задача исследования долгопериодной изменчивости циклонической активности является актуальной и приоритетной.

Актуальность данного исследования заключается в важности оценки изменения количества циклонов, их характеристик и роли в циркуляции атмосферы. Однако такая задача выполнима только при комплексном подходе, с использованием современных данных и методик, лишь тогда результаты исследования можно использовать в дальнейших научных исследованиях и на практике.

Целью диссертационной работы является исследование циклонических режимов, анализ и оценка изменений их характеристик, а также выявление общих закономерностей происходящих климатических изменений.

Для достижения поставленных целей в диссертационной работе сформулированы и решены следующие задачи:

– Выбор физически и математически обоснованного метода численной идентификации циклонов, его адаптация к анализируемым данным с разным пространственным разрешением и верификация;

– Разработка программного обеспечения численной идентификации циклонов и расчёта их статистических характеристик в разных регионах земного шара и при разных параметрах идентификации;

– Оценка влияния горизонтального разрешения анализируемых полей метеорологических величин на качество идентификации циклонов и оценку их характеристик;

– Исследование характеристик циклонических режимов и их временной изменчивости в северном и южном полушарии земного шара;

– Выявление связей изменчивости характеристик циклонических режимов и характеристик крупномасштабной циркуляции атмосферы.

Предметом исследования является количественная оценка циклонических режимов атмосферы северного и южного полушарий и анализ её изменчивости в последние десятилетия.

Объектом исследования является атмосфера южного и северного полушария, а также земного шара в целом.

Методологическая, теоретическая и эмпирическая база исследований. В качестве методов исследований привлекались методы математической статистики (исследование случайных последовательностей, корреляционный и регрессионный анализ, критерии значимости), вейвлет-анализ и спектральный анализ. Для идентификации циклонов использован метод сеток и методы аппроксимации производных. Для идентификации циклонов был использован метод, разработанный в Лаборатории Взаимодействия Океана и Атмосферы и Мониторинга Климатических Изменений Института Океанологии РАН. Исследованы и сопоставлены результаты реанализа NCEP/NCAR с 1948 по 2014 года и реанализа ERA-INTERIM за период с 1979 по 2015 года.

Научная новизна. В процессе анализа циркуляционных режимов атмосферы, анализа результатов идентификации циклонов и расчёта их характеристик, проведения сравнения с существующими данными были получены следующие новые научные результаты:

1. Качество идентификации циклонов сильно зависит от пороговых значений давления в схеме идентификации и эта зависимость возрастает при увеличении горизонтального разрешения анализируемых данных. При идентификации циклонов по полю приземного давления с низким разрешением уменьшение порогового значения приводит к значительной потере информации о циклонах. При высоком пороговом значении определяется много ложбин в приэкваториальной зоне, которые имеют отличную от внетропических циклонов природу.

2. На основе современных точных данных получены новые количественные оценки временной изменчивости характеристик циклонических режимов в различных областях земного шара. Выявлено увеличение количества циклонических ситуаций в обоих полушариях и увеличение глубины циклонов в северном полушарии. Выявлено увеличение количества глубоких циклонов в северном полушарии.

3. Установлены частотно-временные характеристики изменчивости количества циклонических ситуаций в зависимости от территории и времени года. Выявлены несколько видов колебаний во временных характеристиках циклонов и объяснена связь этих колебаний с внешними и внутренними параметрами атмосферы.

4. Исследована динамика изменчивости количества и характеристик циклонов в северном и южном полушариях и проведён их сравнительный анализ. Показано, что динамика изменений характеристик циклонических режимов южного и северного полушария отличается. При этом со второй половины 1970-х годов в атмосфере происходят процессы, вызвавшие значительные изменения в циркуляционных режимах южного и северного полушарий.

5. Количественно оценены связи различных характеристик циклонических режимов, в том числе количество циклонов, их интенсивность и размеры с интенсивностью крупномасштабных режимов циркуляции.

Выявлена значительная связь циркуляционных режимов южного и северного полушарий с Северо-Атлантическим колебанием, Атлантическим мульти-декадным колебанием, Южным колебанием (Эль-Ниньо/Ла-Нинья) и с чандлеровским колебанием.

Научная и практическая значимость результатов:

1. Работа может служить методологической базой для проведения исследования режимности циклонов в любом районе земного шара.

2. Полученные характеристики могут стать основой для составления долгосрочных прогнозов, а также для климатических описаний различных регионов и земного шара в целом.

3. Полученные результаты могут быть использованы для климатических прогнозов.

4. Полученные результаты могут быть использованы при проведении исследований на основе данных реанализов NCEP/NCAR и ERA-INTERIM с разным пространственным разрешением.

5. Результаты могут использоваться для диагностики тенденций региональных и глобальных изменений и для принятия управленческих решений в различных областях административной деятельности.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования временной структуры изменчивости циклонических режимов в южном и северном полушарии

2. Результаты экспериментальных сравнений численной идентификации циклонов по полю давления на основе реанализов NCEP/NCAR и ERA-INTERIM. Сеточные поля с грубым разрешением позволяют получать значимые оценки временных характеристик и исследовать их связь с основными атмосферными процессами.

3. Оценки многолетней изменчивости количества и характеристик циклонических режимов в северном и южном полушариях. Выявлена связь

количества и характеристик циклонических режимов с глобальным потеплением последних десятилетий.

4. Проанализированная связь изменений характеристик циклонов с основными циклоническими колебаниями в атмосфере. Выявлена связь циклонических режимов с Атлантическим мульти-декадным колебанием, Северо-Атлантическим колебанием, Южным колебанием, чандлеровским колебанием и антропогенным форсингом.

Обоснованность и достоверность результатов. Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается строгой математической постановкой задачи, а также современностью и большим объемом используемых данных метеорологических полей давления, доступных из реанализа. Кроме того, полученные результаты не противоречивы существующим представлениям об общей циркуляции и климатологической изменчивости процессов, происходящих в атмосфере.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту положения основаны на самостоятельно полученных результатах. Личный вклад автора заключается в постановке целей и формулировке задач исследований, обосновании выбора теоретических и расчетных методов решения поставленных задач, анализе полученных данных и их интерпретации. Автор адаптировал метод идентификации к имеющимся данным и сделал расчёты по всему земному шару. Кроме того, автор подготовил материалы выступлений и публикаций, сформулировал выводы и заключения по работе.

Апробация работы. Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались:

– на сессиях Ученого Совета и межкафедральных семинарах Российского государственного гидрометеорологического университета;

– на международной научной конференции «Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях меняющегося климата» с докладом на тему: «Исследование климатических

особенностей в изменении количества и интенсивности внетропических циклонов», Белорусский государственный университет (БГУ), г. Минск (Беларусь), 5 – 8 мая 2015;

– в международной летней школе 4th Summer School on Data Assimilation and its applications in Oceanography, Hydrology, Risk & Safety and Reservoir Engineering, г. Брашов, Румыния, 20 – 30 июля 2015;

– на международной научной конференции «II International Scientific and Practical Conference «Science and Education - Our Future» с докладом на тему: «Cyclone regime in the Northern and Southern Hemisphere», г. Аджман, Объединённые Арабские Эмираты, 22 – 23 ноября 2015;

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Во введении обоснована актуальность исследования внетропических циклонов, сформулированы цели и задачи работы, теоретическая новизна и практическая значимость, приведены выносимые на защиту положения и результаты, а также изложена структура диссертации.

В первой главе раскрыта актуальность исследования, дан обзор существующих методов идентификации циклонов, раскрыто общее состояние исследуемого вопроса и имеющиеся на данный момент результаты. Здесь же описывается выбранный метод идентификации, его модификация для исследования, описаны используемые для анализа данные. Во второй главе приведены результаты исследования, полученные на основе реанализа NCEP/NCAR, в третьей – на основе реанализа ERA- INTERIM, в четвертой приведены результаты для «экстремальных» циклонов, полученные с привлечением обоих реанализов. В заключении сформулированы основные выводы по проделанной работе. Объем работы составляет 166 страниц, в том числе 72 рисунков и 8 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 129 наименований.

Основные публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 4 научные работы, в том числе 2 публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертационных исследований:

1. Топтунова О.Н., Анискина О.Г. Идентификация циклонов по результатам реанализа // Ученые записки РГГМУ.– 2014.–№ 37.–С.59 – 66.

2. Топтунова О.Н., Анискина О.Г. Изменения циклонических режимов северного и южного полушарий в условиях меняющегося климата // Научный журнал КубГАУ.– 2015.–№ 114

Публикации в других изданиях:

3. Топтунова О.Н. Исследование климатических особенностей в изменении количества и интенсивности внетропических циклонов // Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата: материалы Международной научной конференции, г. Минск, 5-8 мая 2015 г. – 2015.–С.107 – 108.

4. Toptunova O., Aniskina O. Cyclone regime in the Northern and Southern Hemisphere // International Scientific and Practical Conference “WORLD SCIENCE” (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Science and Education - Our Future (November 22-23, 2015, Ajman, UAE)"). - 2015. - 4(4), Vol.1. - pp..74 – 78.

1 Методы идентификации циклонов, исследования их основных характеристик и дальних связей в атмосфере

Изменение режимов циклонической активности в средних широтах ведет к перераспределению всех метеорологических параметров на территории земного шара, а также изменению глобальной температуры. Результаты различных исследований, посвященных данному вопросу, существенно различаются. Причины различий – в отличающихся анализируемых данных и различных методах идентификации. Первой задачей данного исследования был выбор способа идентификации барических депрессий. Для идентификации циклонов существует два принципиально разных подхода: идентификация в поле вихря скорости и идентификация в поле давления. Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки. Например, поле завихренности не искажается зональным потоком в силу того, что имеет более мелкие горизонтальные масштабы. Это позволяет идентифицировать циклон раньше, нежели при идентификации его по полю давления. Кроме того, в поле завихренности можно идентифицировать относительно мелкие короткоживущие образования, которые не получают дальнейшего развития и не прослеживаются в поле давления. Но в таком подходе существует и огромный минус: поля завихренности являются очень «шумными» и не каждая область положительного значения вихря скорости связана с циклоном [28].

Вот почему чаще циклон идентифицируют как локальный минимум в поле давления. К тому же с полями давления проще работать, нежели с полями завихренности, так как они более гладкие.

Проблема идентификации циклонов и антициклонов возникла с появлением первых карт погоды. Для составления прогноза в оперативной практической работе синоптик всегда должен прогнозировать траекторию перемещения того или иного барического образования, что, очевидно, невозможно без его идентификации. Первые синоптические карты появились в

середине XIX века, тогда же начали исследовать и сами циклоны (например, [15]). Основные пути большинства или, по крайней мере, значительного количества циклонов также анализировались еще в XIX веке. Особенно известны две карты таких основных путей: Ван-Бебера (для Европы) и М.А. Рыкачева (для Европы и европейской части территории России) [29]. Однако для более детального, систематического, а главное, объективного анализа потребовалось огромное количество времени. Невозможность детального исследования была связана, в первую очередь, с редкой сетью станций, а также с нерегулярностью наблюдений и их небольшой временной продолжительностью.

Для изучения характеристик синоптических процессов требуются глобальные поля метеорологических величин весьма высокого разрешения. Во-первых, с учетом того, что характерное расстояние между двумя соседними циклонами у земли составляет 1-4 тыс. км, то для их разделения пространственное разрешение данных наблюдений в средних и высоких широтах должно составить несколько градусов.

Первые глобальные данные стали доступны лишь с появлением гидродинамических моделей атмосферы второго поколения в 70-е годы XX века. В виду того, что параметризации в моделях постоянно обновлялись, а разрешение улучшалось, данные были неоднородны во времени, а потому малопригодны для всестороннего анализа. Необходимые для анализа динамически согласованные поля метеорологических величин стали доступны исследователям только в начале 90-х годов с появлением результатов первых реанализов. Под последним понимаются динамически согласованные поля метеорологических данных в узлах регулярной сетки за истекшие годы, начиная с середины XX века, полученные на основе долговременного диагноза атмосферы с помощью фиксированных конфигурации гидродинамических моделей атмосферной циркуляции и систем усвоения результатов наблюдений. В отличие от систем оперативного прогнозирования процедура реанализа

производится с одной версией системы усвоения данных и, следовательно, нет изменений в методе и данные однородные.

Вместе с эволюцией базы данных развивались и совершенствовались и методы их обработки. Так, традиционно долгопериодная изменчивость атмосферы оценивалась с помощью полосовой фильтрации временных рядов приземного давления или геопотенциала [30-36]. Такой подход очень удобен и эффективен, однако не позволяет точно оценить характеристики статистических распределений. Не смотря на то, что полосовая фильтрация дает лишь грубую оценку, в силу своей вычислительной дешевизны она остается основным инструментом для получения количественных характеристик. Полосовая фильтрация основана на предположении о том, что поле давления устойчиво во времени и пространстве, а потому пригодно для всестороннего анализа. В методе используется полосовой фильтр, который пропускает только частоты, находящиеся в заданной полосе. Временной ряд $x(t)$, меняющийся в частотном диапазоне $[-\infty, +\infty]$, с помощью фильтра $M[\varphi_1, \varphi_2]$, где φ_1 и φ_2 – частоты в Гц, преобразуется во временной ряд $x'(t)$, меняющийся в частотном диапазоне $[\varphi_1, \varphi_2]$.

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t)dt \Rightarrow M[\varphi_1, \varphi_2] \Rightarrow \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} x'(t)dt \quad (1.1)$$

Изменчивость в диапазоне $[\varphi_1, \varphi_2]$ характеризуется величиной среднеквадратичного отклонения, рассчитанной для ряда $x'(t)$.

$$\sigma[x'(t)] = \sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)} \quad (1.2)$$

Метод полосовой фильтрации позволил получить многие характеристики циклонов, а также оценить интенсивность синоптических процессов [29-36].

Главным минусом этого метода является проблема определения эффективного интервала фильтрации. Этот интервал должен адекватно характеризовать синоптические процессы, не включая при этом изменчивость, связанную с мезомасштабными явлениями. Чаще всего выбирают интервал фильтрации от 2 до 6 суток [31,37,38,39], но некоторые исследователи используют интервал от 2 до 8 суток [30,34,40]. Стоит отметить, что эффективный интервал для одного района может быть малоэффективен для другого. Работы многих исследователей продемонстрировали, что в зависимости от интервала фильтрации, результаты могут различаться [29,30,36,42]. Однако, не смотря на этот недостаток, из-за своей относительной простоты полосовая фильтрация была и остается одним из основных инструментов анализа.

Еще одним широко применяемым методом оценки климатической изменчивости синоптических процессов является метод оценки частот повторяемости минимумов давления. Метод позволяет находить центры циклонов с давлением ниже заданного значения. Он представляет собой промежуточный этап между полосовой фильтрацией и идентификацией циклонов. В силу своей простоты и вычислительной дешевизны метод широко используется на практике [41-43]. Недостатком такого подхода является то, что циклоны могут иметь несколько точек с давлением ниже заданного. Кроме того, циклон может доходить до заданной глубины несколько раз – регенерировать.

Наиболее современным и эффективным методом оценки синоптических образований и их изменчивости является трекинг (от английского слова «tracking») [44]. Под этой процедурой понимают непосредственную идентификацию циклона, чей образ обычно связывается с координатами центра и размерами. Трекинг, будучи на первый взгляд очень простой процедурой, на практике порождает большое количество неопределенностей и для больших массивов данных является задачей, требующей или большого времени или значительных вычислительных ресурсов. Изначально трекинг

начинался с визуального анализа карт погоды синоптиком. Сегодня это можно сделать численными методами, которые априори более объективны. Однако использование различных методов приводит к существенно различающимся результатам. Процедуры трекинга крайне чувствительны к особенностям используемых данных и их пространственно-временному разрешению. Кроме того, неопределенности связаны с методиками идентификации.

Практическая реализация процедуры трекинга очень важна, так как решение этой задачи позволит исследователям строить более обоснованные суждения о климатологической активности циклонов и ее изменениях. В последние годы активно развиваются различные схемы идентификации [45-57]. В виду возросшего интереса со стороны международного сообщества к этому вопросу, в 2009 году был открыт международный проект IMILAST (Intercomparison of Mid Latitude Storm Diagnostics [58], задача которого заключалась в сравнении методов идентификации внетропических циклонов [59].

Рассмотрим наиболее часто применяемые сегодня методы идентификации циклонов.

Одним из самых простых является метод оценки локальных минимумов. Суть метода заключается в том, что находятся минимумы в поле давления, имеющие значение ниже некоторого заданного априори. Такой метод идентификации применялся многими исследователями. Различались они лишь выбором порогового значения. Например, в работах Чинке (Schinke) [42] это пороговое значение соответствует 990 гПа, Ламберта (Lambert) – 970 гПа [41], в работах Дрониа (Dronia), Стейна и Хэнса (Stein, Hense) – 950 гПа [43,60]. Идентификация циклонов таким способом проста и удобна, однако в методе не учтен тот факт, что циклоны могут доходить до заданной глубины несколько раз. Кроме того, барические депрессии могут иметь несколько точек с давлением ниже заданной величины [28]. Еще один существенный минус метода состоит в том, что он не позволяет вычислить индивидуальные

характеристики циклонов, а лишь даёт возможность посчитать общее количество локальных минимумов в поле давления.

В подавляющем большинстве схем центр циклона идентифицируется как область пониженного давления или максимум завихренности. Для определения границ барической депрессии чаще всего используют градиент давления $\frac{\partial P}{\partial s}$, где s – расстояние от центра циклона.

В схеме [45,61] центр циклона определяется как точка с минимальным значением давления. В этом случае граница циклона рассчитывается исходя из значения лапласиана давления (1.3)

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \quad (1.3)$$

где p – Значение давления;
 x – Расстояние по широте, градус широты или км;
 y – Расстояние по долготе, градус долготы или км;

Формула (1.3) аппроксимирована следующим конечно-разностным аналогом в сферической системе координат

$$\nabla^2 p = \frac{p_{i+1,j} + p_{i-1,j} - 2p_{i,j}}{(a \cos \varphi \Delta \lambda)^2} + \frac{p_{i,j+1} + p_{i,j-1} - 2p_{i,j}}{a \Delta \varphi^2} \quad (1.4)$$

где φ – широта, в градусах
 λ – долгота, в градусах

Лапласиан должен удовлетворять следующему критерию:

$$\nabla^2 p \geq 0,2 \text{ гПа}/(1^0)^2 \quad (1.5)$$

При этом циклон идентифицируется как «слабый», если лапласиан давления удовлетворяет условию (1.6) и «сильный», если лапласиан давления удовлетворяет условию (1.7).

$$0,7 \text{ гПа}/(1^0)^2 \geq \nabla^2 p \geq 0,2 \text{ гПа}/(1^0)^2 \quad (1.6)$$

$$\nabla^2 p \geq 0,7 \text{ гПа}/(1^0)^2 \quad (1.7)$$

Наиболее известным методом идентификации циклонов по числовым полям является разработка Национального управления океанических и атмосферных исследований NOAA в США (National Oceanic and Atmospheric Administration, Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, USA). В соответствии с методикой изобары проводятся через 1 гПа, в качестве циклона идентифицируется область пониженного давления, в которой градиент давления больше или равен 0,1 гПа/50 км. Центром циклона считается точка с максимальным значениям завихренности [47,62,63].

Одним из первых отечественных методов идентификации циклонов и трекинга является разработка Института глобального климата и экологии Росгидромета и Российской академии наук (РАН) [4,53,64,65]. Циклоническая область здесь определяется на координатной сфере, лежащей ниже некоторого семейства текущих поверхностей постоянного уровня. Отсюда циклон представляет собой максимальную по вложению область, ограниченную некоторой линией уровня, содержащей внутри себя единственный минимум (простой или типа «плато») барического поля, содержащий данный минимум (т.е. рассматриваются только одноцентровые циклоны). В качестве исходных данных рассматривается поле геопотенциала на стандартной изобарической поверхности 500 гПа [4].

Еще один метод был предложен в Институте физики атмосферы [53,66], в котором авторы развили вышеописанный метод [65], сделав процесс определения параметров циклонов более точным. В частности, была изменена

дискретность шага при определении замкнутых изобар. При временной дискретности данных 6 часов в единую траекторию объединялись два ближайших циклонических центра, если максимальное расстояние между центрами в последовательные моменты времени не превышает 800 км, изменение давления в центре при этом не должно превышать 20 гПа. Прогноз положения циклона даётся на основе полей ветра на изобарической поверхности 700 гПа.

Сотрудниками отдела Океанологии Арктического и Антарктического научно-исследовательского института был сформулирован ещё один метод, основывающийся на методике идентификации центра циклона и его траектории, описанной Зангом (Zhang), Уолшем (Walsh) и др. [67], которые в свою очередь опирались на работу Серреза (Serreze) [47]. Циклон в поле приземного давления в этом методе идентифицируется по восьми точкам.

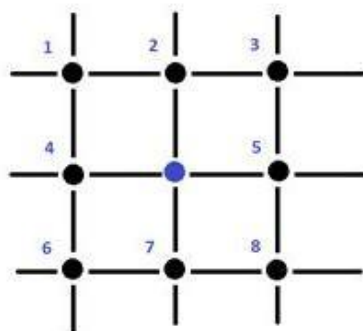


Рисунок 1.1– Идентификация точки-кандидата центра циклона по 8 точкам.

Если значение давления в центральной точке шаблона меньше, чем в восьми окружающих точках, то делается вывод о том, что рассматриваемая точка может быть центром циклона и определяется «циклон-кандидат» в этом узле сетки. После этого рассчитывается градиент между центральной точкой «циклона-кандидата» и восьми соседними точками шаблона. При этом для расчёта градиента в точках шаблона используются осреднённые значения согласно формуле (1.8).

$$GR_{i,j} = \frac{1}{a \cos \varphi \Delta\lambda} \left[P_{i,j} - \frac{(P_{i,j} + P_{i,j+1} + P_{i+1,j+1} + P_{i+1,j} + P_{i,j-1} + P_{i-1,j-1})}{6} \right], \quad (1.8)$$

где GR – градиент давления в точке «циклона-кандидата», гПа/м;
 a – радиус Земли, м
 φ – широта, радианы;
 $\Delta\lambda$ – шаг по пространству, радианы;
 P – давление в точке «циклона-кандидата», гПа.

Далее выбирается минимальный градиент из восьми рассчитанных. Если минимальный градиент больше 0,15 гПа / 100км, то узел остаётся центральной точкой «циклона-кандидата». В обратном случае рассмотрение этой точки прекращается. Здесь есть несколько особенностей:

1. Минимальный градиент давления должен быть отрицательным вовнутрь. В противном случае точка дальше не рассматривается.

2. Если несколько точек центров «циклонов-кандидатов» находятся на расстоянии меньше 1200 км в одно и то же время, то они считаются одним циклоном. За центр циклона принимается узел с наименьшим давлением, другие узлы не рассматриваются. На этом оканчивается процедура идентификации. Центр циклона определён.

3. Траектории циклона определяются как траектории центра циклона. Если положение циклона находится в радиусе 600 км от положения циклона в предыдущий срок, то это положение принимается как новое положение искомого циклона. Иначе считается, что найден новый «циклон-кандидат». И вся описанная процедура повторяется.

В Лаборатории Взаимодействия Океана и Атмосферы и Мониторинга Климатических Изменений Института Океанологии РАН (ЛВОАМКИ) в 1990 – 2000 гг. была разработана собственная схема идентификации циклона [68]. Метод ЛВОАМКИ основан на нахождении локальных минимумов в поле давления. В качестве порогового устанавливается значение давления в точке

равное 1015 гПа. Для более точного определения положения центра барической депрессии нахождение минимума проводится по 13 точкам (см. рисунок 1.2).

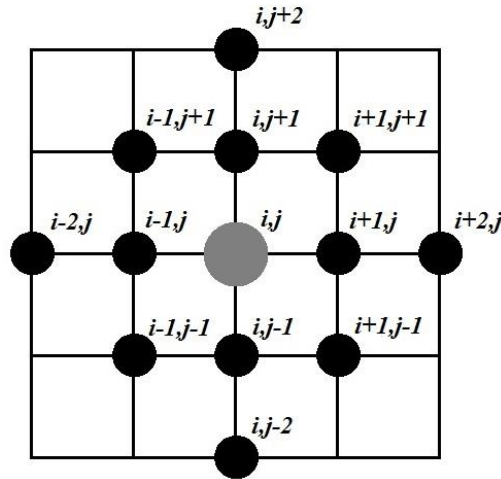


Рисунок 1.2 – Идентификация точки-кандидата центра циклона по 13 точкам

Рассматриваются 13 точек, для которых выполняются условия:

$$p_{ij} \leq p_{i+1j}, p_{ij} \leq p_{ij+1}, p_{ij} \leq p_{i-1j}, p_{ij} \leq p_{ij-1}, \quad (1.9)$$

$$p_{ij} \leq p_{i+1j+1}, p_{ij} \leq p_{i-1j-1}, p_{ij} \leq p_{i+1j-1}, p_{ij} \leq p_{i-1j+1} \quad (1.10)$$

$$p_{i-1j} \leq p_{i-2j}, p_{ij} \leq p_{i+2j}, p_{ij-1} \leq p_{ij-2}, p_{ij+1} \leq p_{ij+2}, \quad (1.11)$$

Минимумы разделяются на три категории в зависимости от величины области, окружающей данный минимум:

- Точки, удовлетворяющие условию (1.9) с заменой нестрогих неравенств на строгие;
- Точки, удовлетворяющие условию (1.10) с заменой нестрогих неравенств на строгие;
- Точки, удовлетворяющие условию (1.11) с заменой нестрогих неравенств на строгие.

В методе отсекаются точки возле экватора, а остальные попарно сравниваются с целью выбора точки с более высоким приоритетом [28]. После

этого для каждой точки, идентифицированной в качестве центра циклона, определяется «зона влияния». Последняя представляет собой квадрат с центром в выбранной точке, в пределах которого давление не превышает заданную величину. Для точки-центра циклона с давлением P зона влияния будет соответствовать области, в которой давление не превышает $P+\Delta P$, где величина приращения ΔP зависит от давления в центре циклона. В работе [69] приняты следующие значения:

$$\Delta P=15 \text{ гПа, если } P<1005 \text{ гПа} \quad (1.12)$$

$$\Delta P=10 \text{ гПа, если } 1005 \text{ гПа}<P<1010 \text{ гПа} \quad (1.13)$$

$$\Delta P=5 \text{ гПа, если } 1010 \text{ гПа}<P<1015 \text{ гПа} \quad (1.14)$$

Кроме этого, накладывается ограничение на площадь зоны влияния – сторона квадрата «зоны влияния» не должна превышать расстояния соответствующего 6 шагам сетки (см. рисунок 1.3) или 15° при анализе данных NCEP/NCAR с разрешением 2.5° [69]. Таким образом, в разных широтах «зона влияния» будет иметь разные линейные размеры, что учитывает схождение меридианов. После определения зон влияния все точки вновь рассматриваются попарно и повторяется отбор узлов с уверенными минимумами [69].

Затем проводится еще один, третий круг попарного анализа. Из рассматриваемых двух соседних точек минимума выбрасывается та, давление в которой больше. Кроме того, рассматриваются находящиеся рядом (четыре шага сетки) точки минимумов и выбирается точка с меньшим давлением [69].

Как видно, идентификация циклонов чаще происходит по полям приведенного к уровню моря давления (либо по полю геопотенциала изобарической поверхности 1000 гПа). Однако есть проекты [55,56,70], где для анализа привлекает поля геопотенциала изобарической поверхности 850 гПа [56].

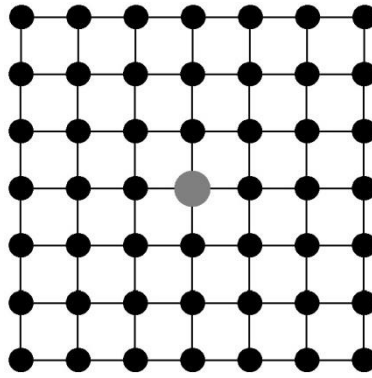


Рисунок 1.3 – Максимальный размер зоны влияния

Альтернативным способом описания поля давления является метод, предложенный профессором Русиным И.Н., который разрабатывал метод описания топографической структуры синоптических карт приземного давления с помощью графов [71]. Вершинами плоского графа являются области высокого давления, области же низкого давления принимаются за грани. Вершины соединяются ребрами в такой последовательности, чтобы обход каждой грани происходил против часовой стрелки. При этом при построении графа учитываются следующие правила:

1. Каждая замкнутая область высокого давления представляется вершиной графа с уникальным идентификатором, изображается она точкой;

2. Если одна область вложена в другую с меньшим или большим значением охватывающей изобары, то связь вершин, изображающих эти области, представляется в виде графа, направленного от охватывающей области к охватываемой;

3. Если внутри области лежит другая, охваченная изобарой с тем же значением давления, то это означает, что внутри области повышенного давления имеется локальный циклон, который изображен в виде грани графа, ограниченной ребром в виде петли у вершины, изображающей охватывающую область;

4. Если несколько изобарических областей охвачены одной и той же изобарой, то они попарно имеют общие седловины, а вершины, их

изображающие, не соединяются ребрами, но упорядочиваются слева направо, и это отражается в имени охватывающей изобары;

5. Упорядочение соседних центров, связанных седловинами, пока не выявятся существенные ограничения, производятся в направлении против часовой стрелки [71].

Описанным способом получается структурное описание областей повышенного и пониженного давления. Через нагрузки компонентов графа указывается географическое положение областей. Для того чтобы описание изобар приземного давления можно было построить автоматически, граф по заранее фиксированным правилам преобразуется в фундаментальное дерево. Результат можно также представить в словесной форме [71].

Сходным образом происходит идентификация циклонов в работе Иванова Б.Н. [72]. Исходными данными в этом методе также выступают изолинии поля давления у земли или геопотенциала на стандартных изобарических поверхностях. Вложенность изолиний, определяемая циклонами и антициклонами, представляется структурой корневых деревьев. Идентификация барических образований производится способом наложения упорядоченных по времени изолиний оснований. При неоднозначном выборе (пересечение изолиний циклона с несколькими изолиниями циклонов за предыдущий срок) предпочтение отдается тому, площадь пересечения с которым наибольшая. Размеры оснований циклонов при этом определяются расстояниями между их центрами. Такой метод может использоваться при смещениях, меньших, чем расстояния между циклонами. При использовании данных приземного давления или геопотенциала лучше всего использовать данные с дискретностью в 3 часа, за такое время смещение циклонов меньше их действительных размеров [72].

Как видно, сейчас существует достаточно много методик идентификации циклонов. С их помощью в распоряжении исследователей появляется достаточно богатый материал для дальнейших исследований.

В работе [4] Бардин М.Ю., анализируя геопотенциал изобарической поверхности 500 гПа в узлах сетки с разрешением $5^0 \times 10^0$ в умеренных широтах северного полушария ($35-75^0$ с.ш.) с 1951 по 1990 года, выделил три системы, характеризующиеся высокой повторяемостью циклоничности: Тихоокеанскую, Северо-Атлантическую и Средиземноморскую. В работе также были отмечены сезонные максимумы и минимумы в количестве, глубине и площади циклонов, а также были отмечены некоторые региональные особенности годового хода циклоничности. Кроме того, в результате анализа автор в своей работе выделил две «ступеньки» в климатических рядах, которые, по его мнению, не могут быть достоверно проанализированы в виду недостаточных знаний о различных компонентах климатической системы. В более поздней своей работе [65] путем анализа полей с тем же разрешением для того же региона была установлена основная мода изменчивости географического распределения повторяемости циклонов. Кроме того, Бардин М.Ю. высказал предположение о существовании глобального отклика циркуляции умеренных широт северного полушария на сигнал в тропической зоне – Южного колебания (Эль-Ниньо/Ла-Нинья).

В работе Золиной О.Г. [68] был проанализирован траектории циклонов северного полушария за период с 1948 по 2000 года, полученные по различным данным и с помощью различных методов. В работе проведен количественный анализ климатических характеристик циклонической активности, охарактеризована пространственная структура циклонической активности над северным полушарием, выявлена их сезонная и межгодовая изменчивость, приведены характеристики жизненного цикла и климатические изменения циклонической активности. Кроме того, автор в своем исследовании выявил моды изменений циклонической активности, связанные с Северо-Атлантическим и Тихоокеанским колебаниями. Золиной О.Г также было проанализировано влияние временного и пространственного разрешения данных на качество идентификации циклонов.

В более поздней работе Рудева И.А. [69], усовершенствовав схему идентификации, предложенную в [68], по данным в северном полушарии с 1948 по 2004 года проанализировала влияние разрешения данных на качество оценки циклонической активности и сравнила характеристики циклонов по результатам данных различных пространственных масштабов, а также по данным разных модельных экспериментов. Кроме того, в работе была проанализирована климатическая изменчивость размеров циклонов северного полушария, была дана оценка распределению количества циклонов в зависимости от их размеров и интенсивности, был проанализирован жизненный цикл циклонов, обнаружена связь между размерами и временем жизни барических депрессий. Также в ходе исследования автор оценил баланс энергии и влаги в циклонах в приземном слое на разных стадиях развития.

В еще более поздней работе [73] Акперов М.Г. также провел сравнение различных характеристик циклонов северного полушария с использованием данных реанализов с различным разрешением. В своей работе автор выявил экспоненциальный характер распределения количества циклонов в зависимости от их интенсивности и площади, оценил изменения количества, размеров и плотности распределения внетропических циклонов, охарактеризовал влияние меридионального градиента приповерхностной температуры и вертикального градиента температуры в атмосфере на изменение количества и характеристик циклонов. Кроме того, по результатам модельных расчетов было оценено изменение количества внетропических циклонов при возможных антропогенных изменениях.

В данной работе в силу своей относительной вычислительной простоты и физической обоснованности был выбран метод идентификации, разработанный в Лаборатории Взаимодействия Океана и Атмосферы и Мониторинга Климатических Изменений Института Океанологии РАН (ЛВОАМКИ). Метод хорошо освещен в вышеупомянутых работах Золиной О.Г. и Рудевой И.А. [68,69].

Как видно, на сегодняшний день накоплен уже весьма внушительный материал по оценке климатических характеристик циклонической активности. Однако ясности в этом вопросе нет до сих пор. Во всех вышеупомянутых работах было исследовано только северное полушарие, однако атмосфера – это сложная система, в которой нельзя не учитывать дальние связи. Кроме того, в данной диссертационной работе использованы обновленные данные с большей длиной ряда, чем во всех предыдущих. Именно поэтому тема исследования актуальна.

На циркуляцию атмосферы огромное влияние оказывает Мировой океан. Взаимодействие атмосферы на океан проявляется через передачу ему количества движения, обратное же влияние проявляется через передачу тепла от океана атмосфере. В связи с этим, исследуя циркуляцию, просто необходимо рассматривать такие результаты взаимодействия атмосферы и океана, как Южное колебание (Эль-Ниньо/Ла-Нинья) и Северо-Атлантическое колебание.

Южное колебание (ENSO) является важнейшим сигналом в межгодовой климатической изменчивости в системе океан-атмосфера. Последствия Южного колебания в различных районах земного шара практически наблюдается регулярно, каждые 2 – 7 лет. Идентификация колебания может происходить несколькими способами: по среднемесячным данным приземного давления (индекс SOI) или по среднемесячным аномалиям температуры поверхности в экваториальном районе Тихого океана (индексы Эль-Ниньо и Ла-Нинья) [109]. Индекс SOI представляет собой стандартизированную разность нормализованных среднемесячных аномалий давления на станциях Таити и Дарвин. Индексы Эль-Ниньо и Ла-Нинья рассчитываются по аномалиям температуры поверхности океана в экваториальной, центральной и восточной областях Тихого океана. В виду того, что атмосфера и океан тесно связаны между собой, терминами Эль-Ниньо и Ла-Нинья сегодня называют не только аномалии температуры поверхности океана, но и соответствующие аномалии циркуляции и осадков [74]. Связь Эль-Ниньо с атмосферной

циркуляцией была обнаружена исследователями довольно давно [75]. Это явление играет важную роль в формировании межгодовой изменчивости климата южного полушария, а по некоторым исследованиям – всего земного шара [76]. Природа этого явления традиционно связывается с тихоокеанской климатической системой [77-79], но до конца она не изучена. В ряде работ показано, что во время Эль-Ниньо в Индийском океане также наблюдаются аномалии гидрофизических характеристик [80,81]. Считается, что в развитии явления взаимодействуют между собой атмосферные волны Россби и крупномасштабные океанские течения. Последние обуславливают положение термоклина, удаляя его от поверхности океана или приближая к нему. Волны Россби же создают попеременно направленную циркуляцию в вертикальной плоскости перпендикулярной экватору. В результате происходит перемешивание холодных глубинных вод и теплых приповерхностных (апвеллинг и даунвеллинг) [82,84]. Эль-Ниньо нерегулярно, оно продолжается от одного до двух лет, а промежутки между ним составляют от двух до семи лет. Последствия Эль-Ниньо влияют и на внетропические циклоны. Чтобы оценить степень влияния Южного колебания на количество и характеристики циклонических режимов обоих полушарий, в ходе работы были рассчитаны корреляционные связи временных рядов характеристик циклонических режимов и рядов, характеризующих Южное колебание.

Северо-Атлантическое колебание (САК) или как его называют North Atlantic Oscillation (NAO) является одной из важнейших характеристик крупномасштабной циркуляции атмосферы в северном полушарии. САК полностью определяется колебаниями в атмосферном давлении между зоной высокого давления у Азорских островов и зоной низкого давления у Исландии, а также и океаническим течением (Гольфстрим). Разница в атмосферном давлении увеличивается, если Гольфстрим проявляется с большой силой, при его же охлаждении наступает обратная ситуация. Следствием увеличения разницы давления между Азорским максимумом и Исландским минимумом

является усиление зонального переноса, следствием уменьшения этой разницы – усиление меридионального переноса. Сущность САК заключается в перераспределении атмосферных масс между Арктикой и субтропической Атлантикой. В последние годы Атлантический феномен все чаще рассматривают как один из возможных проявлений глобального потепления [63]. САК выражено во все сезоны года и проявляется на масштабах от нескольких суток до нескольких столетий. Интенсивность Северо-Атлантического колебания определяется разностью давления на станциях, расположенных вблизи климатических центров действия атмосферы. Индекс САК чаще всего рассчитывается как разница приземного давления между станциями Понта Делгада (Азорские острова) и Акурейри (Исландия), осредненная за три зимних месяца (декабрь-февраль). Результат представляют либо в гПа, либо в долях дисперсии [85-87]. Точки, характеризующие САК, выбраны в силу того, что они наиболее полно характеризуют состояние Азорского максимума и Исландского минимума, однако в некоторых исследованиях в качестве таких станций выбирались Лиссабон (Португалия) и Стиккисхоульмур (Исландия) [88,89], осредненные за четыре зимних месяца (декабрь-март) [90,91]. Иногда для расчета используется разность давлений непосредственно в точках, связанных с центрами действия атмосферы [92], которые, в свою очередь, могут мигрировать. Кроме того, в [90] авторы предлагают рассчитывать индекс САК как первую компоненту разложения по естественным ортогональным функциям изменений всех четырех вышеуказанных индексов.

Северо-Атлантическое колебание является частью глобальной циркуляции, а значит есть основания полагать, что оно влияет не только на климат Европы, но и имеет связь с колебаниями погоды и климата всего северного полушария. Вот почему в данной диссертационной работе исследовалась связь между характеристиками циклонических режимов и Северо-Атлантическим колебанием. Особое внимание в исследовании

уделялось зимним месяцам, так как в это время давление в центре Исландской депрессии наиболее низкое, а в центре Азорского антициклона самое высокое, они находятся на самом близком друг от друга расстоянии и приблизительно на одном меридиане. Потому наиболее выражены меридиональные градиенты давления над Северной Атлантикой в сезонном ходе, определяющие интенсивность Северо – Атлантического колебания [90]. Именно в этот период Северо-Атлантическое колебание оказывает максимальное влияние на циркуляцию.

Северо-Атлантическое колебание имеет также низкочастотную составляющую, называемую Атлантическим мульти-декадным колебанием или осцилляцией (Atlantic Multi-decadal Oscillation). В литературе это колебание сокращенно именуют АМК или АМО, характерные периоды этой осцилляции составляют 65-75 лет. АМО характеризуется изменением температуры поверхности океана в Северной Атлантике. Колебания представляют собой смену холодной и теплой фазы, продолжительность каждой может меняться от 20 до 40 лет, а разница между экстремумами составляет примерно 1 градус [93]. Происходящие изменения естественны и происходят, по крайней мере, последние 1000 лет [94]. Атлантическое мульти-декадное колебание оказывает колоссальное влияние на циркуляцию северного полушария и, соответственно, на температуру воздуха и интенсивность осадков. В период теплой фазы АМО число тропических штормов, по интенсивности достигающих уровня ураганов, значительно больше по сравнению с периодом холодной фазы. Частота более слабых штормов не столь зависима от АМО. Однако число штормов, с интенсивностью близкой к ураганной, значительно увеличивается [74].

Модели взаимодействия океана и атмосферы показывают, что цикл АМО включает изменение циркуляции (север-юг) и изменения траектории движения водных масс и тепла в Атлантическом океане. Подобные изменения в циркуляции наблюдались в ледниковые периоды, однако, в случае АМО эти изменения более тонкие (менее уловимые). Теплое течение Гольфстрим вдоль

восточного побережья США является частью атлантической циркуляции. Когда «переворотная» циркуляция ослабевает, температура в Северной Атлантике понижается. Влияние АМО можно считать альтернативной причиной изменения температуры воздуха в противовес глобальному изменению температуры вследствие антропогенного влияния деятельности человека. Существующие инструментальные наблюдения позволяют исследовать цикл АМО только за последние 150 лет, что не достаточно для выяснения ответа на вопрос – является ли АМО природным колебанием или оно определяется глобальным потеплением, в основе которого лежат антропогенные факторы. Однако палеоклиматические исследования показывают, что колебания подобные АМО могли иметь место и миллионы лет назад. Вероятней всего, что в основе развития АМО лежат природные факторы. В XX веке климатические аномалии, связанные с АМО, сопровождаются и аномалиями, связанными с глобальным потеплением. Трудно разделить климатические аномалии, обусловленные только АМО и только глобальным потеплением [74].

Многие исследователи связывают изменение циркуляции с процессами, происходящими на Солнце и в межпланетной среде [18-25]. Солнце дает энергию процессам, происходящим на Земле. Самым известным изменением солнечной активности является одиннадцатилетняя цикличность. Достоверно установленным является также колебание с периодом в 22 года, которое в свою очередь состоит из одиннадцатилетних колебаний разных знаков. Признание реальности двадцатидвухлетнего цикла солнечной активности произошло благодаря американскому астроному Дж.Хейлу, который определил, что полярность магнитных полей ведущих (хвостовых) пятен северного (южного) полушария Солнца изменяется на противоположную при переходе от одного 11-летнего цикла к другому [95]. Довольно давно исследователи установили связь солнечной активности на колебания скорости вращения Земли [96-98], изменение которой в свою очередь, очевидно, ведет и к изменению

циркуляции. Кроме того, при рассмотрении вопросов циркуляции следует также учитывать сложность влияния каждого из колебаний, а также их взаимное наложение. Так, например, явление резонанса двух колебаний: магнитных полюсов Земли: с периодом около 14 месяцев и еще одного, вынужденного, с периодом около 12 месяцев может привести к образованию колебания в 7 лет. Безусловно, изменение магнитных полюсов, перемещающихся с запада на восток, влияет, прежде всего, на океан. Так как влияние атмосферы на океан проявляется через передачу ему количества движения, а океана на атмосферу через передачу энергии, то, соответственно, такое не прямое воздействие влияет и на циркуляцию атмосферы. Закручивание и раскручивание траектории полюса объясняется тем, что он совершает два периодических движения: свободное или чандлеровское (названо в честь открывшего его в 1891 г. С. Чандлера) с периодом около 14 месяцев и вынужденное – с годовым периодом. Чандлеровское движение полюсов возникает, если ось вращения Земли отклонена от оси ее наибольшего момента инерции. Движение полюсов, вызванное действием на Землю периодических сил атмосферы и гидросферы, называется вынужденным. Нетрудно посчитать, что эти колебания совпадают приблизительно раз в семь лет. Сложение этих движений и дает наблюдаемую картину [99].

1.1 Используемые данные и методики анализа исследования основных характеристик циклонов

Используемые данные

Даже в условиях современного изменения климата принято, что на отдельных небольших отрезках временного ряда, например, продолжительностью 30 лет колебания климатических характеристик являются квазистационарными [100], а потому любое климатологическое исследование подразумевает наличие однородных данных с длиной ряда более 30 лет.

Сегодня самыми объективными данными о полях метеорологических величин являются данные реанализа. В виду того, что поля реанализа получены с применением модели одной и той же конфигурации и «замороженной» схемой усвоения, запущенной в исследовательском режиме, данные динамически согласованы, а потому позволяют получить наиболее достоверные результаты.

В данном диссертационном исследовании использовались данные реанализов NCEP/NCAR [94] и ERA- INTERIM [101].

NCEP/NCAR реанализ

В данной работе были использованы данные реанализа NCEP/NCAR [102,103], который создан на основе спектральной модели Национального центра предсказания окружающей среды (NCEP), описывающей большинство атмосферных процессов. Модель имеет горизонтальное спектральное разрешение T62 (приблизительно 210 км на экваторе) и 28 неэквидистантных сигма-уровней. по вертикали. Усвоение данных в модели производилось при помощи трехмерного вариационного анализа (3D-Var) [104]. NCEP на сегодняшний день является одной из наиболее успешных моделей общей циркуляции атмосферы, а ее реанализ, полученный с использованием данных с наземных станций, кораблей, самолетов, радиозондов и спутников, является весьма достоверным источником для исследователей, специализирующихся на изучении климата и изменений в нем происходящих. Этот реанализ хорош тем, что из всех доступных данных он имеет самый длинный ряд. Вот почему данные этого реанализа широко используются во многих работах [3,28,33,68,69,73,105 и др.].

В ходе анализа использовались дискретные сеточные поля приземного давления, приведенного к уровню моря с широтно-долготным разрешением сетки $2.5^0 \times 2.5^0$. Исследовался период с 1948 г. по 2014 г, временная дискретизация данных составляла 6 часов.

ERA – INTERIM реанализ

В работе использовались также данные реанализа ERA-INTERIM [106]. Он является улучшенной версией атмосферного реанализа ERA-40 [107]. Поля реанализа созданы при помощи модели Integrated Forecast Model (IFS-Cy31r2) Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Изначально данные охватывали временной промежуток с 1989 года, однако позже было добавлено еще одно десятилетие и теперь в распоряжении исследователей есть высококачественные однородные данные о метеорологических величинах за период с 1979 года по настоящее время. Модель, на которой сделан реанализ, имеет спектральное разрешение T255 (шаг по горизонтали около 80 км) и 60 уровней по вертикали, верхний уровень – 0,1гПа, что соответствует приблизительно 64 км. Усвоение данных в модели производилось с помощью 12-ти часового четырехмерного вариационного анализа (4D-VAR) [108]. В ходе анализа использовались сеточные поля приземного давления, приведенного к уровню моря с широтно-долготным разрешением сетки $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$, исследовался период с января 1979 по июль 2015 года. Временная дискретизация 6 часов. Этот реанализ появился в распоряжении исследователей достаточно недавно. Как показано в некоторых работах, например одной из последних [109], он демонстрирует лучшие результаты в идентификации циклонов, что, очевидно связано с более высоким разрешением данных и улучшенной системой усвоения.

Данные Северо-Атлантического колебания

В ходе исследования была проанализирована корреляционная связь между Северо-Атлантическим колебанием и характеристиками циклонов в северном полушарии. Источником данных о САК за каждый месяц, начиная с 1950 года, является Центр прогноза климата национальной администрации по океану и атмосфере (National Oceanic and Atmospheric Administration's – NOAA) [94]. Индекс здесь рассчитывался на основе методики, предложенной в работе [110], на основе разложения ежемесячных стандартизированных полей

аномалий геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа в области от 20 до 90° с.ш. по эмпирическим ортогональным функциям.

В ходе работы над диссертационным исследованием была оценена связь между индексом САК и количеством циклонов, их максимальной глубиной и циклонической активностью за период с 1950 по 2015 года для всего земного шара и для регионов от 45° до 90° с.ш. и 50° з.д. до 50° в.д. Был оценен скользящий коэффициент корреляции. Для того чтобы о полученных результатах можно было говорить как о климатических, рассматривался временной промежуток в 30 лет [100], т.е. оценивался коэффициент корреляции для тридцатилетних периодов – с 1950 по 1980 год, 1951 по 1981 год и т.д.

Метод обработки и оценки связи между характеристиками циклонов и предикторами заключается в том, что рассчитываются коэффициенты корреляции Пирсона (r) между временными предиктантами (ими являются различные характеристики циклонов: количество, глубина и циклоническая активность) и рядами предикторов (в данном случае предиктором является индекс САК).

Коэффициенты корреляции между характеристиками циклонами и индексом САК вычислялись согласно (1.15).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (1.15)$$

где X_i – текущие значения предиктора;

Y_i – текущие значения предиктанта;

\bar{X} – среднее значение в рассматриваемый месяц и период наблюдений;

\bar{Y} – среднее значение в рассматриваемый месяц и период

наблюдений;

N – количество лет в выбранном периоде наблюдений.

Достоверность коэффициентов корреляции оценивалась с помощью t -статистики Стьюдента (на уровне значимости 99,5 %). Критическое значение коэффициента корреляции ($r_{кр}$) рассчитывалось как

$$r_{кр} = \frac{t_{\beta}}{\left(n - 2 + t_{\beta}^2\right)^{0.5}}, \quad (1.16)$$

где $r_{кр}$ – критическое значение коэффициента корреляции;
 t_{β} – критерий Стьюдента при уровне значимости $(1 - \beta)$;
 $n - 2$ – число степеней свободы.

Если значение коэффициента корреляции оказывалось выше, чем критическое значение (1.16), то коэффициент считался значимым, то есть условие значимости имеет вид

$$r \geq |r_{кр}| \quad (1.17)$$

Данные Южного колебания (Эль-Ниньо / Ла-Нинья)

Для того чтобы оценить как влияют такие проявления Южного колебания как Эль-Ниньо и Ла-Нинья на циркуляцию обоих полушарий, в ходе исследования были рассчитаны корреляционные связи между количеством циклонов и основными характеристиками барических депрессий в обоих полушариях. В качестве исходных данных был взят индекс MEI (Multivariate ENSO Index), который учитывает изменения сразу шести переменных: давления на уровне моря, зональных и меридиональных составляющих приземной скорости ветра, приземной температуры воздуха и балла общей

облачности [94]. Данные об индексе MEI с 1950 года получены с сайта Центра прогноза климата национальной администрации по океану и атмосфере (National Oceanic and Atmospheric Administration's – NOAA) [94].

Аналогично описанному выше для индекса САК, была проанализирована корреляционная связь характеристик циклонов с данными MEI.

Данные об Атлантической мульти-декадной осцилляции

Источником данных об Атлантической мульти-декадной осцилляции также послужил Центр прогноза климата национальной администрации по океану и атмосфере (National Oceanic and Atmospheric Administration's - NOAA) [94]. Использовались данные за каждый месяц, начиная с 1948 года. На этом же сайте представлены данные АМО с 1860 года, они использовались для качественного анализа происходящих изменений АМО и его связи с циклоническими режимами. Корреляционные связи между АМО и характеристиками циклонов рассчитывались согласно методике описанной выше по формулам (1.15-1.17).

1.2 Метод идентификации циклонов

В данной работе было отдано предпочтение методу, разработанному в Лаборатории Взаимодействия Океана и Атмосферы и Мониторинга Климатических Изменений Института Океанологии РАН (ЛВОАМКИ, («Циклон», №2006612244)) [68,111]. Метод был выбран в виду того, что в нем хорошо сочетаются физическая обоснованность и относительная вычислительная простота. Однако для адаптации его к имеющимся данным в алгоритм были внесены некоторые изменения. Рассмотрим метод идентификации циклонов более подробно.

Пороговое значение давления как и в схеме ЛВОАМКИ считалось равным 1015 гПа. После этого для каждой точки, удовлетворяющей этому условию сравнивались 12 соседних. Точка с сеточными координатами (i, j)

считалась центром циклона, если давление в ней удовлетворяло следующим условиям (1.7-1.9).

Анализ проводился по всему земному шару. В результате различных численных экспериментов со всеми точками земного шара и без ближайших трех к полюсу (севернее $82,5^\circ$ с.ш. и южнее $82,5^\circ$ ю.ш. для реанализа NCEP/NCAR и севернее $85,5^\circ$ с.ш. и южнее $85,5^\circ$ ю.ш. для реанализа ERA-INTERIM) не было получено существенных различий в количестве и характеристиках циклонов, а потому ради вычислительной простоты зоны у полюсов не анализировались. Таким образом, в северном полушарии первой анализируемой точкой были точки с широтой $82,5^\circ$ с.ш. для реанализа NCEP/NCAR и $85,5^\circ$ с.ш. для реанализа ERA-INTERIM, однако условия локального минимума для крайних точек рассматривались с учетом тех узлов, что были исключены из рассмотрения. Аналогичная процедура была сделана и в южном полушарии.

С физической точки зрения исключение приполярных областей можно обосновать тем, что севернее 80° с.ш. преобладает антициклональный тип циркуляции, конечно, за исключением циркумполярного вихря, который имеет совершенно другую природу и рассмотрение которого выходит за рамки данного исследования. Самое северное положение полярных мезоциклонов было отмечено в районе Северо-Европейского бассейна около параллели 80° с.ш. Однако следует учитывать, что такие образования, располагающиеся в основном надо льдом, не получают дальнейшего развития [112]. Кроме этого, мезомасштабные полярные циклоны практически никогда не воспроизводятся в полях реанализа, не все из них идентифицируются даже на сетках с высоким разрешением [113,114]. В виду этого представляется более перспективным исключить приполярные области, так как воспроизводимых реанализом циклонов там не встречается, однако вычислительные ресурсы на их поиск затрачиваются, приэкваториальные районы в ходе исследования рассматривались, однако следует учесть, что здесь области низкого давления

имеют другую природу, они связаны с депрессиями термического происхождения.

В ходе работы проводились эксперименты с параметрами «зоны влияния», определение которой описано при рассмотрении метода ЛВОАМКИ в п.1.1. Было решено не использовать зону влияния при исследовании циклонических режимов по результатам реанализа NCEP/NCAR в виду его грубого разрешения ($2,5^0 \times 2,5^0$), так как подобное влечет за собой слишком большую потерю количества циклонов. Обработка же данных реанализа ERA-INTERIM, разрешение которых составляет $0,75^0 \times 0,75^0$, позволяет ввести в расчет «зону влияния». То есть, в соответствии с методом ЛВОАМКИ [68,111] для каждой точки, идентифицируемой в качестве центра циклона, с давлением P определялась зона влияния $P + \Delta P$ в соответствии с формулами (1.7-1.9). Необходимым условием для границы «зоны влияния» является ограничение ее площади: сторона квадрата «зоны» не должна превышать расстояния, соответствующего 6 шагам сетки. Таким образом, в разных широтах «зона влияния» будет иметь разные линейные размеры, что позволяет учитывать сходимость меридианов у полюсов. После определения зон влияния последовательно рассматриваются находящиеся рядом (на расстоянии, не превышающем четыре шага сетки) точки минимумов и выбирается точка с меньшим давлением [69], то есть рассматриваются и многоцентровые циклоны.

Вышеописанный алгоритм был реализован численно. Необходимо отметить, что в исследовании не анализировались траектории циклонов, исследовалось количество «циклонических ситуаций» в каждый момент времени, т.е. долгоживущие циклоны в данном случае считались в каждый момент времени как отдельные циклонические ситуации. Для простоты и краткости далее мы будем называть циклонами, подразумевая под этим именно циклонические ситуации.

На рисунке 1.4 приведен пример полученного результата анализа поля давления с нанесенными на него точками, определенными как центры циклонов.

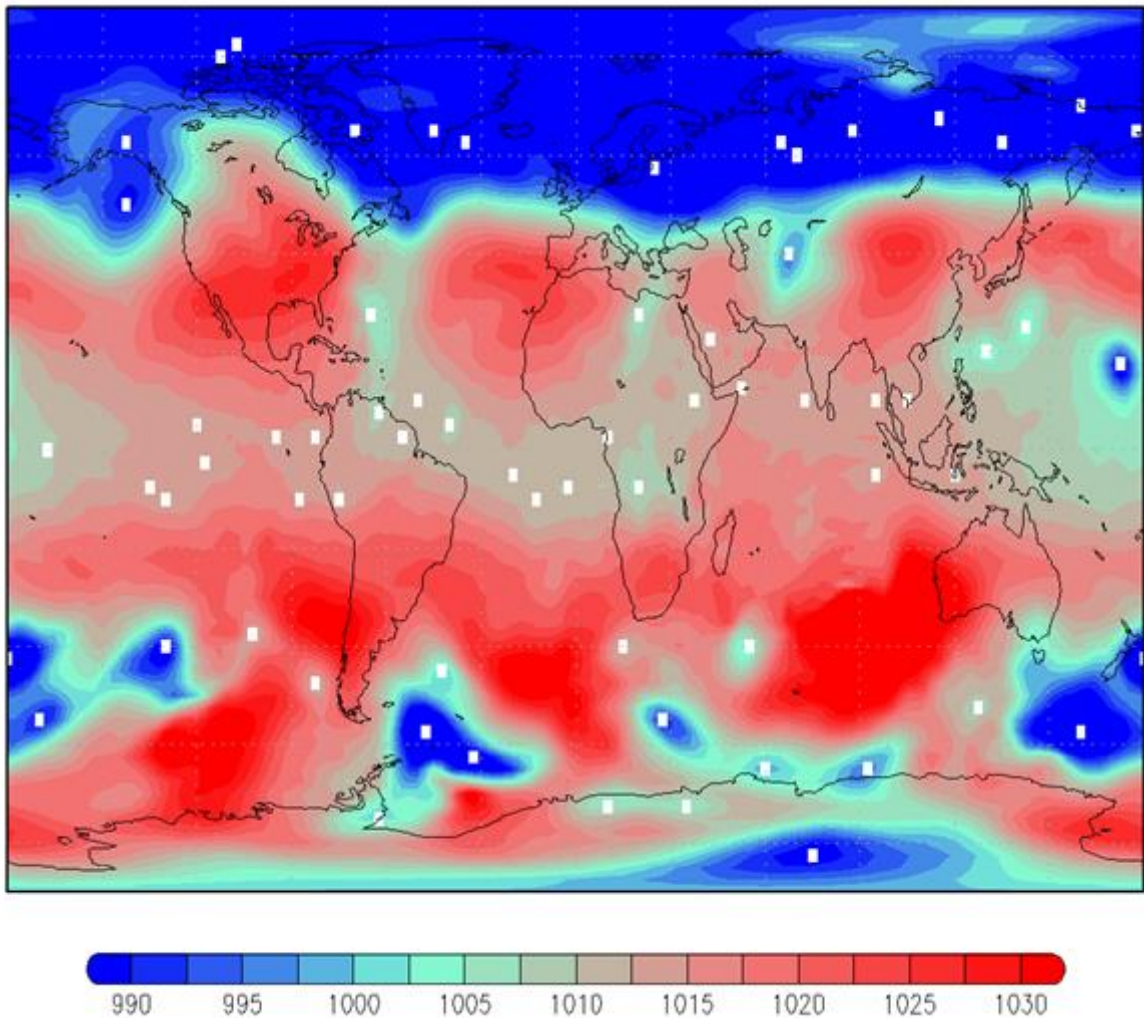


Рисунок 1.4 – Поле приземного давления и центры циклонов за срок 18 часов 4 января 1978 года, определённые по данным NCEP/NCAR

Как видно, из анализа поля, приведённого на рисунке 1.4, в ходе исследования было отмечено большое количество циклонов в приэкваториальных областях. Здесь барические образования имеют термическую природу, это неглубокие области пониженного давления, однако, если в качестве порогового значения давления в ходе идентификации циклонов

использовать значение 1015 гПа, то они идентифицируются как циклонические образования, отвечая всем критериям, описанным выше. На рисунках 1.5 - 1.8 приведены примеры полей, когда по данным реанализа NCEP/NCAR были идентифицированы циклоны с пороговым давлением в центре 1010 гПа, 1000 гПа, 995 гПа и 990 гПа, соответственно. Из анализа рисунков видно, что наиболее глубокие циклоны в обоих полушариях располагаются около 60-й широты, в приэкваториальных же широтах отмеченных барических депрессий хотя и много, но они имеют совсем небольшую глубину.

Таким образом, чтобы отфильтровать области пониженного давления у экватора, нужно либо уменьшать пороговое значение, либо не рассматривать приэкваториальные широты. В виду грубости разрешения реанализа NCEP/NCAR было принято решение не снижать для него пороговое значение, так как это привело бы к слишком большой потере информации о циклонах в умеренных и высоких широтах. Анализ результатов численных экспериментов с данными реанализа NCEP/NCAR показал, что после снижения порогового значения давления при идентификации циклонов до 1000 гПа, барических депрессий в приэкваториальной зоне не остаётся, а общее количество циклонов значительно уменьшается. В виду этого для реанализа NCEP/NCAR было принято решение использовать в качестве порогового значения давления за 1015 гПа и рассматривать циклоны в областях севернее 20° с.ш и южнее 20° ю.ш. Для реанализа ERA-INTERIM в виду его большего разрешения проводились эксперименты с разным пороговым значением, расчет при этом проводился по всем широтам. Кроме того, для ERA-INTERIM в виду его высокого разрешения также дополнительно вводилось «зона влияния», подробно описанная выше.

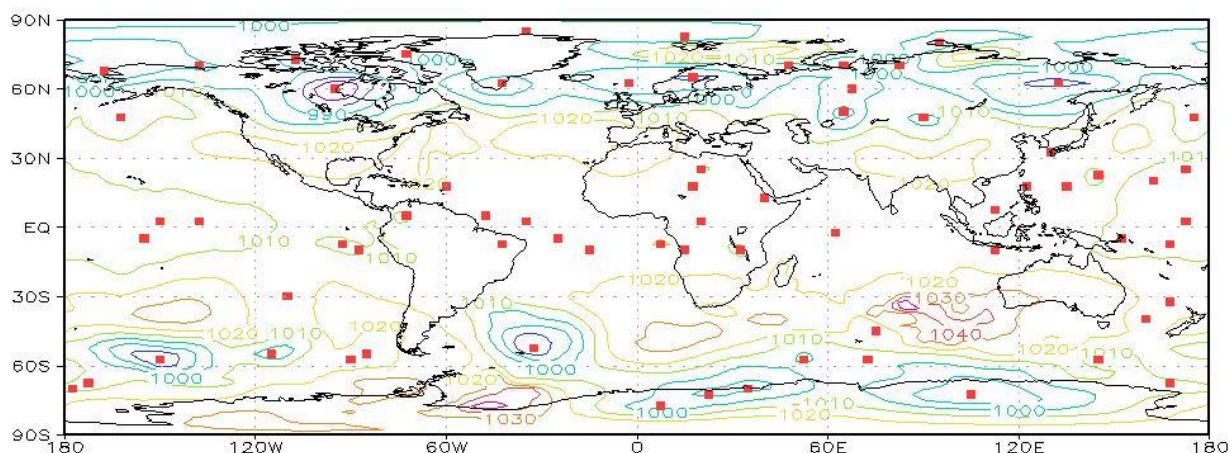


Рисунок 1.5 – Поле приземного давления и центры циклонов, идентифицированных с пороговым значением давления в 1015 гПа, за 00 часов 1 января 1949 года, определённые по данным NCEP/NCAR

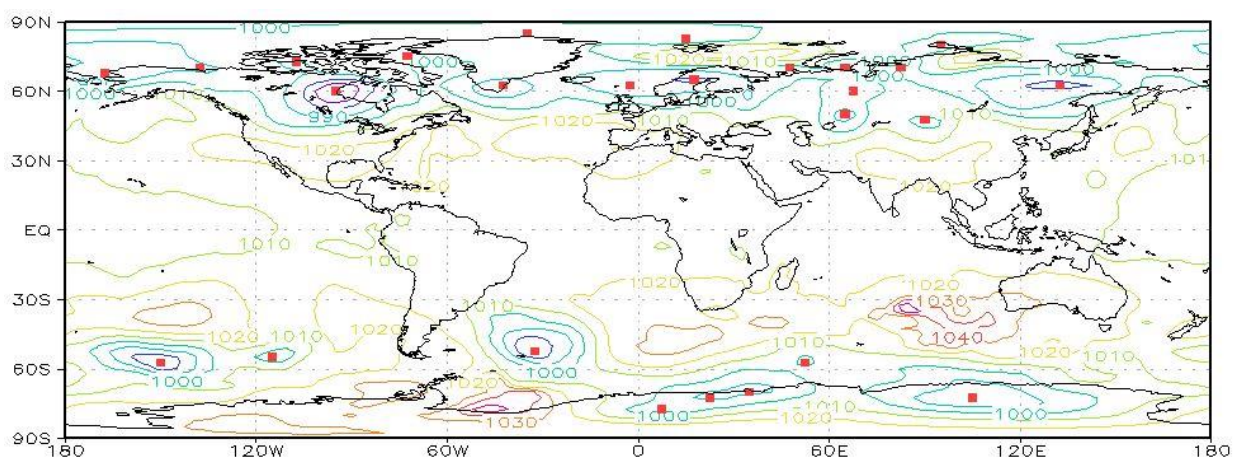


Рисунок 1.6 – Поле приземного давления и центры циклонов, идентифицированных с пороговым значением давления в 1000 гПа, за 00 часов 1 января 1949 года, определённые по данным реанализа NCEP/NCAR

Вышеописанным методом было оценено количество циклонических ситуаций. Кроме того, было рассчитано общее количество циклонов в каждом полушарии за год и для каждого месяца. Для более детального анализа циклонических режимов в ходе работы был рассчитан еще ряд характеристик, описывающих режимность изменения циклонических циркуляций:

- площадь циклона,

- эффективный радиус циклона,
- индекс циклонической активности,
- объём переносимого циклоном приземного воздуха,
- аномалии всех характеристик циклона,
- нормированные значения всех характеристик циклонических режимов.

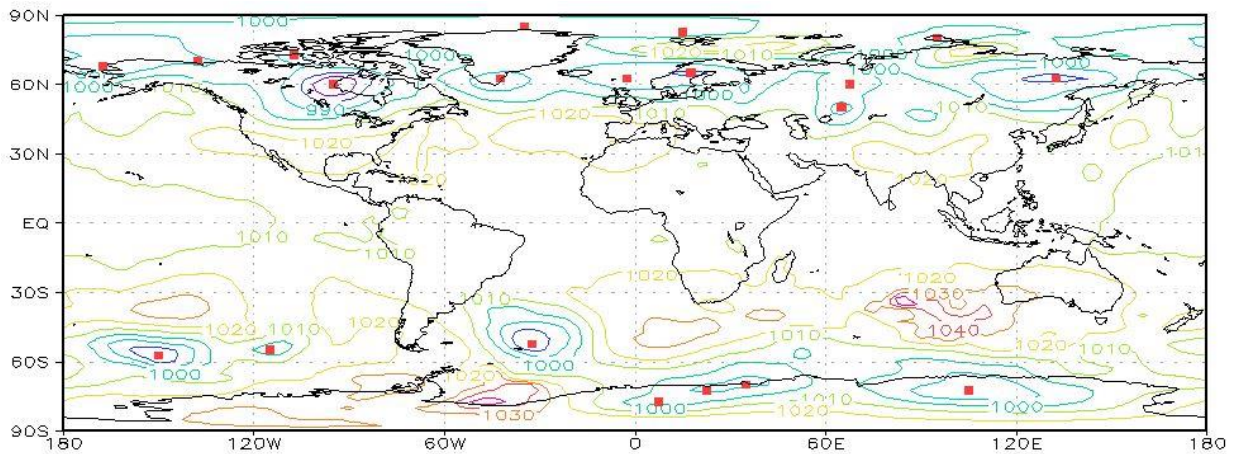


Рисунок 1.7 – Поле приземного давления и центры циклонов, идентифицированных с пороговым значением давления в 995 гПа, с за 00 часов 1 января 1949 года, определённые по данным реанализа NCEP/NCAR

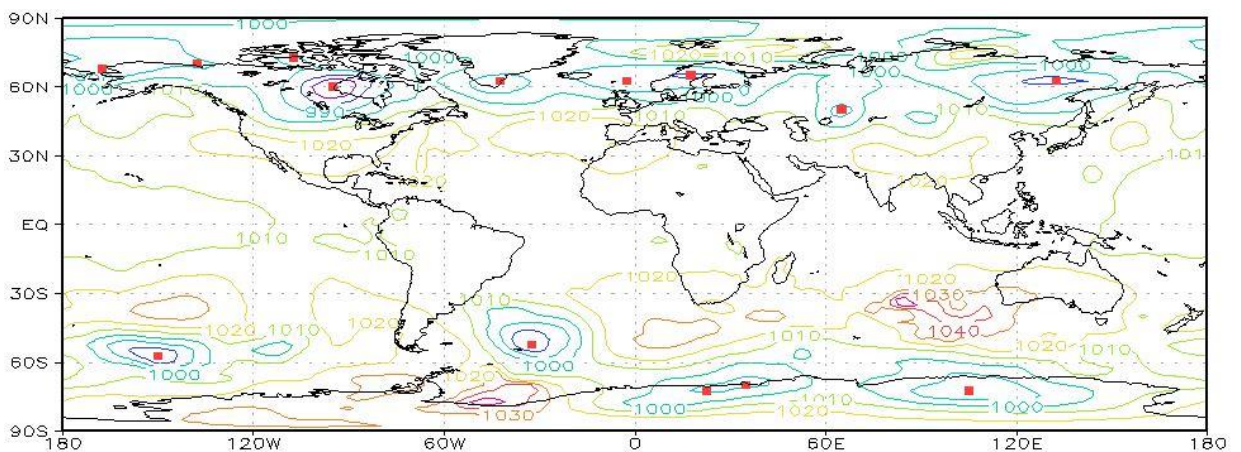


Рисунок 1.8 – Поле приземного давления и центры циклонов, идентифицированных с пороговым значением давления в 990 гПа, за 00 часов 1 января 1949 года, определённые по данным реанализа NCEP/NCAR

1.3 Метод определения геометрических характеристик циклонов

Для определения площади циклона изначально определялась его граница [28,69]. Она рассчитывалась «по последней замкнутой изобаре». Для этого сначала рассчитывался градиент (по формулам 1.18 и 1.19).

$$GR_{i+m,j} = \frac{P_{i+m,j} - P_{i+m-1,j}}{mdx}, \quad (1.18)$$

$$GR_{i,j+n} = \frac{P_{i,j+n} - P_{i,j+n-1}}{ndy}, \quad (1.19)$$

где GR – градиент давления в циклоне по широте и долготе, гПа/м;
 dx, dy – расстояние между узлами сетки по широте и долготе, м;
 m, n – номер узла от центральной точки циклона по широте и долготе, соответственно;
 i, j – координаты точки центра циклона;
 P – давление, гПа.

Номер узла сетки (m, n) может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от направления от центральной точки циклона.

В качестве граничной выбиралась точка, где градиент давления (1.18) и (1.19) становился равным нулю или менял знак на противоположный, то есть

$$GR_{i+m,j} \leq 0 \quad (1.20)$$

$$GR_{i,j+n} \leq 0 \quad (1.21)$$

Радиус циклона рассчитывался по формулам (1.22 и 1.23):

$$R_x = m dx, \quad (1.22)$$

$$R_y = n dy \quad (1.23)$$

В случае, если найдены $m > 10$ и $n > 10$, при которых выполняются условия (1.20 и 1.21), радиус циклона считался равным 1500 км.

В случае же если при $m = 1$ выполнялись условия (1.20 и 1.21), значение радиуса считалось равным 200 км.

После определения границ рассчитывалась площадь циклона. Площадь циклона определялась как сумма площадей четырех треугольников с вершинами в центре циклона и четырех точках, определенных в качестве границы циклона (см. рис. 1.9).

$$S = \frac{1}{2}(R_s + R_n)(R_w + R_e), \quad (1.24)$$

- где R_s – Расстояние от центра циклона до его южной границы, км;
 R_n – Расстояние от центра циклона до его северной границы, км;
 R_w – Расстояние от центра циклона до его западной границы, км;
 R_e – Расстояние от центра циклона до его восточной границы, км;
 S – Площадь циклона

Такое приближение весьма грубо, но так как мы рассматриваем режим изменения циклонических характеристик, эта «грубость» оправдана.

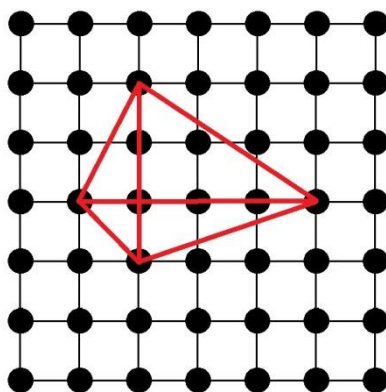


Рисунок 1.9 – Пример разбиения циклона на треугольники для оценки его площади

Для более наглядного представления рассчитанной величины полученная площадь представлялась в виде окружности с радиусом $R_{эф}$. Эффективный радиус циклона ($r_{эф}$) – величина, значение которой удобнее представить нежели площадь, рассчитывался следующим образом:

$$R_{эф} = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (1.25)$$

где S – площадь циклона.

Объем переносимого циклоном приземного воздуха вычислялся как объем конуса.

$$V = \frac{Sh}{3}, \quad (1.26)$$

где S – площадь циклона,

h – высота.

$$h = \frac{dz}{dP} (Pg - Pc), \quad (1.27)$$

где Pg – минимальное давление на границе циклона,

Pc – давление в центре циклона.

Полученная разность умножается на 8 м/гПа в виду того, что в соответствии с барической ступенью давление уменьшается на 1 гПа при подъеме приблизительно на 8 м. Безусловно, это величина зависит от температуры и разнится в разных широтах, но в данной работе было взято ее среднее значение.

1.4 Метод оценки глубины циклонов и индекса циклонической активности

В ходе исследования был рассчитан индекс циклонической активности (*Cyclone activity index - CAI*) [67,74]. Для каждой точки, которая была идентифицирована как центр циклона, *CAI* определялся как разница между давлением в центре циклона и климатологическим среднемесячным значением давления в этой точке. Эти значения суммировались для каждого месяца каждого года.

$$CAI = \overline{P_c - P_{climate}}_{\text{циклон}}^{\text{month}}, \quad (1.28)$$

где $P_{climate}$ – климатическое значение давления в узле, соответствующем центру циклона;

P_c – давление в центре циклона.

Аномалия величины циклонической активности (отклонение от среднего) рассчитывалась как разница между индексом циклонической активности в заданном месяце и климатологическим средним той же величины, рассчитанной для заданного месяца.

$$AnCAI = CAI_{\text{month}} - \overline{CAI} \quad (1.29)$$

Климатологическое значение давления в каждом узле рассчитывалось как среднее значение давления в этой точке в анализируемом месяце за 66 лет для реанализа NCEP/NCAR и за 36 лет для реанализа ERA-INTERIM. Так как в обоих случаях ряд данных составляет более 30 лет, это позволяет использовать осредненные среднемесячные данные в качестве климатических [100].

Также рассчитывалось величина нормированной аномалии циклонической активности. Нормирование проводилось на модуль величины максимального отклонения от нормы.

$$AnCAI_{NORM} = \frac{AnCAI}{|AnCAI|_{max}} \quad (1.30)$$

Для оценки глубины циклонов, т.е. величины атмосферного давления в их центре, и ее изменения во времени определялось значение в каждой точке, идентифицированной в качестве центра циклона. Для того, чтобы проанализировать как менялась средняя глубина циклонов с течением времени, был рассчитан так называемый «средний» циклон для каждого месяца. Для этого значения давления во всех точках, которые являлись центром идентифицированного циклона, складывались и делились на общее количество циклонов в заданном месяце заданного года.

$$P_{сmon} = \frac{\sum P_{i,j}}{N}, \quad (1.31)$$

где $P_{сmon}$ – давление в «среднем» циклоне в каждом месяце;
 N – количество идентифицированных циклонов;
 $P_{i,j}$ – давление в центре идентифицированного циклона

Таким образом, для каждого месяца каждого года находилось среднее давление в циклоне за этот период ($P_{сmon}$). Аномалия величины средней глубины циклона ($AnP_{сmon}$) рассчитывалась как разница между средним давлением в циклоне в заданном месяце и климатологическим средним той же величины, рассчитанной для заданного месяца.

$$AnP_{сmon} = P_{сmon} - \overline{P_{сmon}} \quad (1.32)$$

Нормированное значение вычислялось как отношение аномалии средней глубины циклона к модулю максимальной аномалии той же величины.

$$AnP_{\text{смон}}_{\text{NORM}} = \frac{AnP_{\text{смон}}}{|AnP_{\text{смон}}|_{\text{max}}} \quad (1.33)$$

1.5 Исследование рядов на скрытые циклы колебаний

Условием объективного анализа многолетних закономерностей является изучение частотной структуры происходящих колебаний. Для исследования полученных временных рядов количества циклонов и индекса циклонической активности на скрытые колебания, указанные ряды были подвергнуты вейвлет-анализу, являющимся мощным средством спектрального анализа динамики системы.

Термин «вейвлет» был введен в 80-х годах XX века. Сегодня этот вид анализаторов стал одним из необходимых математических инструментов. Вейвлет-преобразование или, по-другому, дискретное волновое преобразование, будучи более современным методом анализа частотно-временных характеристик систем нежели анализ Фурье, возникло сравнительно недавно и сегодня привлекает все большее внимание исследователей. Если говорить о причинах, почему в данной работе предпочтение было отдано именно вейвлет-анализу, то хорошо известен тот факт, что анализ Фурье (значимость и привлекательность которого проверены временем) хотя и позволяет выделить существующие колебания, но не позволяет получить исследователю полную информацию о локализации сигнала, если он нестационарный. Если говорить об оконном преобразовании Фурье (анализ не по всему временному интервалу, а в заданном диапазоне), то здесь улучшение разрешения метода в частотном диапазоне ведет к ухудшению временного разрешения, т.е. данный метод малоэффективен для анализа сигналов, частотные характеристики которых меняются с течением времени и нет априорной информации об анализируемом процессе. Таким образом, анализ Фурье дает только глобальные сведения об исследуемых частотах, а потому

эффективен для анализа частотных характеристик сигналов, состав которых не меняется с течением времени.

При вейвлет-преобразовании производится разложение по вейвлетам, получающимся сдвигом материнского вейвлета, который в свою очередь получен переходом от Фурье-преобразования [115]. За счет изменения масштабов вейвлеты позволяют выявить различия в характеристиках на разных шкалах, сдвиг позволяет проанализировать сигнал в разных точках на всем исследуемом интервале.

Основным отличием вейвлет-преобразования является разложение данных не по синусоидам (как для преобразования Фурье), а по другим функциям, называемым вейвлет-образующими.

$$\psi(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t)e^{-i(\pi f)t} dt \quad (1.34)$$

Вейвлет-образующие функции, в противоположность бесконечно осциллирующим синусоидам, локализованы в некоторой ограниченной области своего аргумента, а вдали от нее равны нулю или ничтожно малы. Согласно своему математическому смыслу вейвлет-спектр имеет не один аргумент, а два. Помимо частоты (a) присутствует второй аргумент (b), который описывает локализацию вейвлет-образующей функции во времени. Поэтому b имеет ту же размерность, что и x . Таким образом, переменная a соответствует периоду анализируемого сигнала, переменная b задаёт его временную локализацию. В результате появляется возможность анализировать свойства сигнала как в физическом пространстве (координата и время), так и в частотном. Вейвлет-преобразование позволяет выявлять как колебания с хорошо фиксированным периодом, так и нестандартные осцилляции, которые локализованы лишь периодически.

Согласно определению, вейвлет-спектр является следующим интегралом от произведения вейвлет-образующей функции $\psi(a,b)$ и сигнала $y(x)$:

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} (y(x)\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)) dx \quad (1.35)$$

Итак, вейвлет-преобразование $W(a,b)$ принципиально отличается от преобразования Фурье тем, что двухпараметрическая вейвлет-образующая функция $\psi(a,b)$ хорошо локализована как по частоте, так и по времени. Поэтому вейвлет-разложение оказывается особенно полезным для исследования нестационарных процессов и является по сути спектральным анализом локальных (непродолжительных по времени) возмущений [101].

В данном исследовании в качестве материнского вейвлета использовался вейвлет Морле

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} e^{i\omega t} \quad (1.36)$$

Следует подчеркнуть, что несмотря на то, что вейвлет-анализ – анализатор довольно мощный, он позволяет лишь распознать некоторые скрытые характеристики сигнала, не позволяя при этом объяснить лежащую в их основе природу. Однако этот метод – весьма перспективный и, пожалуй, самый современный инструмент анализа, который идеален при изучении процессов, связанных со взаимодействием в различных масштабах.

2 Характеристики циклонов на основе реанализа NCEP/NCAR.

2.1 Анализ количества циклонических ситуаций.

В ходе работы было рассчитано суммарное количество циклонических ситуаций за каждый месяц года всего исследуемого периода и общегодовое их количество как в северном, так и в южном полушариях. В качестве порогового давления сначала использовалось значение 1015 гПа и рассматривалась область севернее 20° с.ш. и южнее 20° ю.ш., т.е. рассматривались только внетропические циклоны. Временной ход годового количества циклонических ситуаций представлен на рисунке 2.1.

Анализ временного хода количества циклонических ситуаций позволяет говорить о том, что временная динамика количества циклонов на протяжении последних 66 лет в северном и южном полушариях различна. Количество циклонических ситуаций в южном полушарии в течение всего анализируемого периода увеличивается, причём до 80-х годов годовое количество практически не менялось год от года (коэффициент линейного тренда приблизительно равен нулю). Начиная с конца 80-х годов, количество циклонических ситуаций в южном полушарии увеличивается.

Временная изменчивость годового количества циклонических ситуаций в северном полушарии носит более сложный характер – наряду с мелкомасштабными колебаниями четко различимо колебание с периодом приблизительно 60 лет. Описание колебания с таким периодом часто встречается в научной геофизической литературе. Самое популярное объяснение этому колебанию – 60-летнее колебание уровня Мирового океана, которое частично может быть описано с использованием индекса Атлантического мульти-декадного колебания (АМО) [74,116-119]. На рисунке 2.2 приведено скользящее среднее временного хода индекса АМО с окном

осреднения в 11 лет для среднегодовой аномалии индекса АМО с 1860 по 2009 года.



Рисунок 2.1 – Изменение суммарного количества циклонических ситуаций в северном и южном полушариях

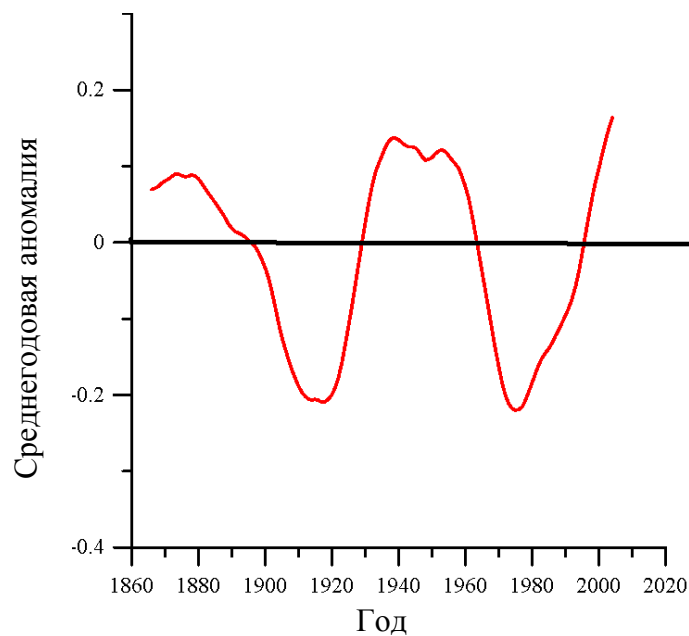


Рисунок 2.2 – Временной ход осреднённого индекса АМО

Атлантическое мульти-декадное колебание определяется через долгопериодное изменение температуры поверхности воды в северной части Атлантического океана, с холодными и теплыми фазами, длительность которых составляет 20-40 лет, а разница температур между экстремумами – 1⁰С. Считают, что АМО оказывает влияние на температуру воздуха и интенсивность осадков на большей части северного полушария. В период теплой фазы АМО число тропических штормов по интенсивности достигающих уровня ураганов значительно больше, чем при холодной фазе [93].

В нашем анализе циклонических режимов не учитываются тропические ураганы, но связь с Атлантическим колебанием прослеживается четко. Видно, что временной ряд количества циклонических ситуаций в северном полушарии находится в фазе с Атлантическим мульти-декадным колебанием с некоторым запаздыванием, то есть при тёплой фазе АМО увеличивается количество внетропических циклонов. В пункте 2.8 подробно проанализирована корреляционная связь между АМО и количеством циклонов северного полушария.

Из-за небольшой продолжительности временного ряда (и в данном исследовании, и в целом в мировой климатологической практике) невозможно сказать точно – является ли Атлантическое мульти-декадное колебание источником климатических изменений. Значит, нельзя сделать однозначный вывод о том, являются ли все климатические изменения последних десятилетий результатом собственных колебаний системы Земля-океан-атмосфера или же антропогенные воздействия усиливают колебание температуры Мирового океана и тем самым вызывают усиление влияния АМО на происходящие в атмосфере процессы. По мнению автора, существует совместное влияние собственных колебаний сложной динамической системы Земля-океан-атмосфера и антропогенного форсинга, который частично проявляется через естественные геофизические процессы.

Размах количества циклонов от года к году больше в северном полушарии, что можно объяснить большей поверхностью суши, а значит более часто встречающимся температурным контрастом суша-море. Если же считать, что на количество циклонов оказывает влияние антропогенный фактор, то большая изменчивость в северном полушарии также объяснима большим развитием промышленности именно в этом полушарии.

Если говорить об обоих полушариях в целом, то само по себе количество циклонов нельзя однозначно связать с происходящими глобальными изменениями. В качестве гипотезы можно предположить, что потепление или похолодание определяется средним положением арктического (антарктического) и полярного фронтов. В свое время известный советский климатолог Алисов Б.П. предлагал определять климатические зоны по среднему положению климатологических фронтов [5]. Циклоны формируются на атмосферных фронтах, располагающихся вдоль стратосферных струйных течений. Соответственно смещение фронтальных зон определяется положением атмосферных струйных течений, механизм смещения которых изучен недостаточно.

Принято считать, что первое потепление происходило с 20-х до 40-х годов XX века, далее шел спад глобальной температуры, приблизительно до 1975 года и с 1985 года глобальная температура воздуха снова увеличивалась [120]. Изменения количества циклонов в южном (в меньшей степени) и северном полушарии можно связать с повышением глобальной температуры атмосферы – значительные (в северном полушарии) изменения заметны только в последнее десятилетие.

Для того чтобы точнее понять, насколько значимые изменения происходили в атмосфере, все численные эксперименты по идентификации циклонов и их анализу проводились в трёх вариантах: для всего временного ряда, а также для его частей до 1980 года и после него. Временной ряд (в трёх вариантах) аппроксимировался прямой, и были рассчитаны коэффициенты

линейных трендов. Для определения значимости трендов количества циклонов на основе t -статистики Стьюдента была оценена их достоверность. Так как коэффициент линейного тренда очень чувствителен к начальной и конечной точке аппроксимируемого ряда, были рассчитаны коэффициенты скользящих линейных трендов тридцатилетних периодов. Такая длина анализируемого ряда выбрана в виду того, что согласно [100] временной ряд значений метеорологических величин длиной 30 лет и более можно использовать для получения климатических характеристик. Временной ряд количества циклонов был разбит на отрезки продолжительностью 30 лет с отлчием начальной точки ряда в 1 год, т.е. анализировались временные ряды с 1948 по 1978 года, 1949 по 1979 года и т.д. Последний временной отрезок от 1984 до 2014.

Для оценки тренда сначала вычисляется коэффициент корреляции между линейной аппроксимацией временного ряда и фактическим рядом, после этого оценивается значимость найденного коэффициента корреляции, это значение и считается значимостью коэффициента линейного тренда. Для оценки значимости необходимо рассчитать коэффициент корреляции, а также знать длину ряда и необходимый уровень значимости. В нашем случае уровень значимости составлял 99.5%.

Коэффициенты корреляции между линейной аппроксимацией временного ряда (предиктантом) и фактическим рядом (предиктором) рассчитывались по следующей формуле

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (2.1)$$

где X_i – текущие значения аппроксимирующего ряда;

Y_i – текущие значения аппроксимируемого ряда;

\bar{X} – среднее значение за рассматриваемый месяц и период

аппроксимирующего ряда;

\bar{Y} – среднее значение за рассматриваемый месяц и период
аппроксимируемого ряда;

N – количество лет в выбранном периоде наблюдений – 30 лет.

Критическое значение коэффициента корреляции ($r_{кр}$) рассчитывалось по формуле

$$r_{кр} = \frac{t_{\beta}}{(n-2+t_{\beta}^2)^{0.5}}, \quad (2.2)$$

где $r_{кр}$ – Критическое значение коэффициента корреляции;

t_{β} – критерий Стьюдента при уровне значимости $(1 - \beta)$;
 $\beta=0.995$

$n - 2$ – число степеней свободы, $n - 2=28$.

Если значение коэффициента корреляции (2.1) оказывалось выше, чем критическое значение (2.2), то коэффициент считался значимым, то есть условие значимости имеет вид

$$|r| \geq |r_{кр}| \quad (2.3)$$

Скользящие коэффициенты линейного тренда представлены на рисунке 2.3. Одна точка на графике соответствует коэффициенту линейного тренда

Тридцатилетний период на графике начинается от года, к которому относится точка на графике. Цифры над каждой точкой показывают значимость коэффициента линейного тренда: 1 – коэффициент значим, 0 – коэффициент не значим.

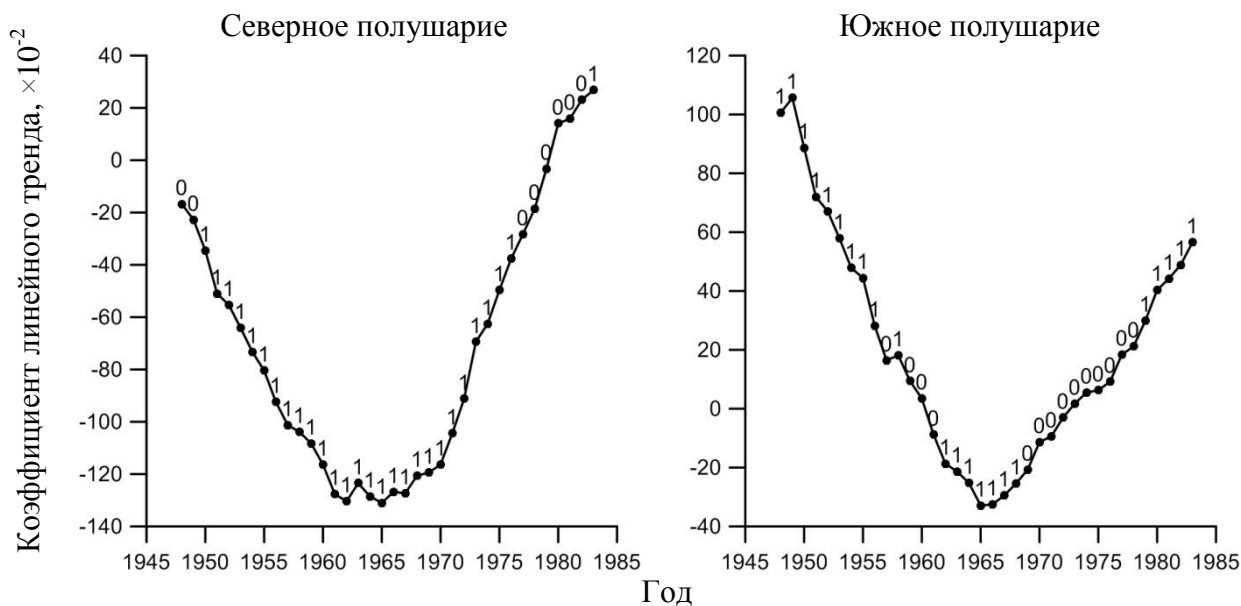


Рисунок 2.3 – Скользящий коэффициент линейного тренда и его значимость для общегодового количества циклонов в северном и южном полушарии

Из анализа полученных коэффициентов линейного тренда видно, что внутренняя динамика процессов, происходящих в южном и северном полушариях одинакова – начиная с периода 1965 – 1985 год появляется положительная тенденция в изменчивости количества циклонов. Уменьшение количества циклонов было сильнее в северном полушарии, а современное увеличение ярче проявляется в южном полушарии. На основании корреляционного анализа также можно говорить о наличии долгопериодного колебания количества циклонов. К сожалению, исследуемый ряд слишком короток для определения периода колебания, но можно сделать довольно смелое предположение о том, что колебание имеет период около 60 - 80 лет и основным является естественное колебание в системе Земля-океан-атмосфера. Это колебание можно сопоставить с Атлантическим мульти-декадным колебанием. Если это предположение верно, то скоро можно будет ожидать уменьшение количества циклонов сначала в северном полушарии, а затем и в южном. Но такой прогноз возможен только, если основополагающим фактором является температура океана, а не антропогенный форсинг. Хотя может быть

более сложная динамика исследуемых процессов, и именно атмосферный форсинг является тем процессом, который влияет и на Атлантическое мультидекадное колебание и на количество циклонов. Дальнейшие исследования позволяют сделать именно этот вывод.

В ходе работы было рассчитано не только общегодовое количество циклонов, но и их суммарное количество за каждый месяц года всего исследуемого периода в каждом полушарии. В результате анализа временных рядов суммарного количества циклонических ситуаций в месяц можно сделать вывод о том, что сезонная динамика месячного количества циклонов такая же как и для годового количества циклонов, за исключением одного месяца – февраля. Коэффициенты скользящего тридцатилетнего линейного тренда для февраля (исключительная ситуация) и апреля (характерная ситуация) представлены на рисунке 2.4. Значимость коэффициентов ниже, чем при исследовании общегодового количества, а для февраля коэффициент линейного тренда практически не значим. Как будет видно в дальнейшем, характеристики циклонических режимов февраля очень часто не соответствуют среднему значению.

В южном полушарии ситуация похожая, только значимость коэффициентов линейного тренда ниже, чем для годовых значений и для аналогичных коэффициентов, полученных для северного полушария. Исключительным месяцем является июль, как и февраль – второй месяц холодного сезона года.

Если говорить о сезонности изменения количества циклонов, то с декабря по февраль общее количество циклонов больше в северном полушарии, чем в южном. Большее количество циклонов в северном полушарии наблюдается в холодный период года. Однако если в северном полушарии в эти месяцы их количество стремительно уменьшается в последние десятилетия, то в южном наоборот растет. С марта по май циклонов больше в южном полушарии, но здесь темпы изменения их количества:

увеличения (в южном) или уменьшения (в северном) не так велики. Эта же тенденция сохраняется и в тёплый период года северного полушария – с июня по октябрь. Октябрь и ноябрь интересны тем, что в начале периода количество циклонов было больше в северном полушарии, но интенсивный рост их количества в южном и стремительное уменьшение в северном в 50-х годах привели к тому, что сейчас в южном полушарии отмечается большее количество барических депрессий в этот сезон.

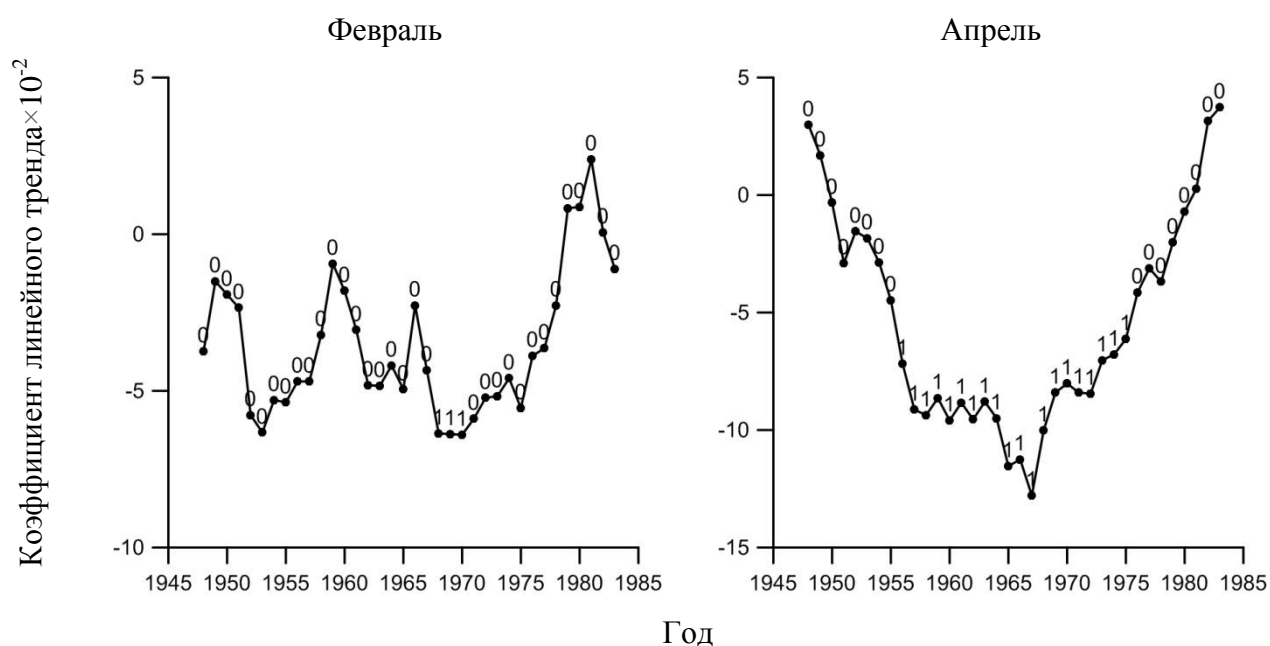


Рисунок 2.4 – Скользящий коэффициент тридцатилетнего линейного тренда и его значимость в северном полушарии для февраля (исключительная ситуация) и апреля (характерная ситуация)

В южном полушарии циклонов больше, чем в северном, однако, если в южном полушарии их количество в последние десятилетия увеличивается, то в северном нельзя делать однозначного вывода об их увеличении после 1980 года в виду статистической незначимости полученных характеристик.

2.2 Исследование глубины циклонов по данным реанализа NCEP/NCAR

Для исследования глубины циклонов исследовалось среднее давление в центре циклона, которое рассчитывалось следующим образом: за все сроки наблюдений для каждого месяца каждого года усреднялось давление в узле сетки, идентифицированном в качестве центра циклона. Анализ был проведён для обоих полушарий. После того как среднее значение в циклонах в каждом месяце каждого года было найдено, из полученных двенадцати значений отбиралось минимальное и максимальное, определялся месяц, в котором эти экстремальные (минимальные / максимальные) значения наблюдались. Таким образом, на выходе имелась две величины минимального и максимального среднемесячного давления в центре циклона. Далее в тексте мы будем называть эти значения «минимальным давлением в циклоне» и «максимальным давлением в циклоне». Временной ход «минимального» и «максимального» среднегодового значения давления в циклонах северного и южного полушарий представлен на рисунке 2.5.

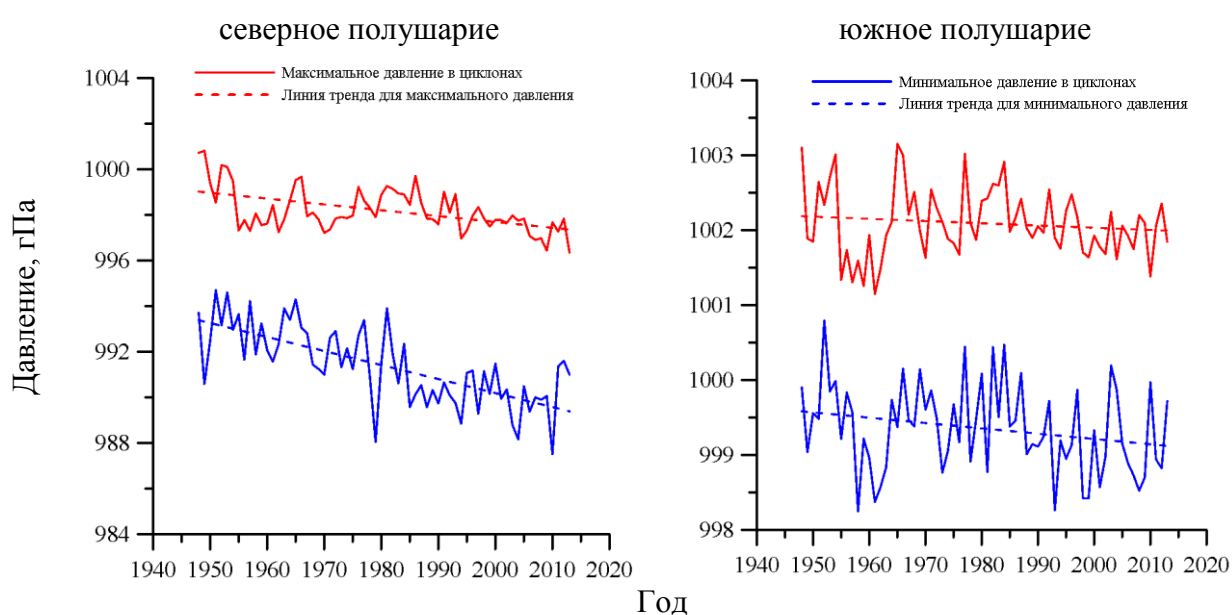


Рисунок 2.5 – «Минимальное» и «максимальное» значение давления в циклонах северного и южного полушарий

В северном полушарии колебания экстремальных значений давления (размах) сильнее, чем в южном – амплитуда колебания «максимального» давления составляет 4.5 гПа (от 996.3 в 1994 году до 1000.8 гПа в 1995 году), а «минимального» - 7.2 гПа (от 987.5 в 2010 году до 994.7 гПа в 2011 году). В южном же полушарии изменения более гладкие, амплитуда колебания «максимального» давления составляет 2 гПа (от 1001.1 гПа до 1003.1 гПа), «минимального» - 2.6 гПа (от 998.2 до 1000.8 гПа). Сама разница между «максимальным» и «минимальным» давлением в северном полушарии больше. Кроме того, как следует из анализа результатов, в северном полушарии циклоны существенно глубже, чем в южном. В северном полушарии с течением времени прослеживается тенденция к увеличению разницы между максимальным и минимальным давлением. В целом можно сделать вывод о том, что циклоны и в северном и в южном полушариях углубляются, при этом углубление циклонов в северном полушарии значительнее.

Для исследования сезонного хода экстремальных значений давления в центре циклона была проанализирована кривая распределения экстремумов по месяцам. Гистограмма распределения частоты наблюдения экстремальных значений по месяцам в северном полушарии представлена на рисунке 2.6.

Проведённый анализ позволяет говорить о том, на какие месяцы чаще приходится экстремальные значения давления – циклоны с экстремально низким давлением в северном полушарии чаще отмечаются в холодный период года, в феврале и марте. Наименее глубокие циклоны, с давлением меньше всего отличающиеся от климатической нормы, в большинстве своем отмечаются в тёплый период года, а максимальное их количество наблюдается в июле и августе.

Если, как и раньше, отдельно рассмотреть период до 1980 года и после, то максимум повторяемости наиболее глубоких циклонов в северном полушарии в последние десятилетия переместился на весенние месяцы: до глобального потепления самые глубокие циклоны наблюдались в январе,

феврале, а сейчас самые глубокие циклоны наблюдаются в феврале и марте. Как уже отмечалось ранее, самым аномальным месяцем в последние десятилетия является февраль. Сдвинулся с августа на июль и максимум повторяемости самых близких к климатической норме циклонов. Само же распределение стало обладать меньшей дисперсией, частота повторяемости близких к климатической норме циклонов выросла в два раза (см. рисунки 2.7 и 2.8).

В южном полушарии самые глубокие циклоны, как правило, наблюдаются в теплый период года, чаще всего в январе. Наименее глубокие циклоны в большинстве своем отмечаются в холодный период, а их максимум чаще всего приходится на апрель и май.

В южном полушарии изменения в сезонности наблюдения экстремальных значений до и после 1980 годов менее заметны. Частота появления наиболее и наименее глубоких циклонов осталась прежней, прежними остались и месяцы, в которые они встречаются.

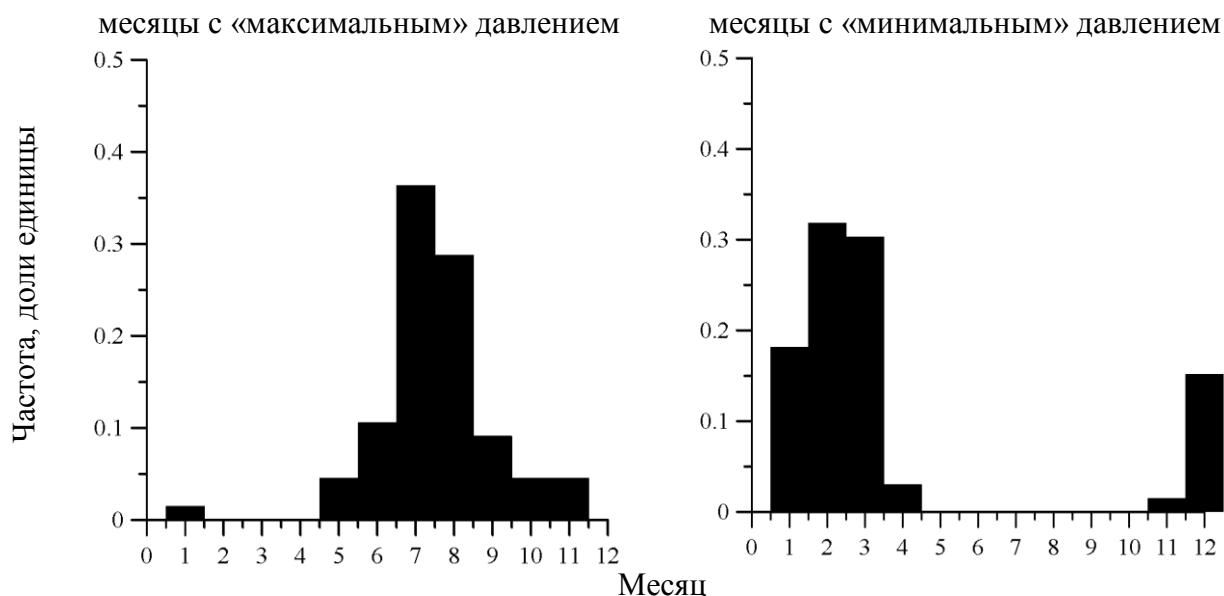


Рисунок 2.6 – Частота встречаемости «минимального» (правая панель) и «максимального» (левая панель) среднего давления в циклонах северного полушария

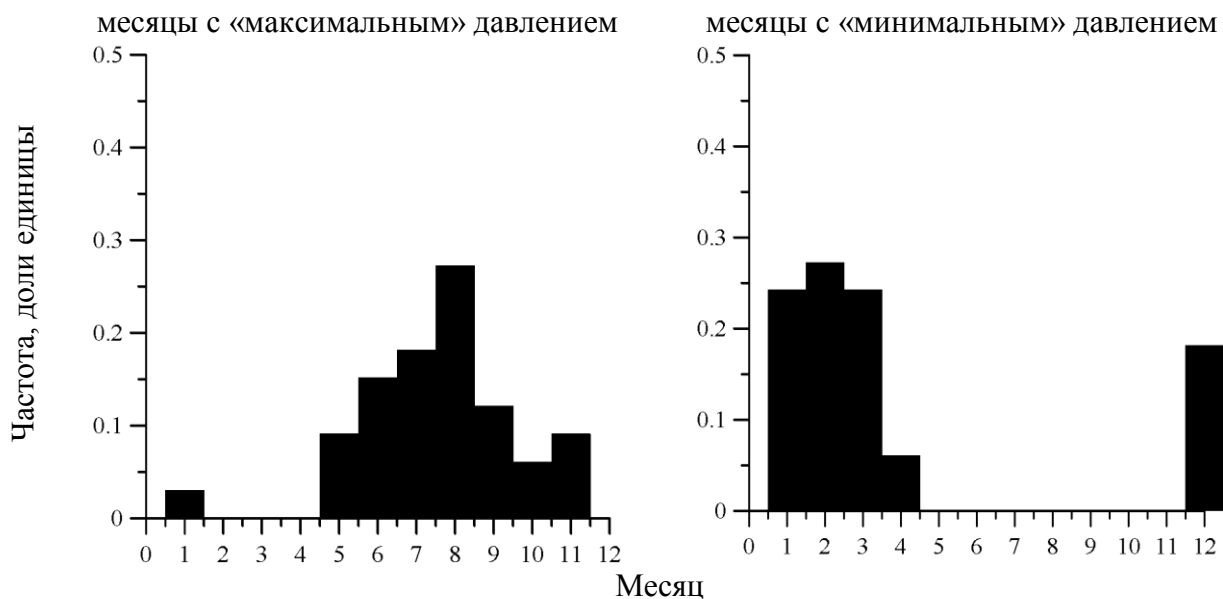


Рисунок 2.7 – Частота повторяемости «минимального» (правая панель) и «максимального» (левая панель) среднемесячного давления в циклонах в северном полушарии до 1980 г.

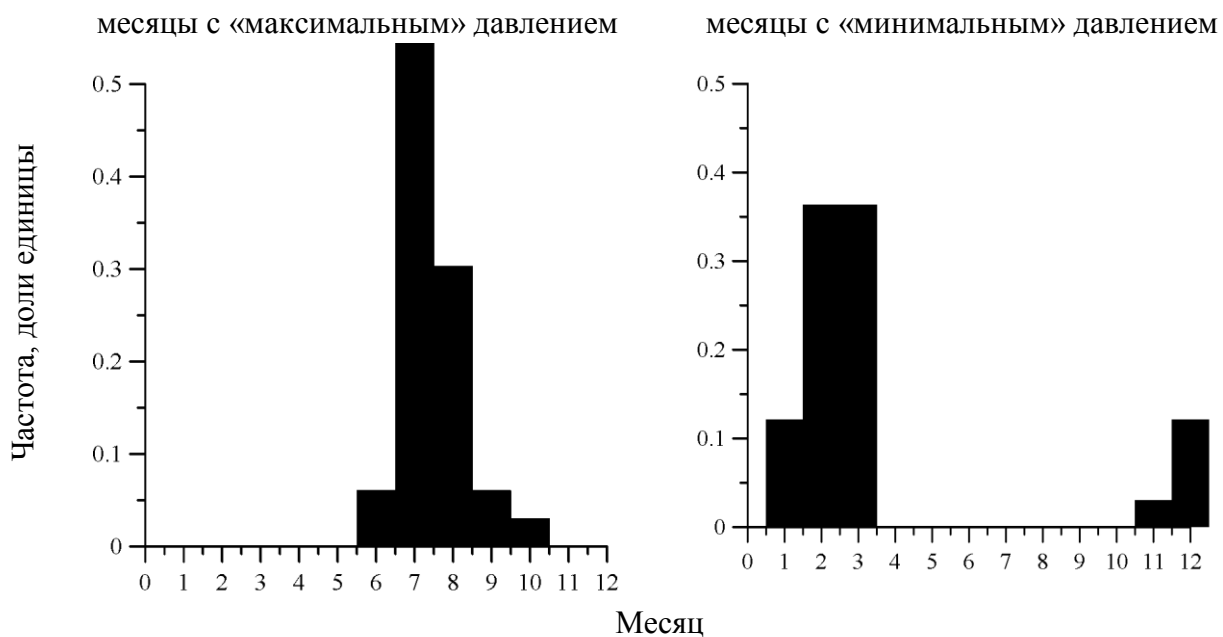


Рисунок 2.8 – Частота повторяемости «минимального» и «максимального» (левая панель) среднемесячного давления в циклонах в северном полушарии с 1980 г.

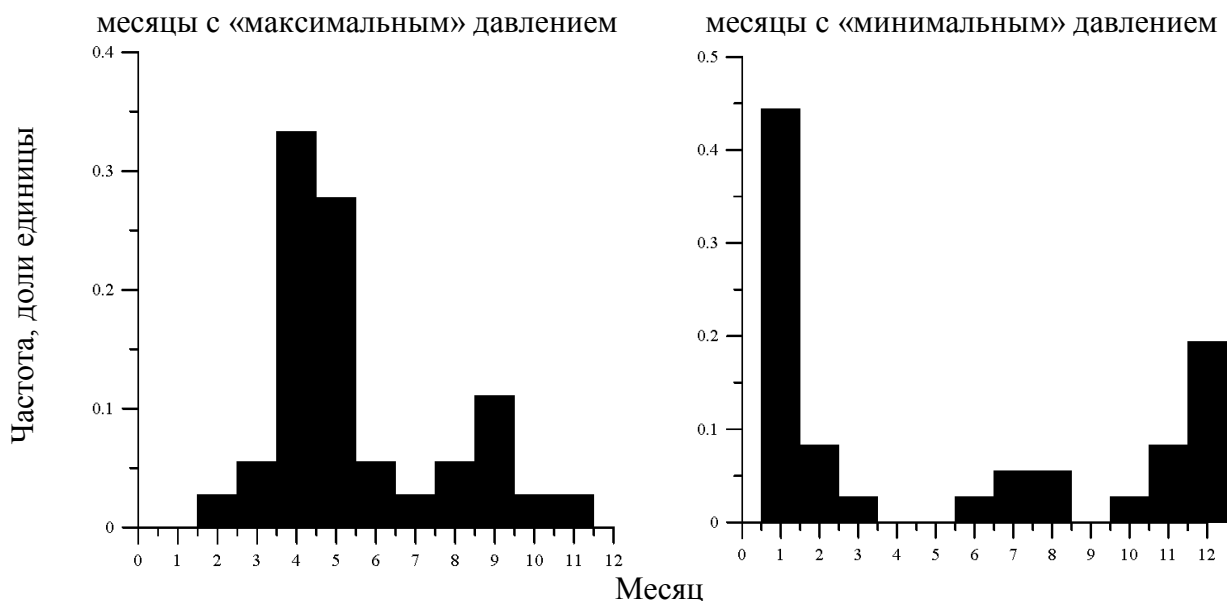


Рисунок 2.9 – Частота повторяемости «минимального» (правая панель) и «максимального» (левая панель) среднемесячного давления в циклонах в южном полушарии

2.3 Исследование площади циклонов по данным реанализа NCEP/NCAR

По методике, описанной в пункте 1.3, была рассчитана площадь каждого идентифицированного циклона. Для большей наглядности анализа площадей циклонов анализировались нормированные значения аномалий площади каждого циклона. Расчет происходил в два этапа: сначала рассчитывалось среднемесячное значение, затем находилась аномалия относительно среднего значения площади циклонов в этом полушарии за весь исследуемый период, а далее проводилась нормировка на величину максимальной аномалии.

Также анализировалось, в каком месяце аномалии площади циклонов были наибольшими или наименьшими. Гистограммы распределения величины аномалий по месяцам представлены на рисунках 2.10-2.11.

В северном полушарии максимальная аномалия площади циклонов наблюдается в холодный период года (январь и март), минимальная – в тёплый период года (июль).

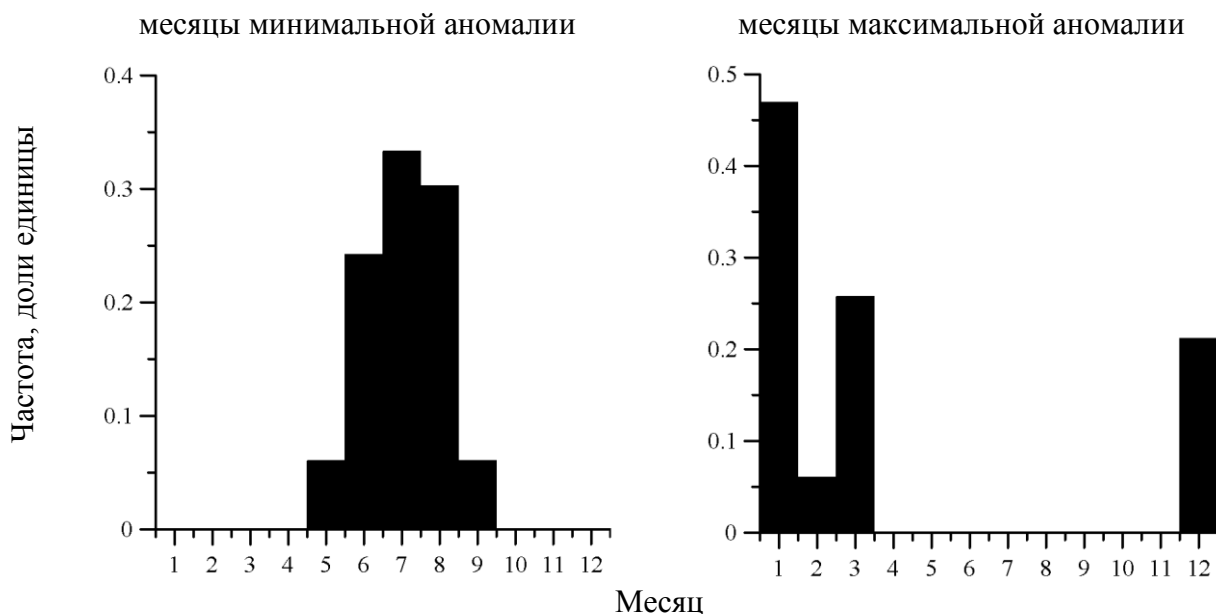


Рисунок 2.10 – Частота повторяемости максимальных (правая панель) и минимальных аномалий (левая панель) площади циклонов в северном полушарии

Если анализируемый временной ряд, как и раньше, разделить на два – до 1980 года и после, то циклоны с наибольшей аномалией площади всегда встречаются в январе и частота их повторяемости сильно не изменяется во времени. Что касается циклонов с минимальной аномалией, то если в первый отрезок ряда они одинаково часто встречались в июле и августе, то в последние десятилетия максимум повторяемости отмечается в июле. Кроме того, возросла и частота повторяемости циклонов с минимальными аномалиями площади, то есть «средних» циклонов.

В южном полушарии максимальные аномалии площади циклонов наблюдаются в холодное время года (максимум приходится на июль и август), минимальные же аномалии площади чаще всего наблюдались в феврале.

Что касается изменений, произошедших после 1980 года в южном полушарии, то месяцы, в которые наблюдаются циклоны с минимальной площадью, достаточно стабильны, частота повторяемости осталась прежней. Однако с экстремальными циклонами произошли изменения. Если до 1980 года

максимальная аномалия площади циклонов отмечалась в августе, то после 1980 года максимум почти с такой же частотой стал наблюдаться в июле и марте. И если смещение на июль можно объяснить тем, что это месяцы схожи между собой по климатическим характеристикам, то появление в этой статистике марта особенно интересно. По мнению автора, показательны для последних десятилетий именно изменения в переходные месяцы (в северном полушарии большие циклоны стали чаще наблюдаться также в марте).

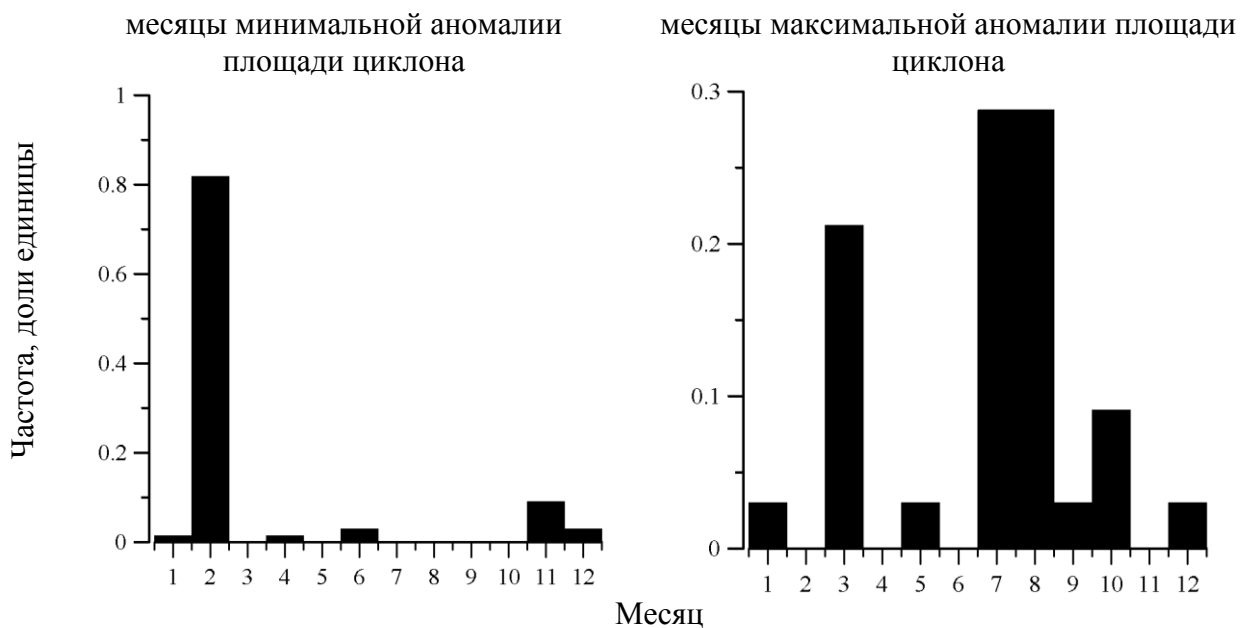


Рисунок 2.11 – Частота повторяемости максимальных и минимальных аномалий площади циклонов в южном полушарии

2.4 Исследование объема переносимого циклонами приземного воздуха на основе данных реанализа NCEP/NCAR

Объем переносимого циклонами приземного воздуха рассчитывался согласно методике, описанной в п. 1.3. В годовом ходе переноса приземного воздуха сложно выделить какой-либо годовой ход (рисунок 2.12). В северном полушарии максимальные аномалии объема отмечаются в январе, марте и августе – месяцах очень разных по своим характеристикам. Минимальное же

значение аномалии переносимого воздуха отмечается в апреле и, немногим реже, в феврале и ноябре.

В южном полушарии (рисунок 2.13) минимальная аномалия объема переносимого приземного воздуха чаще наблюдается в феврале. В максимальных же аномалиях объема сложно выделить какой-либо годовой ход – почти с одинаковой частотой здесь можно выделить апрель, май, июнь и сентябрь.

2.5 Исследование циклонической активности на основе данных реанализа NCEP/NCAR

Индекс циклонической активности (CAI), рассчитываемый по формуле (1.14), очень сложная и неоднозначная для анализа величина. Индекс CAI зависит от глубины циклона относительно климатической нормы и повторяемости циклонов в данной точке земного шара. Следовательно, высокие значения индекса циклонической активности CAI могут быть обусловлены как частотой циклонических ситуаций, так и экстремальностью значения давления в центре конкретного циклона. Причем важно не само значение давления, а именно отклонение от среднего в данном узле сетки.

В северном полушарии в большинстве анализируемых ситуаций индекс циклонической активности имеет отрицательное значение, при этом по абсолютной величине индекс увеличивается. Это означает, что за исследуемый период увеличилась «циклоничность» процессов синоптического масштаба в атмосфере северного полушария. В последнее десятилетие отношение циклонов, в которых давление ниже климатического среднего в точке к числу всех идентифицированных циклонов составляет примерно 75%, то есть наблюдается увеличение количества глубоких циклонов.

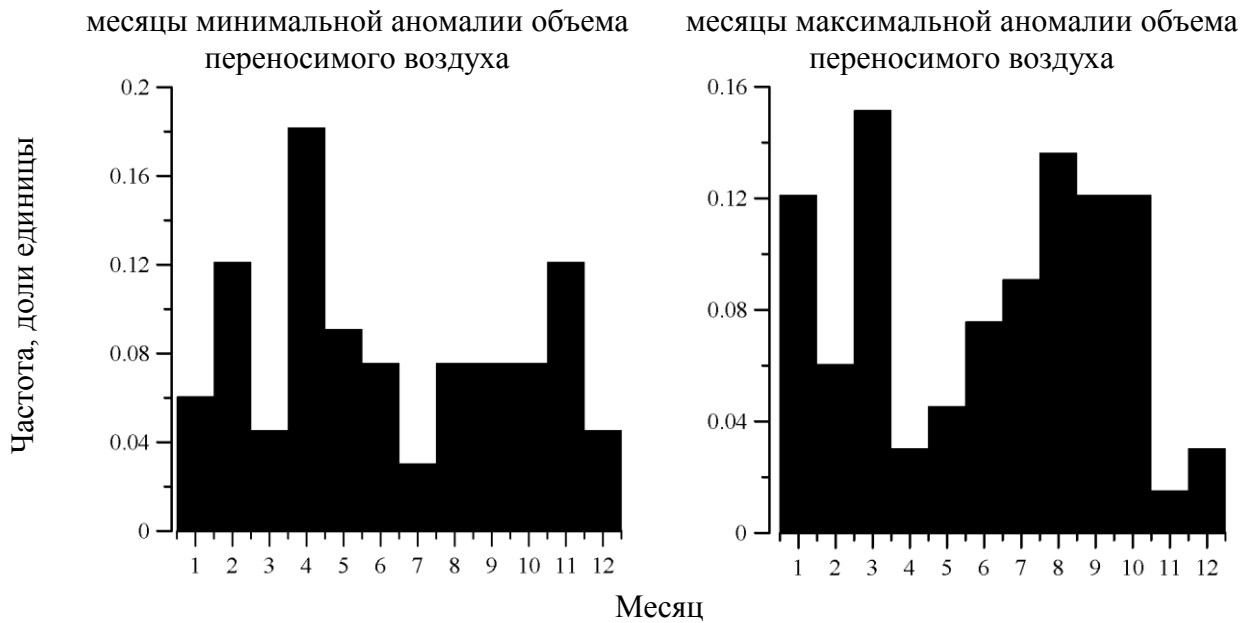


Рисунок 2.12 – Частота повторяемости максимальной (правая панель) и минимальной (левая панель) аномалии объема переносимого воздуха в северном полушарии

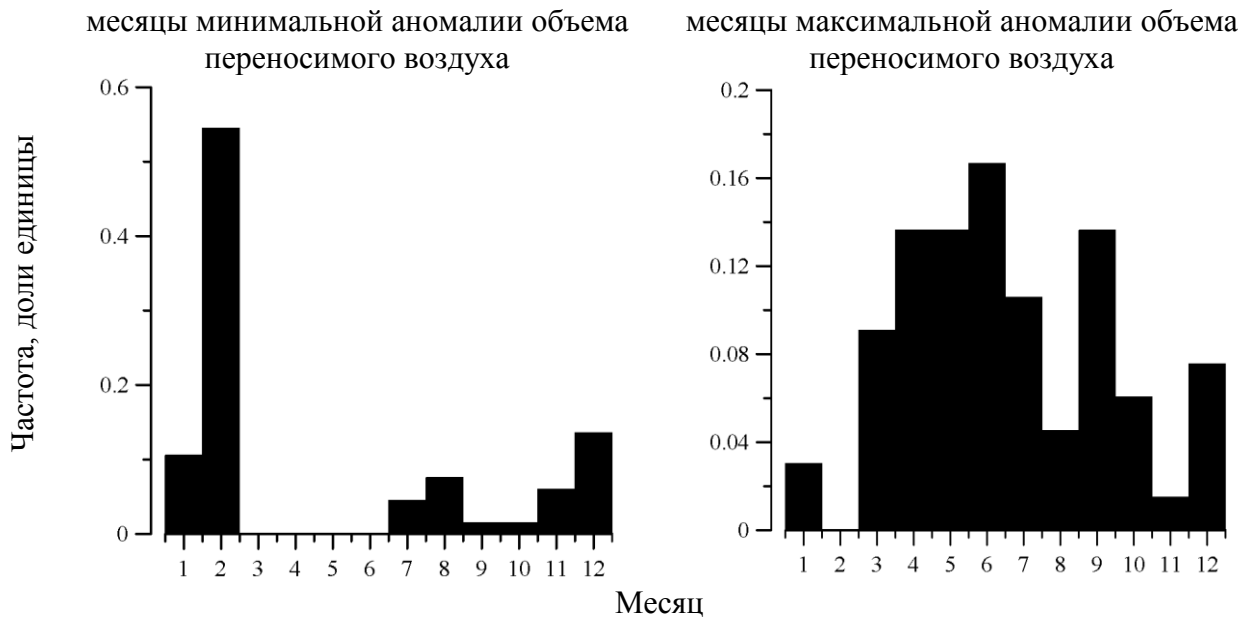


Рисунок 2.13 – Частота повторяемости максимальной (правая панель) и минимальной (левая панель) аномалии объема переносимого воздуха в южном полушарии

Наиболее часто средний циклон (малые аномалии) в северном полушарии отмечается в июле, что означает, что именно в этом месяце реже

всего наблюдаются аномалии, как в давлении в центре циклона, так и в частоте появления циклонических ситуаций. Максимальная аномалия, т.е. наиболее глубокие относительно климатической нормы в данной точке циклоны, чаще всего наблюдаются в холодное время года, большинство случаев приходится на январь и февраль (рисунок 2.14).

Если проанализировать индекс циклоничности САИ до 1980 года и после, то можно заметить, что хотя сохраняется общий характер изменений – отрицательный тренд и отрицательные значения индекса САИ, но в последние десятилетия наблюдаются более резкие изменения от месяца к месяцу и большая изменчивость. Если до 1980 года размах составлял 5 гПа/месяц, то в последние десятилетия наблюдается размах в 14 гПа/месяц.

До 1980 года самая сильная циклоническая активность наблюдалась в северном полушарии в январе и феврале, а наименьшая активность – в июле. После 1980 года минимальная аномалия циклонической активности стала приходиться на июль еще чаще. Наиболее высокая частота максимальной аномалии же сместилась с января на февраль (опять февраль!).

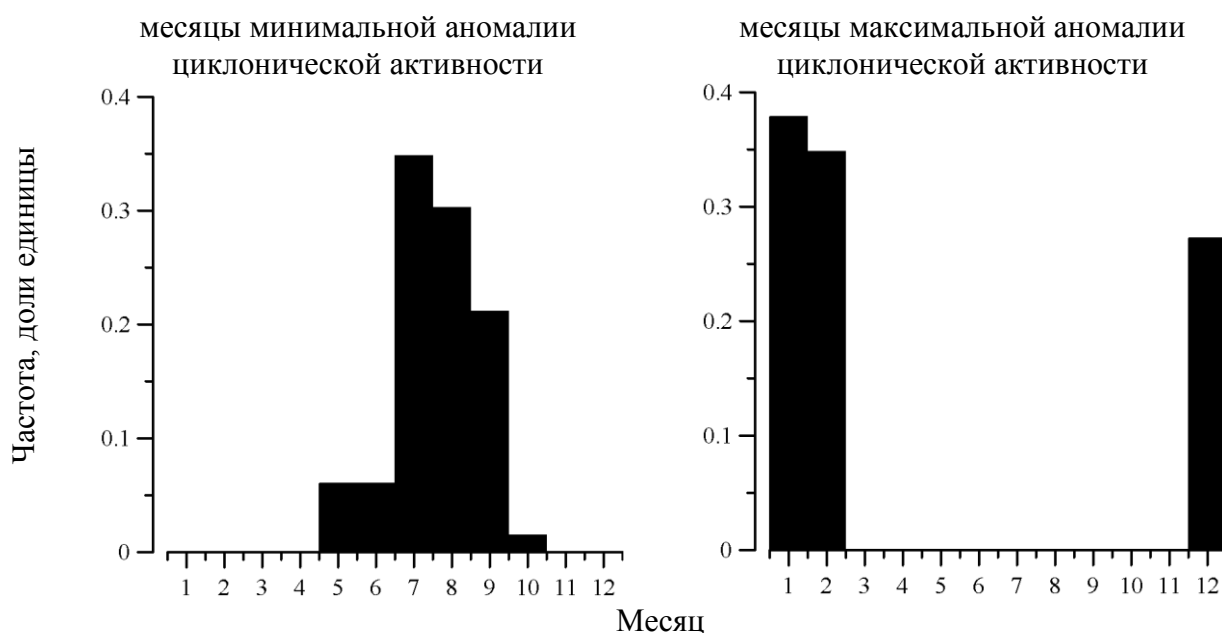


Рисунок 2.14 – Частота повторяемости максимальной и минимальной аномалии циклонической активности в северном полушарии

В южном полушарии картина совершенно другая – здесь не наблюдается практически никакого изменения индекса циклонической активности со временем. Сами значения индекса циклонической активности значительно меньше – если в северном полушарии САИ достигал значения -28 гПа в 2007, 2013 годах, то в южном полушарии самое большое по модулю значение равно -10 гПа. Приблизительно равно количество циклонов, в которых давление в центре выше нормы и ниже нормы (циклонов с давлением ниже нормы чуть больше). Наиболее часто величина минимальной аномалии циклонической активности в южном полушарии отмечается в июле – что наиболее часто в этом месяце наблюдаются близкое к среднему количеству число «средних» (с давлением близким к среднему за исследуемый период) циклонов. Максимальные аномалии индекса САИ, т.е. наиболее глубокие циклоны или более частые циклонические режимы отмечаются в декабре (см. рисунок 2.15).

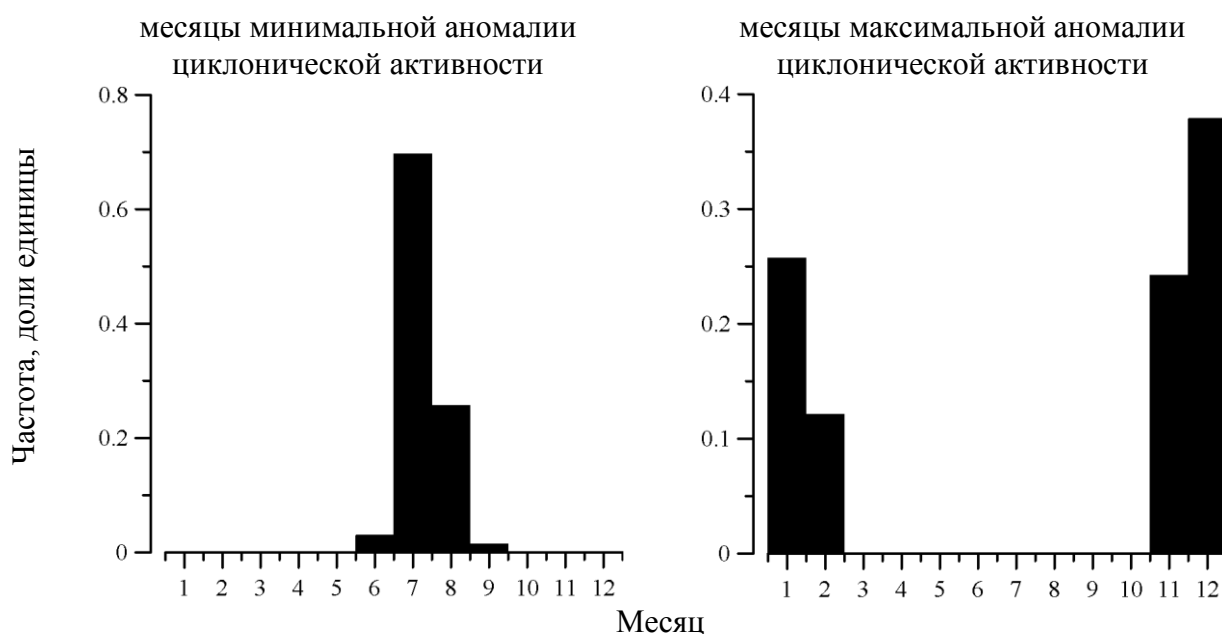


Рисунок 2.15 – Частота повторяемости максимальной и минимальной аномалии циклонической активности в южном полушарии

Малая изменчивость индекса циклонической активности в южном полушарии проявляется и в распределении по месяцам повторяемости

экстремальных значений индекса САІ. До и после 1980 года сохраняются одни и те же закономерности.

Как уже упоминалось, циклоническая активность – довольно сложный параметр, который связан как с количеством циклонов, так и с их глубиной. Для оценки обратных связей, важных для установления режимов циклонической активности, в ходе работы была проанализирована корреляция циклонической активности с количеством циклонов и с давлением в их центре. Корреляция оценивалась для сглаженных значений всех характеристик, окно осреднения составляло 3 года. Для оценки значимости коэффициента корреляции (на уровне значимости 99,5 %) применялся критерий Стьюдента.

В результате для северного полушария были получены статистические значимые коэффициенты корреляции для каждого месяца, которые приведены в таблице 2.1. Как и раньше, если в колонке значимости стоит «1» – коэффициент значим с вероятностью 99.5%, если стоит «0» – коэффициент корреляции незначим. Как видно из анализа коэффициентов корреляции, в северном полушарии циклоническая активность более обуславливается глубиной циклонов, нежели их количеством. Коэффициенты корреляции для циклонической активности и глубины циклонов являются не только статистически значимыми, но и довольно высокими. За исследуемый период отмечена корреляция от средней до высокой, наиболее сильна же она в летние месяцы

В южном полушарии коэффициенты корреляции циклонической активности и глубины циклонов заметно ниже. Кроме того, для мая и июня они статистически незначимы. Максимальных значений коэффициент корреляции между циклонической активностью и глубиной циклонов в южном полушарии достигал в переходные месяцы (март и сентябрь).

На рисунке 2.16 представлены коэффициенты корреляции циклонической активности и глубины циклонов. Пунктирными линиями обозначены значения 0.2, 0.5, 0.7 и 0.9. Если коэффициент корреляции меньше

0.2, то корреляция считается очень слабой, до 0.5 – слабой, до 0.7 – средней, больше 0.7– высокой.

Таблица 2.1–Коэффициент корреляции циклонической активности и глубины циклонов

Месяц	Коэффициент корреляции		Значимость	
	Северное полушарие	Южное полушарие	Северное полушарие	Южное полушарие
Январь	0.65	0.41	1	1
Февраль	0.81	0.64	1	1
Март	0.80	0.75	1	1
Апрель	0.68	0.72	1	1
Май	0.70	0.25	1	0
Июнь	0.88	0.18	1	0
Июль	0.90	0.35	1	1
Август	0.86	0.37	1	1
Сентябрь	0.79	0.62	1	1
Октябрь	0.61	0.86	1	1
Ноябрь	0.52	0.34	1	1
Декабрь	0.57	0.42	1	1

С количеством циклонов связь циклонической активности выражена слабее, нежели с их глубиной. Однако для северного полушария все полученные коэффициенты корреляции статистически значимы, для южного же незначимыми являются только коэффициенты корреляции для марта и октября (см. табл. 2.2, рисунок 2.17). В северном полушарии с апреля по октябрь, а в южном с апреля по сентябрь наблюдается обратная корреляционная связь циклонической активности и глубины циклонов (т.е.

увеличение циклонической активности связано не с увеличением глубины циклонов, а с увеличением их количества).

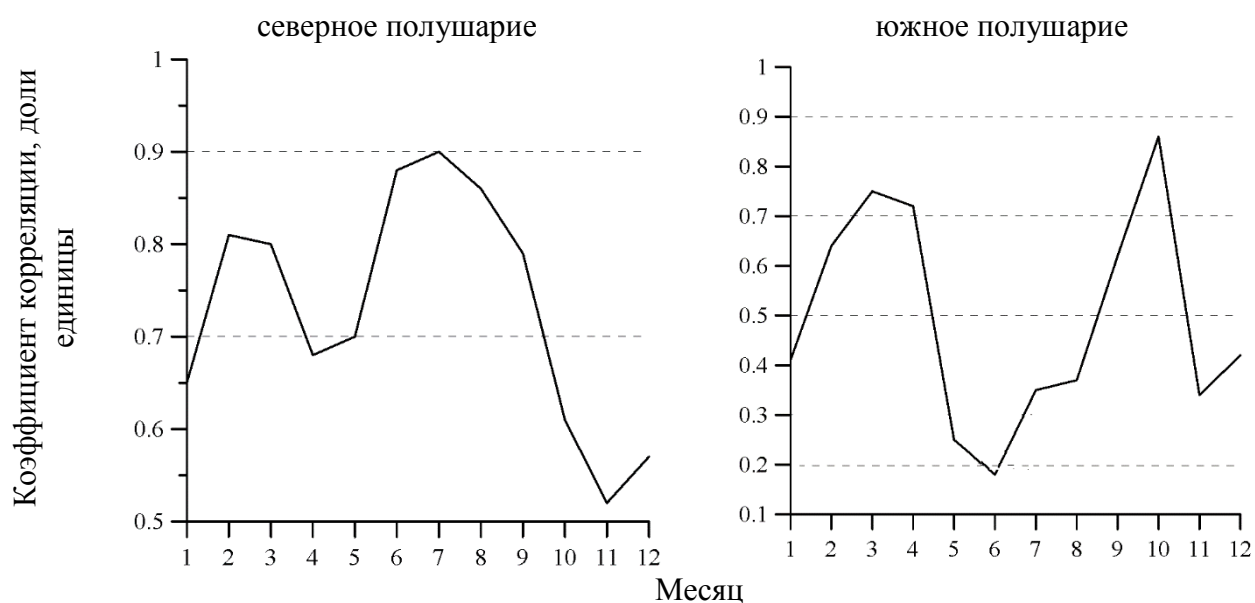


Рисунок 2.16 – Коэффициент корреляции для циклонической активности и глубины циклонов

Таблица 2.2 – Коэффициент корреляции количества циклонов и циклонической активности в северном полушарии

Месяц	Коэффициент корреляции		Значимость	
	Северное полушарие	Южное полушарие	Северное полушарие	Южное полушарие
Январь	0.65	0.54	1	1
Февраль	0.74	0.56	1	1
Март	0.39	0.14	1	0
Апрель	-0.40	-0.34	1	1
Май	-0.60	-0.69	1	1
Июнь	-0.58	-0.73	1	1
Июль	-0.69	-0.77	1	1
Август	-0.41	-0.79	1	1

Продолжение таблицы 2.2

Месяц	Коэффициент корреляции		Значимость	
	Северное полушарие	Южное полушарие	Северное полушарие	Южное полушарие
Сентябрь	-0.55	-0.46	1	1
Октябрь	-0.35	0.14	1	0
Ноябрь	0.44	0.68	1	1
Декабрь	0.59	0.49	1	1

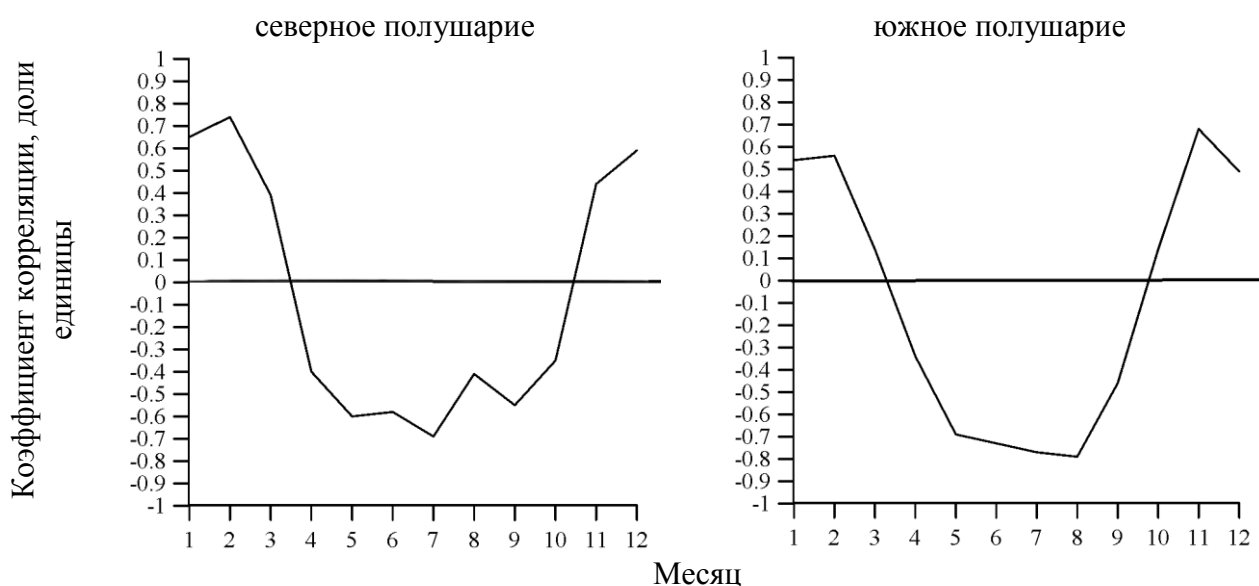


Рисунок 2.17 – Коэффициент корреляции для циклонической активности и количества циклонов

В ходе исследования было установлено, что нет четко выраженной значимой связи между количеством циклонов и их глубиной. Корреляция оценивалась для сглаженных значений количества циклонов и их глубины, окно осреднения составляло 3 года. Для оценки значимости коэффициента корреляции (на уровне значимости 99,5 %) применялся критерий Стьюдента. Результаты представлены в таблице 2.3. В большинстве своем полученные коэффициенты корреляции незначимы, а в случаях значимости коэффициент

корреляции очень мал. Исключения, как и раньше, составляет поведение характеристик для северного полушария в марте и феврале, когда можно заметить совместное увеличение и количества циклонов и их глубины. Также значим коэффициент корреляции для июля, когда количество циклонов и их глубина изменяются в противофазе.

Таблица 2.3 – Коэффициент корреляции количества циклонов и их глубины

Месяц	Коэффициент корреляции		Значимость	
	Северное полушарие	Южное полушарие	Северное полушарие	Южное полушарие
Январь	0.26	-0.34	0	1
Февраль	0.45	-0.02	1	0
Март	0.46	0.12	1	0
Апрель	0.13	0.22	0	0
Май	-0.13	0.24	0	0
Июнь	-0.34	0.41	1	1
Июль	-0.51	0.21	1	0
Август	-0.19	0.08	0	0
Сентябрь	-0.11	0.33	0	1
Октябрь	-0.08	0.20	0	0
Ноябрь	0.19	-0.13	0	0
Декабрь	0.12	-0.32	1	1

2.6 Связь Северо-Атлантического колебания и характеристик циклонов северного полушария

В соответствии с очень большим числом исследований одним из самых важных для северного полушария фактором, влияющим на циркуляцию

северного полушария, является Северо-Атлантическое колебание, которое более подробно рассмотрено в главе 1. Поэтому была рассмотрена связь характеристик циклонических режимов северного полушария с индексом САК. Согласно формулам (2.1) - (2.3) в ходе исследования были рассчитаны коэффициенты корреляции для скользящих тридцатилетних периодов между индексом Северо-Атлантического колебания и количеством и глубиной циклонов северного полушария, а также индексом циклоничности региона. Полученные результаты представлены на рисунках 2.18, 2.21 и 2.22. Белым цветом на рисунках отмечены области незначимых коэффициентов корреляции (значимость определена по той же методике, что и ранее).

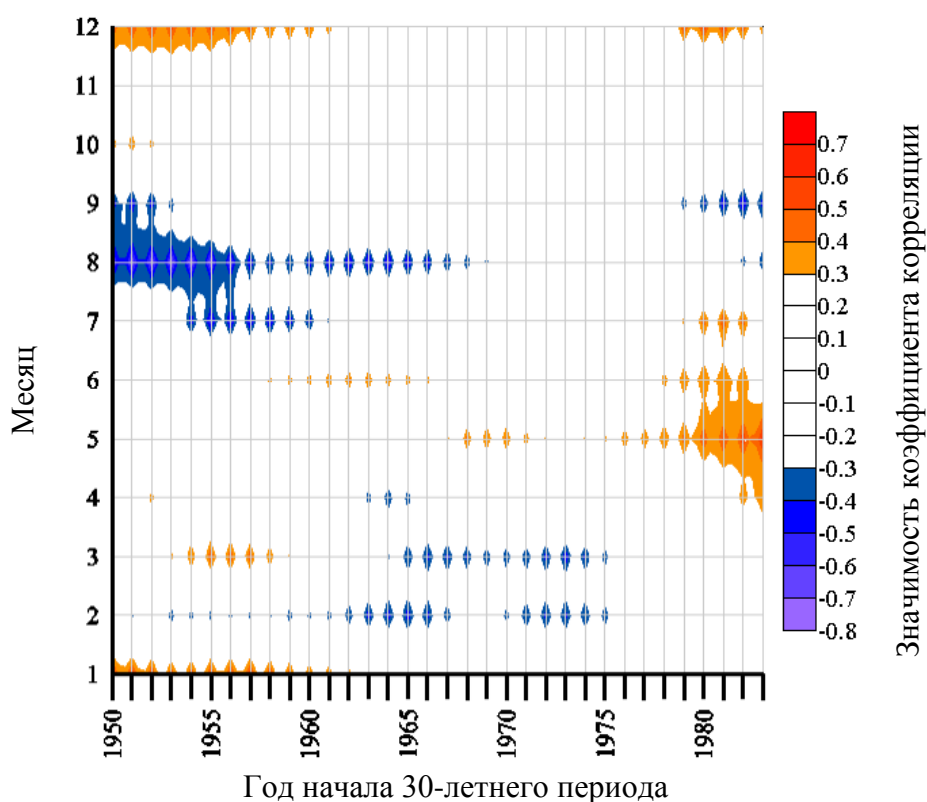


Рисунок 2.18 – Коэффициенты корреляции для скользящих тридцатилетних периодов между САК и глубиной циклонов в северном полушарии

Коэффициенты корреляции рассчитывались для САК и аномалии глубины циклонов, то есть отрицательный коэффициент корреляции означает,

что усиление САК соответствует к отрицательным аномалиям глубины циклонов – циклоны углубляются. Как следует из анализа коэффициентов корреляции, приведённых на рисунке 2.18, такая связь характерна для конца лета и начала осени практически на всей протяженности исследуемого периода, за исключением периода 1965 – 1990 годов. Такая же зависимость наблюдается в феврале и марте (опять!) в период с 1965 по 2005 год и практически исчезает в последние десятилетия. Положительные же связи, когда увеличение САК связано с уменьшением глубины циклонов наблюдается в начале исследуемого периода зимой (декабрь и январь), а в последние десятилетия и начале лета – май, июнь. Видно, что в течение исследуемого периода дважды произошла смена связей: в 60-е и 80-е года XX столетия.

В большинстве своём корреляционные связи САК и глубины циклонов северного полушария статистически незначимы. Таким образом, Северо-Атлантическое колебание не вполне определяет глубину циклонов северного полушария. По-видимому, масштаб полушария слишком велик для того, чтобы происходящие процессы можно однозначно связать с одним процессом, даже таким значительным как Северо-Атлантическое колебание. Факторов, определяющих глубину циклонов, может быть несколько. Так, например, влияние на глубину может оказывать другие центры действия атмосферы или геофизические факторы, рассматриваемые в дальнейшем. Кроме того, на глубину циклонов также могут воздействовать естественные орографические препятствия. Например, о. Новая Земля служит естественным разделом между холодным Карским и относительно теплым Баренцевым морями. Проходя здесь, циклоны естественным образом регенерируют, происходит их углубление. На картах идентифицированных циклонов в этом регионе практически всегда отмечается циклонический режим (как и в районе Санкт-Петербурга).

Северо-Атлантическое колебание наиболее сильно проявляется в зимние месяцы, когда максимален градиент давления между Азорским максимумом и

Исландским минимумом (см. рисунок 2.19). Мы не рассматриваем корреляционные связи в летние месяцы, так как в этот период практически исчезает контраст температуры и, как следствие, давления, а над Исландией устанавливается многоцентровая депрессия (см. рисунок 2.20). Таким образом, уменьшается величина индекса САК, корреляционные связи в это время рассматривать некорректно.

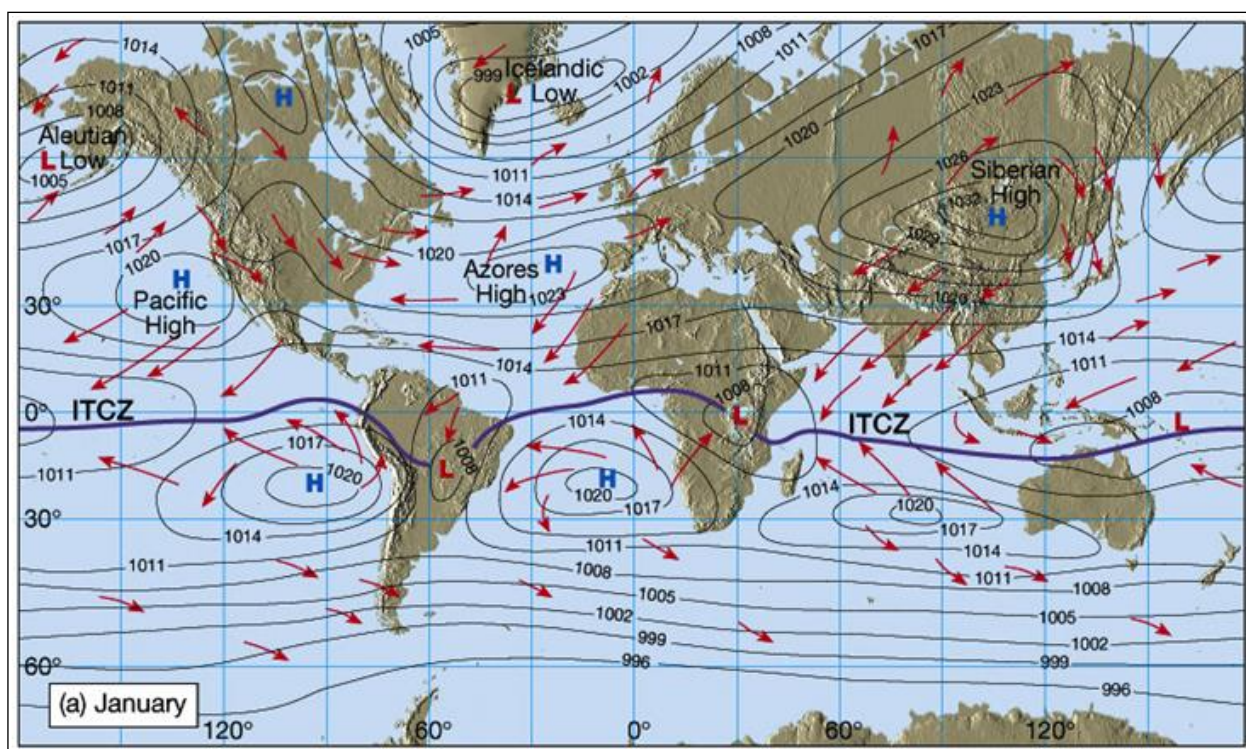


Рисунок 2.19– Центры действия атмосферы в январе[121]

Что касается количества циклонов (см. рис. 2.21), то значимые отрицательные корреляционные связи здесь прослеживаются вплоть до начала 70-х годов в ноябре, а с начала 60-х годов и по настоящее время значимая отрицательная корреляция появилась для периода с января по март, наиболее сильна она в марте. Корреляционные связи в летние месяцы не рассматривались по вышеизложенным причинам.

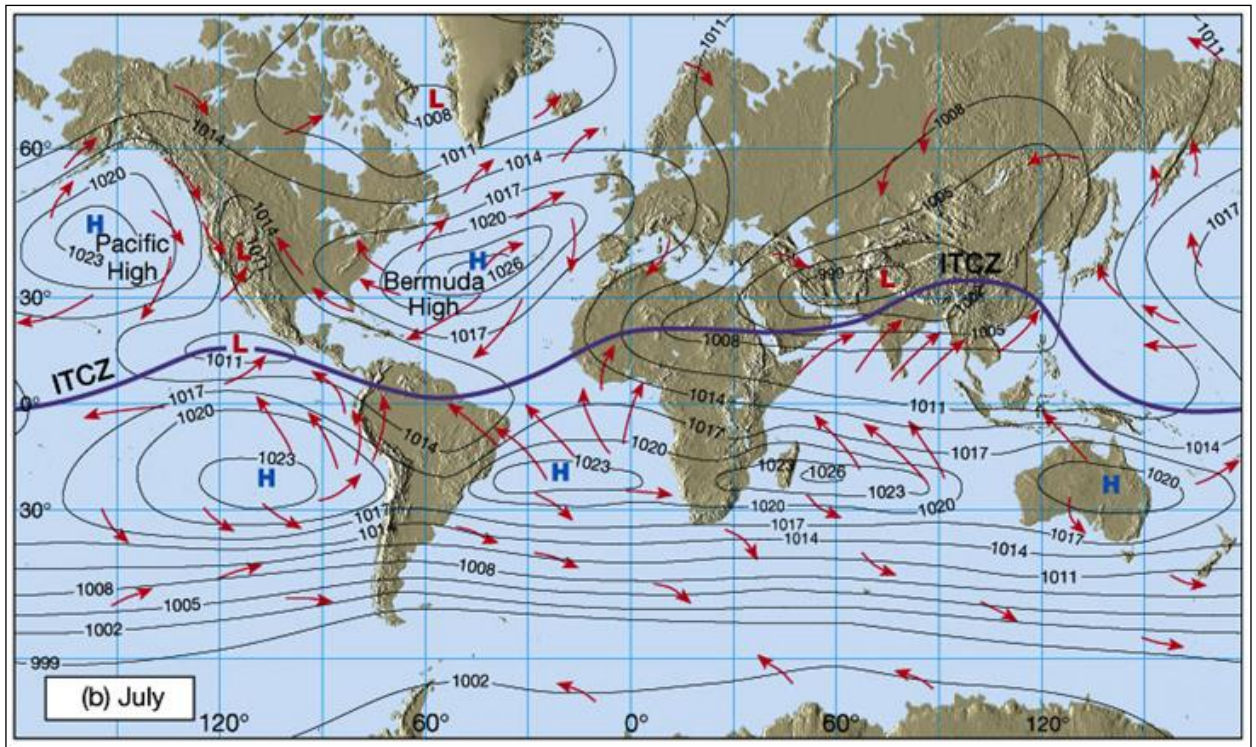


Рисунок 2.20 – Центры действия атмосферы в июле [121]

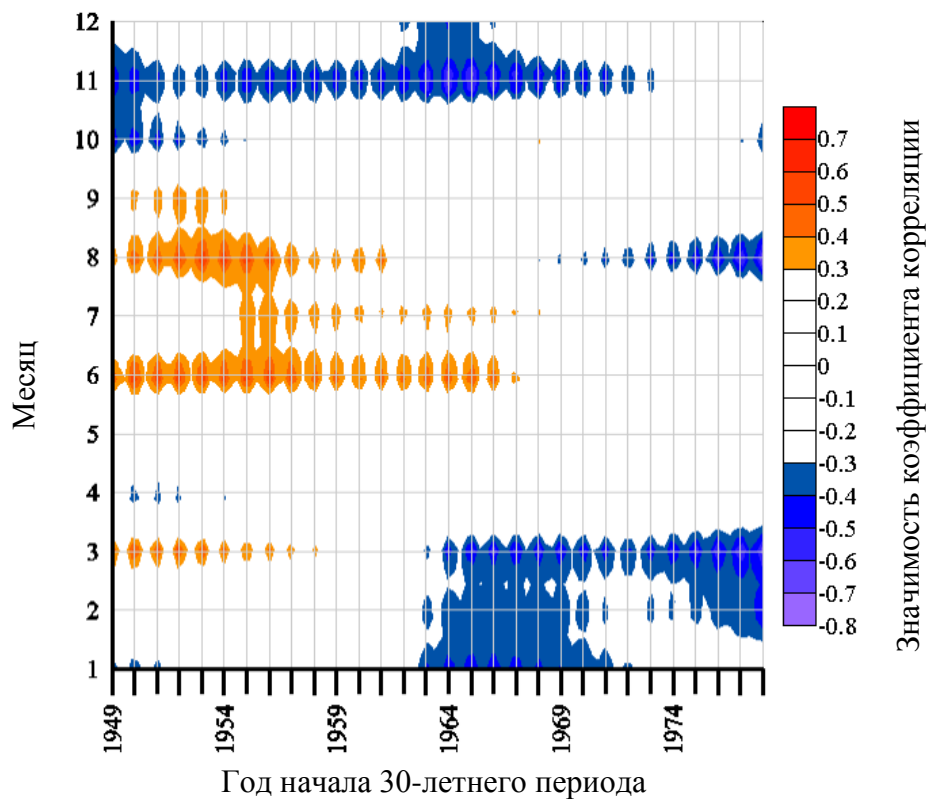


Рисунок 2.21 – Скользящие коэффициенты корреляции между САК и количеством циклонов в северном полушарии

Связи между САК и количеством циклонов выражены сильнее (см. рисунок 2.22). В последние десятилетия прослеживаются отрицательные коэффициенты корреляции между САК и количеством циклонических ситуаций в холодный период года. Опять весь исследуемый период может быть разделён на два отрезка – до 1980 годов и после. В первый период наблюдались сильные прямые связи в летние месяцы, последние же десятилетия все значимые коэффициенты корреляции отрицательны. При этом выявленные значительные корреляционные связи не означают влияния САК на количество циклонов, и тем более обратного влияния. Скорее всего, существует некий третий процесс, который одновременно влияет и на САК и на количество циклонов в северном полушарии. Вполне возможно, что это Атлантическое мульти-декадное колебание (совпадает период колебания) или антропогенный форсинг (совпадает время изменения наблюдаемых тенденций).

Таким образом, индекс САК не описывает происходящие в северном полушарии процессы, его циркуляцию и циклогенез, а потому не может быть единственным достоверным предиктором для прогноза глобальных циркуляционных изменений. Это связано с тем, что влияние САК по-разному проявляется в разных регионах северного полушария, а в описанных выше расчётах участвовало всё полушарие в целом. Поэтому было проведено исследование корреляционных связей между САК и характеристиками циклонических режимов в Северо-Атлантическом регионе.

Были проанализированы циклонические режимы в область северного полушария, ограниченной координатами с 45° по 90° с.ш. и с 50° з.д. по 50° в.д. В силу территориальной близости расположения территории влияние колебания САК должно быть максимальным и однородным. Результаты представлены на рисунках 2.23-2.25.

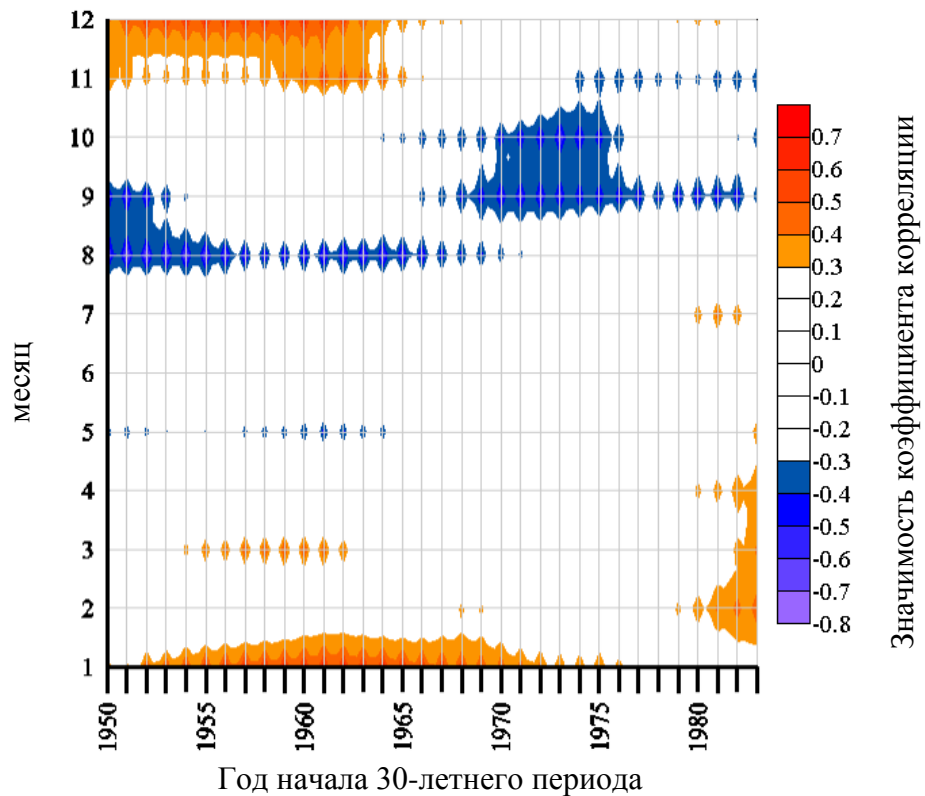


Рисунок 2.22 – Скользящие коэффициенты корреляции между САК и индексом циклонической активности в северном полушарии

Как видно из анализа результатов, представленных на рисунке 2.23, в этом регионе во все года прослеживается значимая отрицательная корреляционная связь между САК и глубиной циклонов. Особенно сильна эта связь в периоды с началом в 1960-х – в этот период САК оказывал значимое влияние на глубину циклонов не только в зимние, но и в осенние и даже весенние месяцы. Данный факт согласуется с теорией: чем больше разница между Азорским максимумом и Исландским минимумом, тем более глубокие циклоны генерируются. Таким образом, можно сделать косвенный вывод о том, что в эти периоды в этом регионе активизировался зональный перенос.

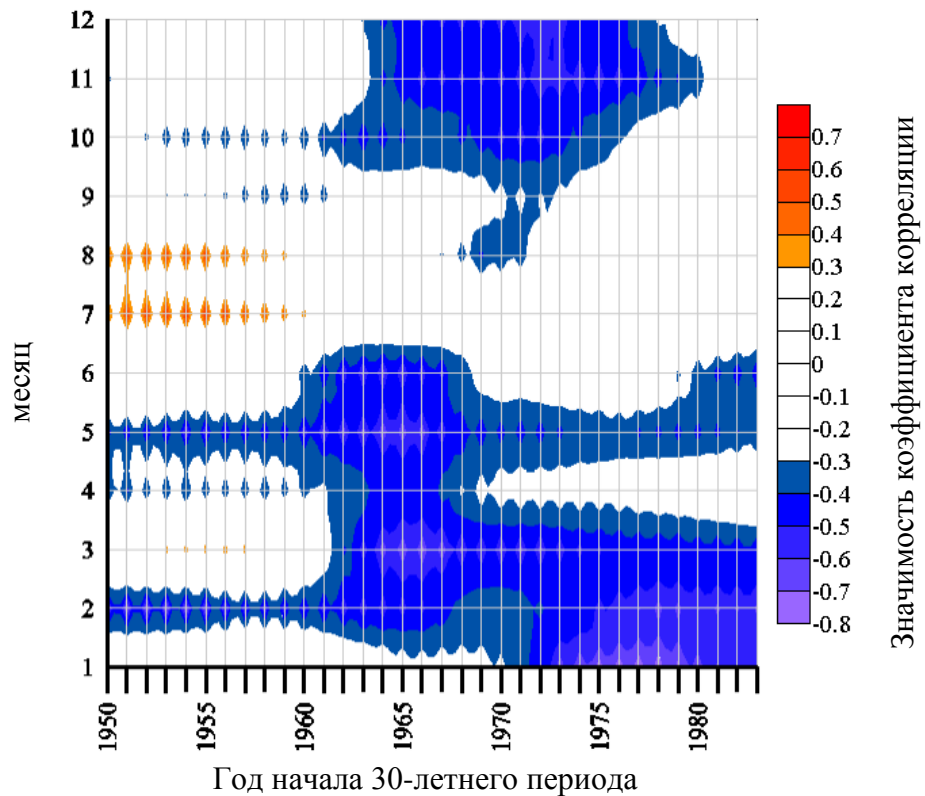


Рисунок 2.23 – Скользящие коэффициенты корреляции между САК и глубиной циклонов над Европой и северной Атлантикой

Начиная с 1960-х годов, с февраля по апрель, а также в начале периода в ноябре, в регионе была отмечена положительная корреляция между индексом САК и количеством циклонов, однако в последние годы она стала замещаться отрицательной корреляцией в мае и сентябре. Это говорит о том, что приблизительно до конца 70-х САК являлся одним из главных факторов, влияющим на циклоничность региона, однако в последнее время эта связь ослабевает, и появляются другие источники, влияющие на циркуляцию данного региона. Значит, как и раньше, могут быть выявлены, как минимум, два периода, отличающиеся по своим характеристикам. Только в данной ситуации начало второго периода, когда усилились связи в переходные месяцы, несколько смещено ближе к началу XXI века.

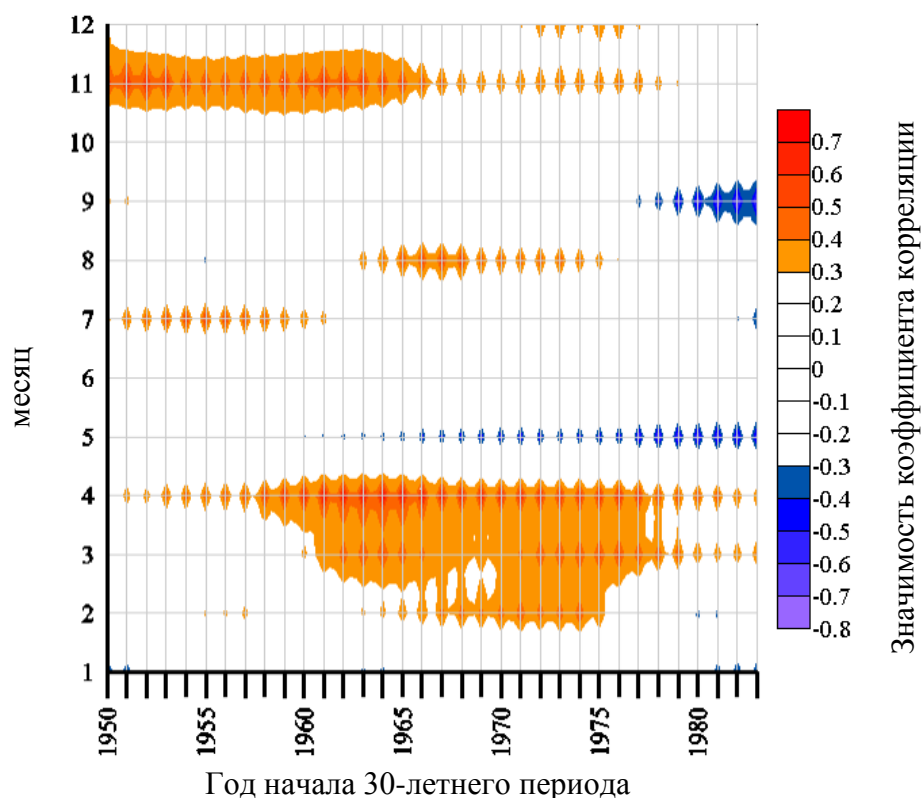


Рисунок 2.24 – Коэффициенты корреляции между САК и количеством циклонов над Европой и северной Атлантикой

Отрицательная корреляционная связь между индексом циклонической активности и индексом САК, столь сильная в начале периода в мае в середине периода стала смещаться к январю, а в конце периода ослабела. Этот факт вновь говорит о том, что с конца 70-х на климат региона стали оказывать влияние новые факторы. Весь исследуемый период по структуре корреляционных связей САК и индекса САИ можно разделить на три части. Скорее всего, это связано со сложным характером и неоднозначностью (как уже отмечалось) самого индекса САИ, в который входит и количество циклонов и их глубина, которые в свою очередь по-разному связаны с САИ.

Таким образом, можно сделать вывод, что даже на циркуляцию атмосферы в Европе в последние годы стали оказывать влияние дополнительные факторы, которые суммарно перевешивают вклад Северо-Атлантического колебания. Что касается северного полушария в целом, то

Северо-Атлантическое колебание изначально не в полной мере описывает циклонические режимы региона. Связи здесь, по всей видимости, более сложные и неоднозначные, а значит нельзя напрямую связывать изменения в циркуляции, а соответственно и в климате, с Северо-Атлантическим колебанием.

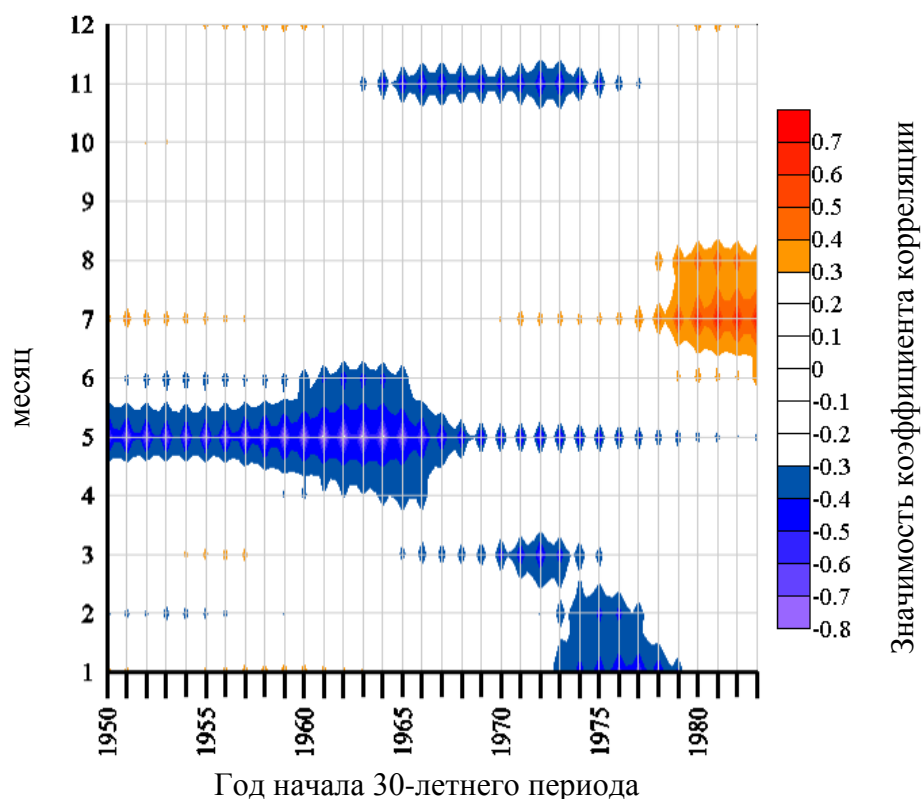


Рисунок 2.25 – Коэффициенты корреляции между САК и индексом циклонической активности САИ над Европой и северной Атлантикой

Анализируя связи САК с характеристиками циклонической активности можно также сказать о неоднородности всего рассматриваемого периода и о возможности выделения двух периодов – до 1980-х годов и после. Кроме этого, также можно сделать вывод о том, что в последние десять лет также происходят изменения в циркуляционных режимах северного полушария в целом и Европейско-Атлантического региона, в частности.

Об изменении характеристик циркуляционных режимов северного полушария косвенно можно судить и по некоторым исследованиям последних лет, которые позволяют говорить о том, что для характеристики зональности циркуляции над Европой в последние десятилетия лучше использовать не стандартные индексы САК, а индексы, основанные на данных других регионов, например, индекс SCAND [122,123].

2.7 Связь Южного колебания (Эль-Ниньо/Ла-Нинья) и характеристик циклонов северного и южного полушарий

Как уже отмечалось ранее, в последние годы возрос интерес к Южному колебанию и его влиянию не только на южное, но и на северное полушарие. Согласно формулам (2.1-2.3) в ходе исследования были рассчитаны коэффициенты корреляции индекса Южного колебания с количеством и глубиной циклонов южного и северного полушарий, а также с циклоничностью этого региона. Полученные результаты представлены на рисунках 2.26– 2.28. Белый цвет на рисунках по-прежнему означает незначимые коэффициенты корреляции.

Анализ показал, что существуют значимые коэффициенты корреляции индекса Южного колебания и глубины циклонов южного полушария с сентября по ноябрь практически за весь исследуемый период. Кроме того, есть значимая положительная корреляция с января по апрель с начала периода до середины 60-х годов, а также после середины 1970-х в феврале и апреле.

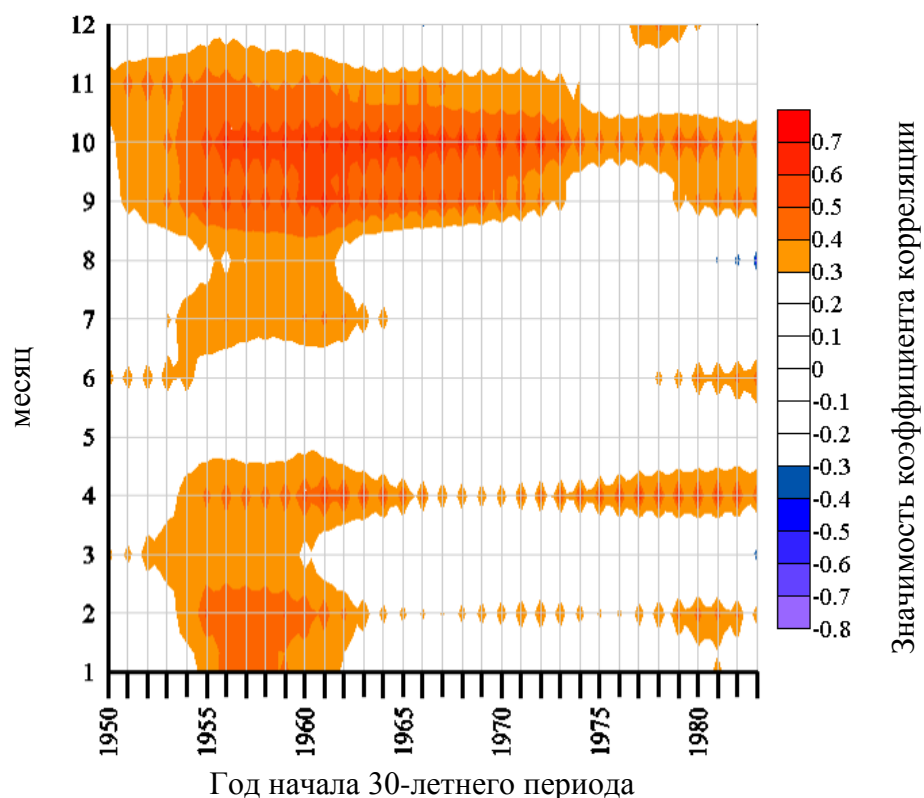


Рисунок 2.26 – Скользящий коэффициент корреляции между индексом Южного колебания и глубиной циклонов южного полушария

Относительно корреляционной связи между количеством циклонов южного полушария и индекса Южного колебания (см. рисунок 2.27): в начале периода были отдельные месяцы (май, июнь и декабрь), когда наблюдалась положительная корреляционная связь, однако в 60-х годах она не прослеживается, но возникла отрицательная корреляция сначала только в марте, а затем практически во все месяца. Наиболее сильная отрицательная корреляция индекса Южного колебания и количества циклонов в последние годы наблюдается в весенние месяцы с марта по май.

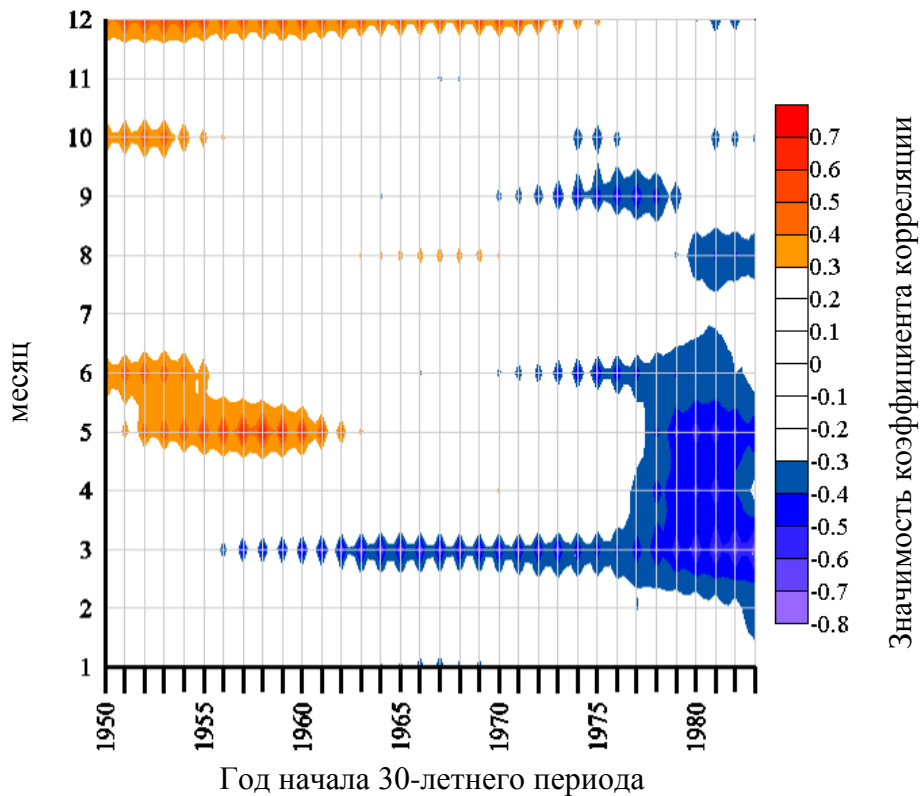


Рисунок 2.27 – Скользящий коэффициент корреляции между индексом Южного колебания и количеством циклонов южного полушария

Для циклонической активности южного полушария и индексом Южного колебания (рисунок 2.28) также были найдены статистически значимые положительные коэффициенты корреляции. В начале периода они прослеживались только с января по апрель и сентября по ноябрь, однако, начиная с конца 70-х, начали отмечаться во все месяца.

Подводя итог, можно сделать вывод, что Южное колебание в последнее время оказывает на циркуляцию южного полушария все большее влияние, однако корреляционная связь между индексом Южного колебания и глубиной циклонов ослабела, а в некоторые месяцы даже исчезла. При этом по внутренней динамике корреляционных связей можно, как и раньше, выделить два периода до 1980-х годов и после. При этом динамика отличается от связей САК и циклонической активности – переход к другому сценарию процессов происходит позже. Хочется отметить, что перелом в 1965 году, который

отмечался ранее, означает, что меняются тренды во временном ряду с 1965 по 1995 и далее. Перелом в 1980 году, который отмечается в связях Южного колебания и индекса САІ, означает изменения во временном ряду с 1980 по 2010 годы. Значит, связи с Южным колебанием изменились позднее. Это можно также сопоставить с антропогенным форсингом, который в южном, менее индустриально развитом, полушарии проявляется позже.

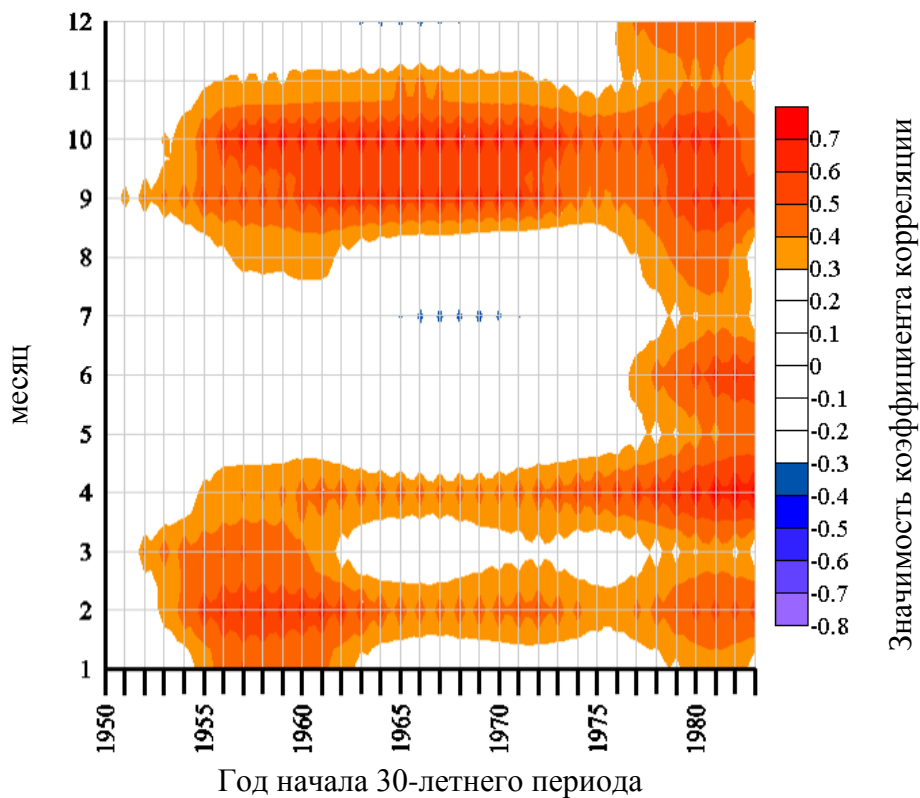


Рисунок 2.28 – Скользящий коэффициент корреляции между индексом Южного колебания и циклонической активностью южного полушария

В ряде исследований показано, что, будучи связанной с аналогичными процессами в Карибском бассейне, Южное колебание формирует сложную структуру, определяющую изменение аномалий температуры и, как следствие, циркуляции в средних и высоких широтах обоих полушарий [81,82,84,124]. Южное колебание определяет температуру водной поверхности и за счёт передачи энергии от океана к атмосфере и переноса этой энергии ячейками

Гадлея изменяются условия циклогенеза в северном полушарии. Было интересным установить факт наличия или отсутствия корреляционной связи между индексом Южного колебания и характеристиками циклонов северного полушария.

В ходе исследования была найдена значимая корреляция между глубиной циклонов северного полушария и индексом Южного колебания (см. рисунок 2.29). До середины семидесятых годов с мая по август наблюдалась отрицательная корреляция, затем она исчезла, но на ее место в отдельные месяцы (с января по апрель, в июне, а также с сентября по декабрь) появилась положительная корреляция. Если до 1980х годов, можно отметить значимую связь в холодный сезон (май-август) и эта связь отрицательная, то позднее наблюдается связь в тёплый и переходный сезоны и она положительная. Следует отметить, что, как и ранее, наблюдается переход к другим сценариям связей в 1980-х годах.

Количество циклонов северного полушария с индексом Южного колебания коррелирует плохо (см. рисунок 2.30). Положительные корреляционные связи отмечались только в начале периода в ноябре и декабре, в последние годы наметилась отрицательная корреляционная связь для января.

Напротив, циклоническая активность северного полушария в целом неплохо коррелирует с индексом Южного колебания (см. рисунок 2.31). Положительные значимые корреляции получены для зимнего и частично летнего периодов северного полушария во все периоды. В переходные периоды коэффициенты корреляции незначимы. Не наблюдается корреляционных связей с количеством циклонов, но значимы коэффициенты корреляции с глубиной и индексом САІ и это позволяет сделать вывод о том, что с Южным колебанием связаны аномалии глубины циклонов относительно среднего значения давления в точке.

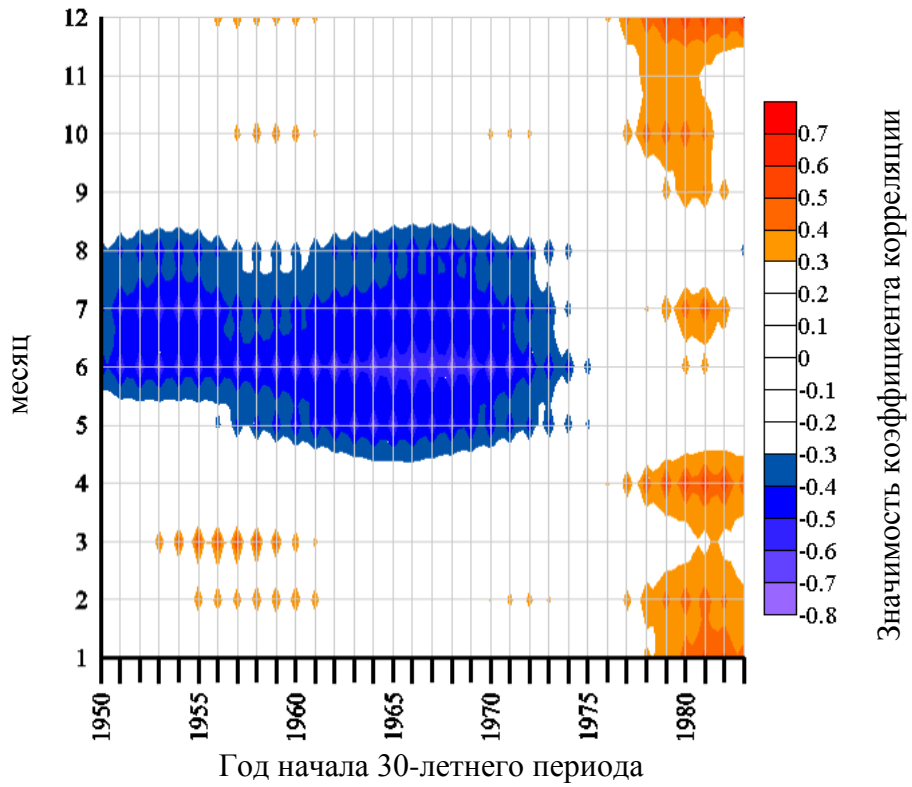


Рисунок 2.29 – Скользящие коэффициенты корреляции между индексом Южного колебания и глубиной циклонов северного полушария

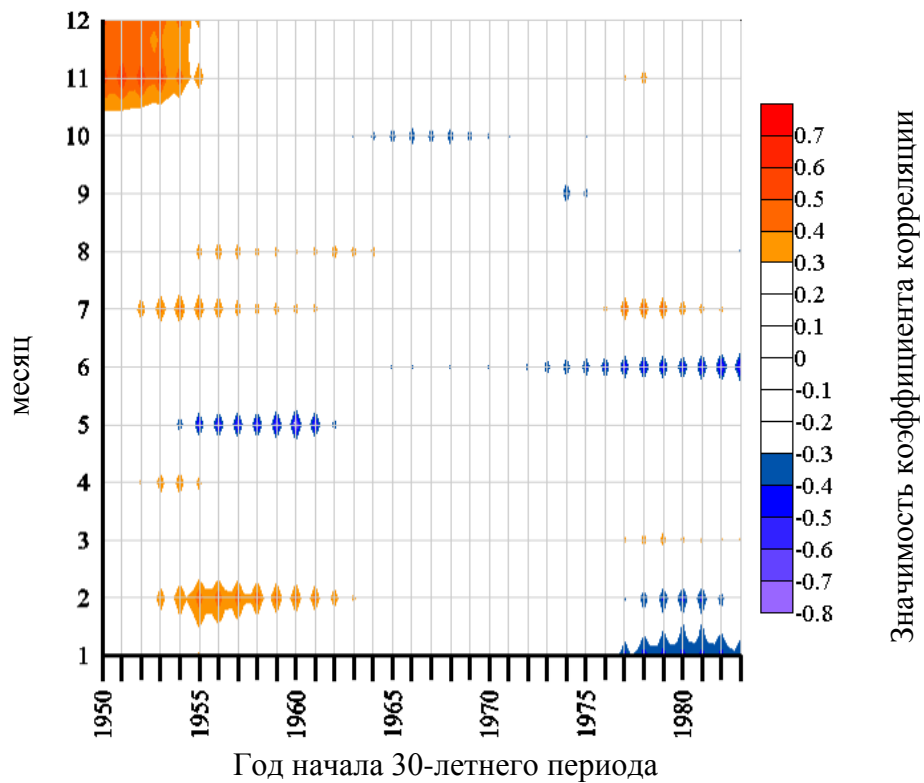


Рисунок 2.30 – Скользящие коэффициенты корреляции между индексом Южного колебания и количеством циклонов в северном полушарии

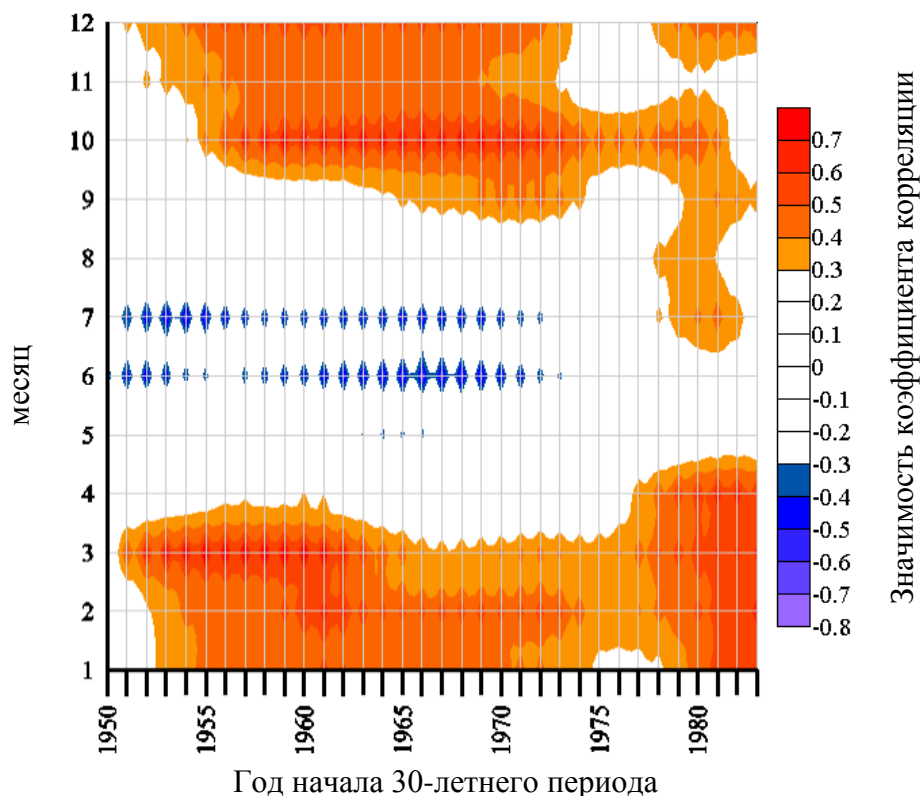


Рисунок 2.31 – Скользящие коэффициенты корреляции между индексом Южного колебания и циклонической активностью в северном полушарии

Таким образом, можно сделать вывод, что индекс Южного колебания оказывает влияние не только на циркуляцию южного полушария, но и на северное.

Для того чтобы оценить влияние Южного колебания на различные регионы, была рассчитана корреляция характеристик циклонов Европы (Рассматривался тот же регион, для которого рассчитывалась корреляция с индексом САК). Результаты расчета приведены на рисунках 2.32-2.33.

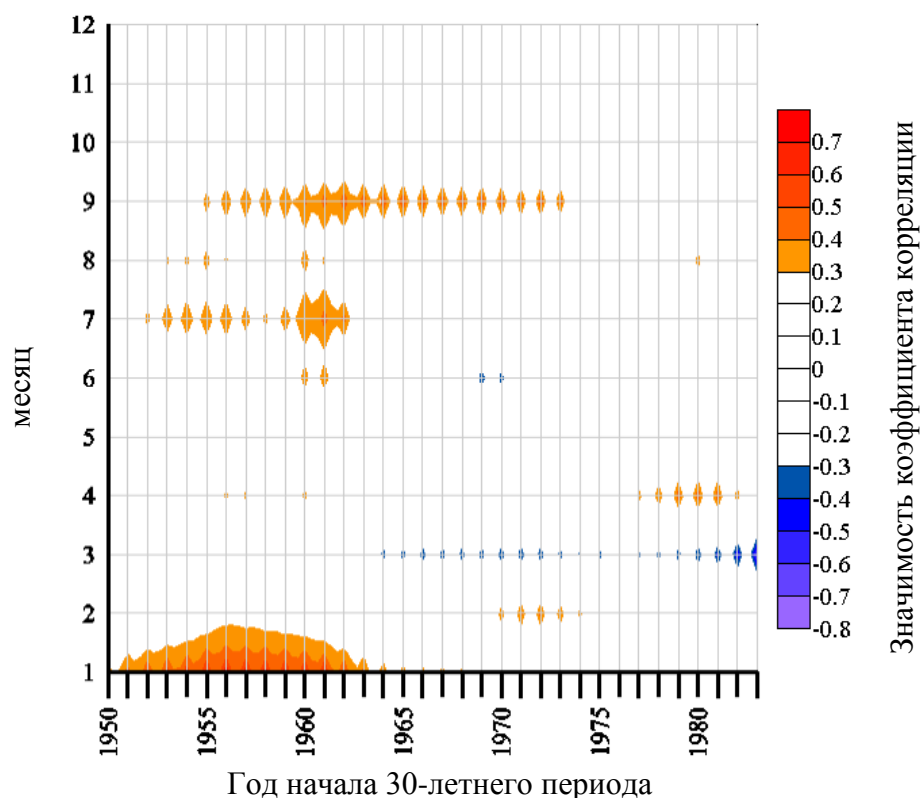


Рисунок 2.32 – Скользящие коэффициенты корреляции между индексом Южного колебания и глубиной циклонов в Европе и северной Атлантике

Как видно из результатов, приведённых на рисунке 2.32, глубина циклонов в Европе слабо связана с Южным колебанием. Значимая положительная корреляция наблюдалась только в январе в периоды с началом с 50-х по середину 60-х годов. Слабая положительная корреляция наблюдалась также в июне в начале периода и в середине периода в сентябре. Очевидно, доминирующим фактором в этом регионе является влияние Исландского минимума и, как следствие, Северо-Атлантического колебания.

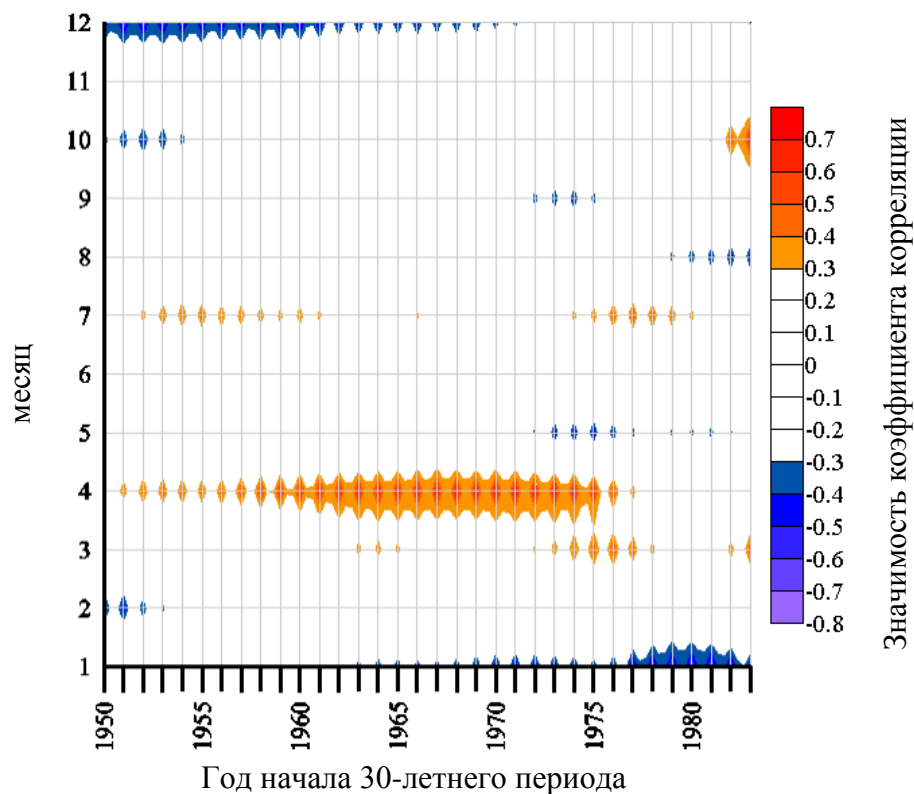


Рисунок 2.33– Корреляционная связь между индексом Южного колебания и количеством циклонов в Европе и северной Атлантике

Количество циклонов в Европе также очень слабо коррелирует с индексом Южного колебания. Лишь только в начале периода здесь отмечалась отрицательная корреляция в декабре, затем она угасла и стала проявляться лишь в последние годы, сместившись к январю. Кроме того, в середине периода отмечалась положительная корреляция величины Эль-Ниньо и количества циклонов в апреле.

Однако в противоположность количеству и глубине циклонов Европы, индекс циклонической активности этого региона очень хорошо коррелирует с индексом Южного колебания. Так, помимо отдельных отрезков с положительной корреляцией в начале периода в июле и августе, здесь отчетливо виден целый сезон циклонической активности с декабря по февраль, имеющий положительную корреляционную связь с величиной Эль-Ниньо. В отдельные периоды (в 30-летних периодах, начало которых было в 50-х) сезон

с положительной корреляцией распространялся до апреля, в последние же годы значимая положительная корреляция стала наблюдаться во все месяца.

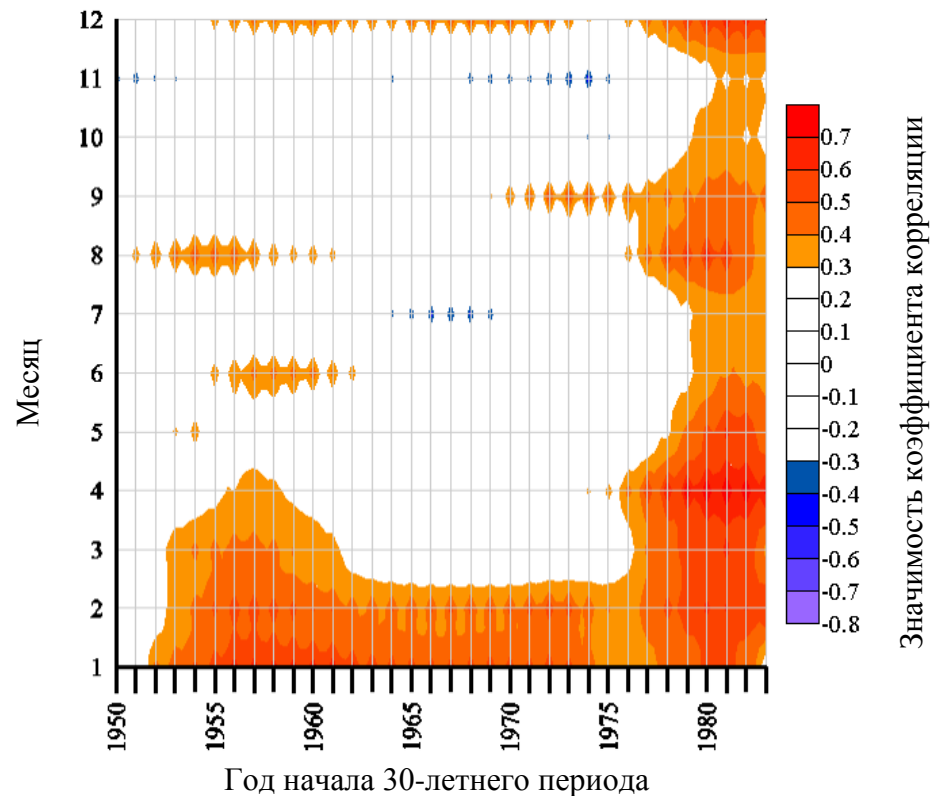


Рисунок 2.33 – Скользящие коэффициенты корреляции между индексом Южного колебания и циклонической активностью в Европе и северной Атлантике

Анализируя полученные результаты по исследованию связи Южного колебания с циклоническими режимами северного полушария, можно сделать неожиданный вывод о наличии этой связи. Для проверки результатов были проанализированы совместно временной ход количества циклонов северного полушария и индекс Южного колебания MEI, который представлен на рисунке 2.34.

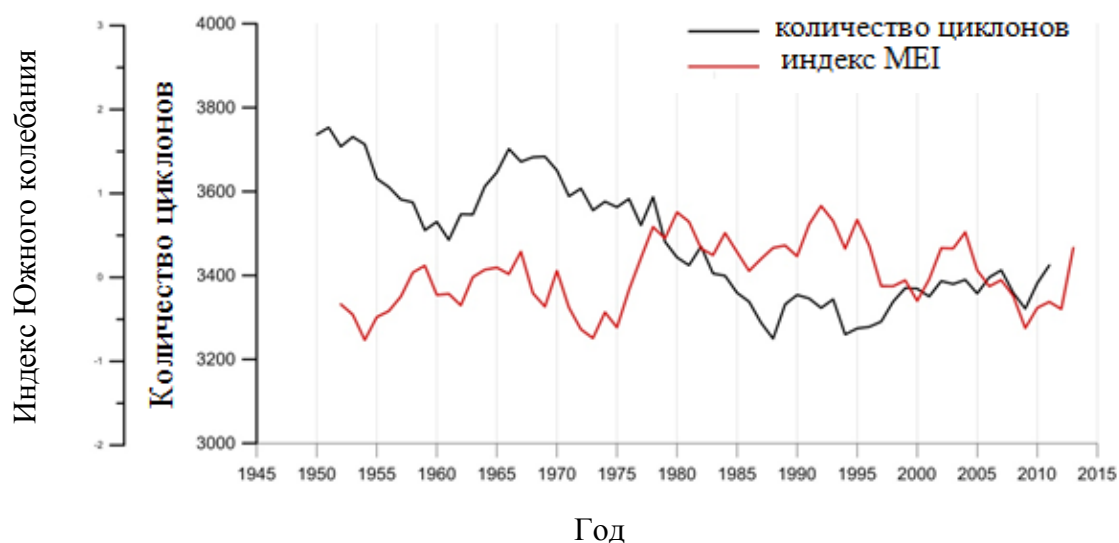


Рисунок 2.34– Временной ход количества циклонов (черная линия) в северном полушарии и индекса Южного колебания (красная линия)

На рисунке представлены результаты скользящего осреднения с окном осреднения 5 лет. Видно, что присутствует связь, структура которой менялась несколько раз за исследуемый период – в 1960 и 1975 года.

2.8 Связь Атлантической мульти-декадной осцилляции и характеристик циклонов северного полушария

В ходе работы была проанализированная связь между Атлантическим мульти-декадным колебанием и характеристиками циклонов северного полушария. Анализ проводился для сглаженных за три года характеристик циклонической активности, глубины и количества циклонов. Для того чтобы о результатах можно было судить как о климатических [100], анализировались 30-летние периоды. На приведенных ниже рисунках указанные года – это начало 30-летнего периода.

В результате (по формулам 2.1-2.3) были выявлены значимые корреляционные связи между индексом АМО и глубиной циклонов (см.

рисунок 2.35). До середины 50-х годов коэффициенты корреляции, которые значимы практически во все месяцы, положительные, с середины 60-х годов изменились на отрицательные.

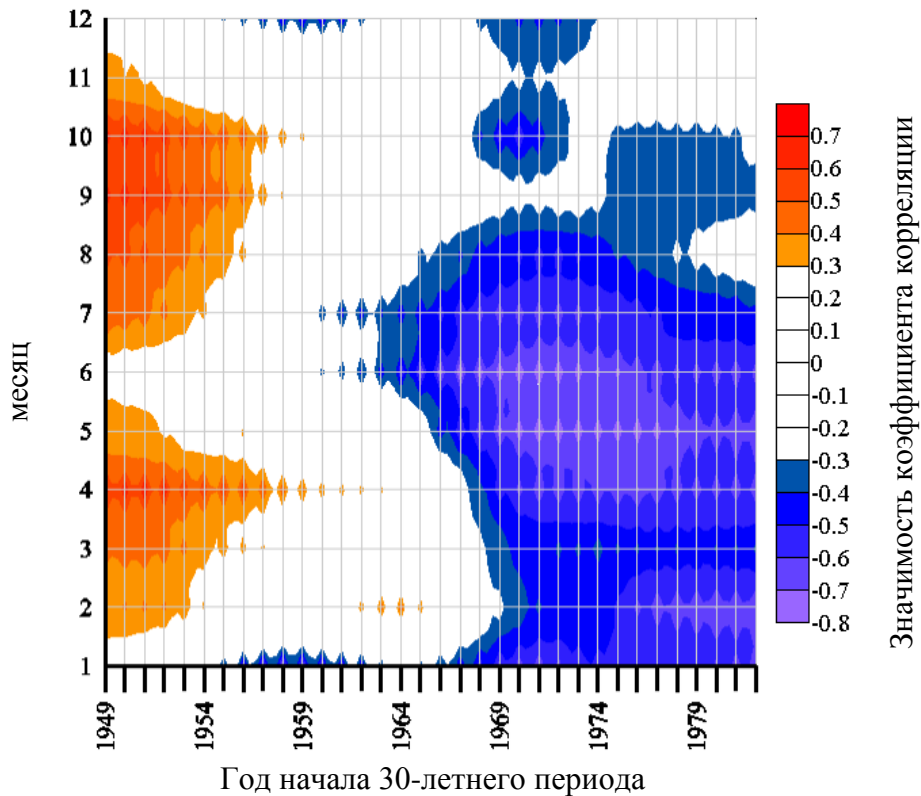


Рисунок 2.35 – Скользящие коэффициенты корреляции между индексом АМО и глубиной циклонов в северном полушарии

Во временном ходе количества циклонов прослеживаются аналогичные закономерности (см. рисунок 2.36). Здесь в начале периода (до конца 50-х годов) с сентября по ноябрь прослеживаются значимые положительные корреляционные связи. Значимые отрицательные корреляционные связи здесь стали прослеживаться в июне и июле с конца 60-х, к концу десятилетия распространяясь на все месяца.

С середины 70-х годов корреляционные связи начали ослабевать, уступая своё место положительным корреляционным связям с марта по май, которые наблюдаются с 80-х годов по настоящее время.

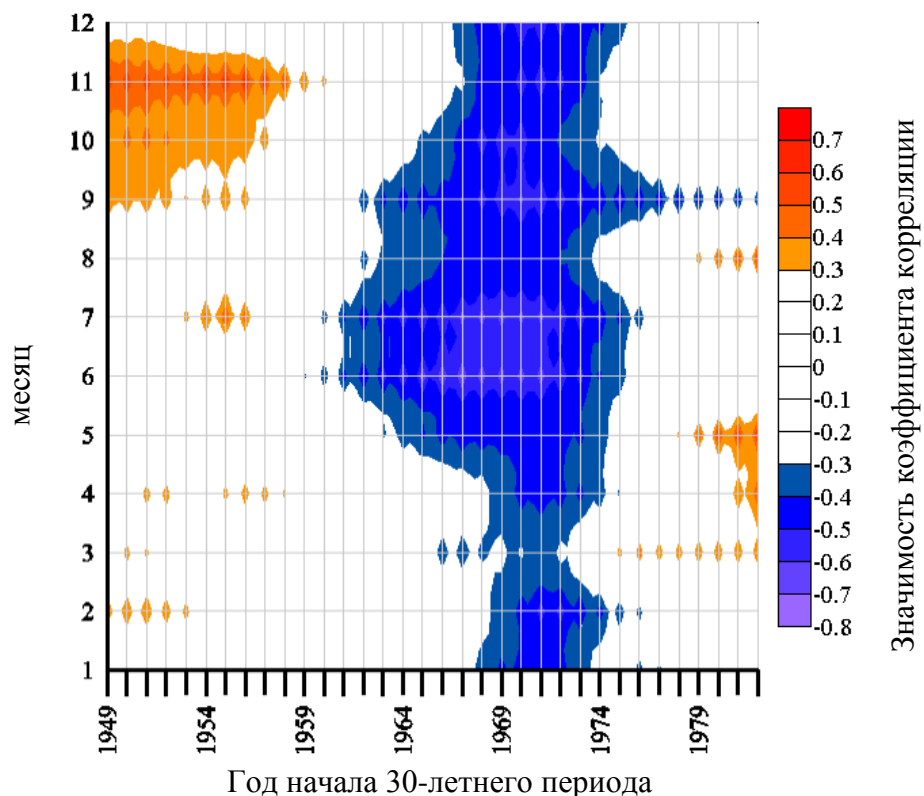


Рисунок 2.36 – Скользящие коэффициенты корреляции между индексом АМО и количеством циклонов в северном полушарии

При корреляционном анализе в циклонической активности (см. рисунок 2.37) получены закономерности, выявленные ранее. В начале периода отмечаются значимые положительные корреляционные связи, особенно сильные в переходные месяцы, с начала 70-х – значимые отрицательные корреляционные связи, которые сначала наблюдались только с апреля по август, а потом распространились и на все зимние и весенние месяцы. Весь исследуемый период может быть разделён на три части согласно внутренней динамике процессов – до 1960х годов, 1960-е-1975 и последние десятилетия.

Чтобы проанализировать, как влияет Атлантическое мульти-декадное колебание на отдельно взятый регион, дополнительно были рассчитаны коэффициенты корреляции между характеристиками циклонов в Европе и северной Атлантике. Рассматривался тот же регион, что и ранее, ограниченный

координатами 45° по 90° с.ш. и 50° з.д.-50° в.д. Результаты представлены на рисунках 2.38-2.40.

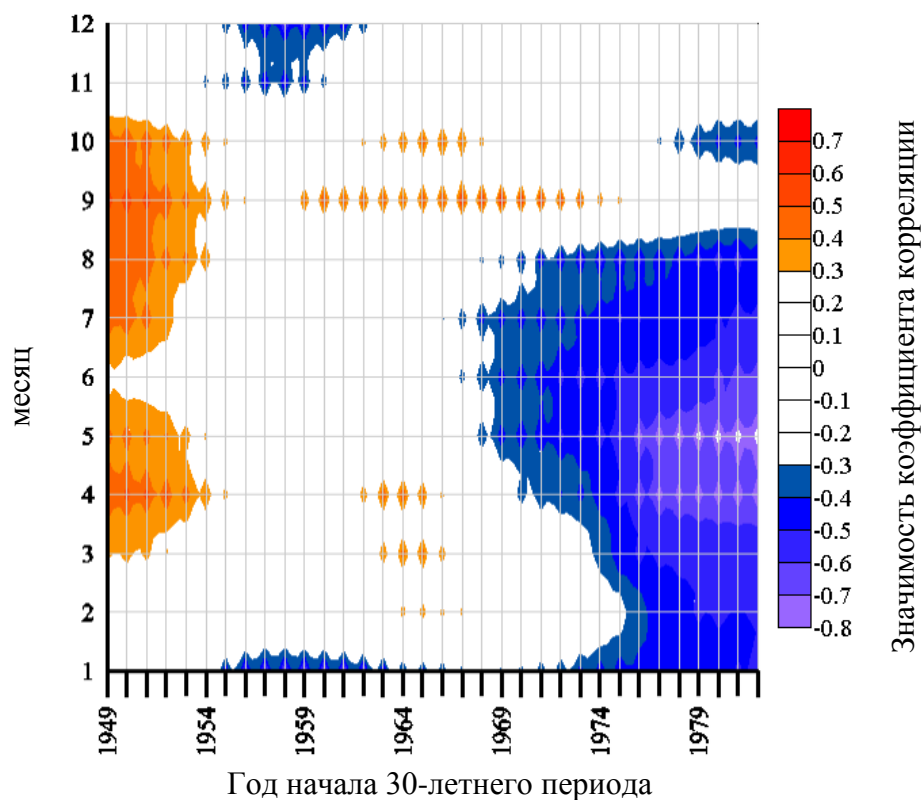


Рисунок 2.37 – Коэффициенты корреляции между индексом АМО и циклонической активностью в северном полушарии

Считается, что процессы, происходящие в Атлантике, во многом определяют происходящее и в северном полушарии в целом. Однако можно сделать вывод, что динамика процессов, происходящих в отдельно взятом регионе и в масштабах всего полушария различна. До начала 60-х годов практически во все месяцы прослеживалась значимая отрицательная корреляционная связь. Максимальных по модулю значений корреляция достигала в декабре. После 60-х корреляционные связи исчезли, а вновь стали наблюдаться лишь с середины 70-х и только в октябре.

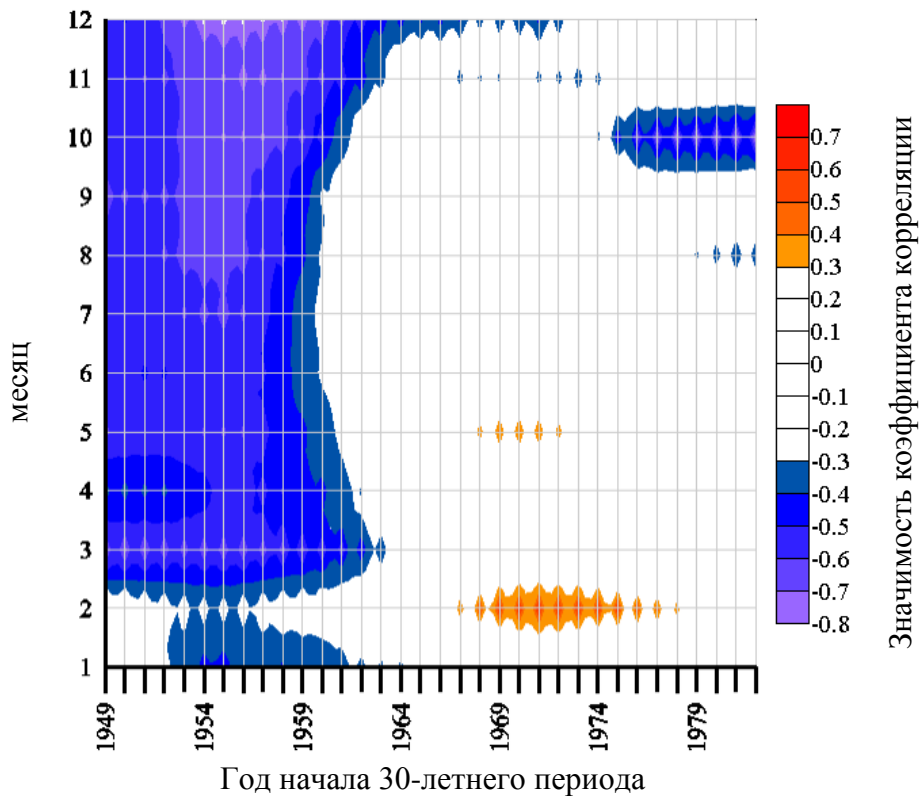


Рисунок 2.38 – Скользящие коэффициенты корреляции между индексом АМО и глубиной циклонов в Европе и северной Атлантике

Что касается количества циклонов (см. рисунок 2.39), то здесь в начале периода в переходные месяцы (апреля по май и с сентября по ноябрь) отмечалась значимая отрицательная корреляционная связь с индексом АМО. Самых высоких по модулю значений корреляция достигала в мае и октябре. С середины 60-х, напротив, появилась значимая положительная корреляционная связь, которая постепенно усилилась и распространилась практически на все месяца. В последние годы коэффициенты корреляции почти во все месяца стал достаточно высокий (более 0.7).

Во временном ходе индекса АМО и циклонической активности (см. рисунок 2.40), хорошо прослеживаются значимые отрицательные коэффициенты корреляции до 1960-х годов и после 1970-х.

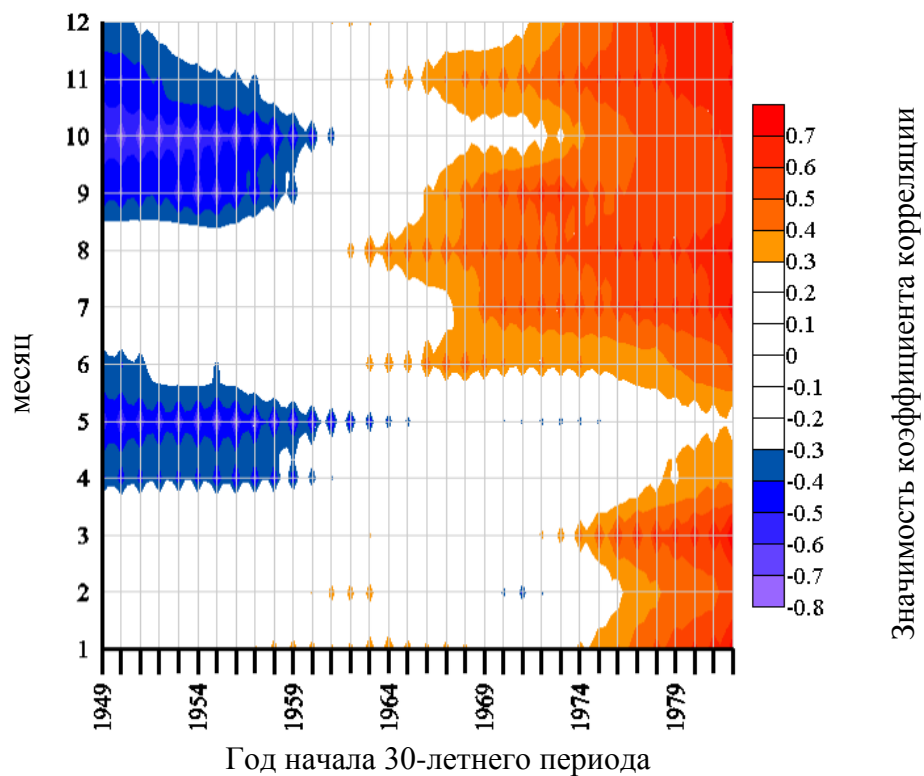


Рисунок 2.39 – Скользящие коэффициенты корреляции между индексом АМО и количеством циклонов в Европе и Северной Атлантике

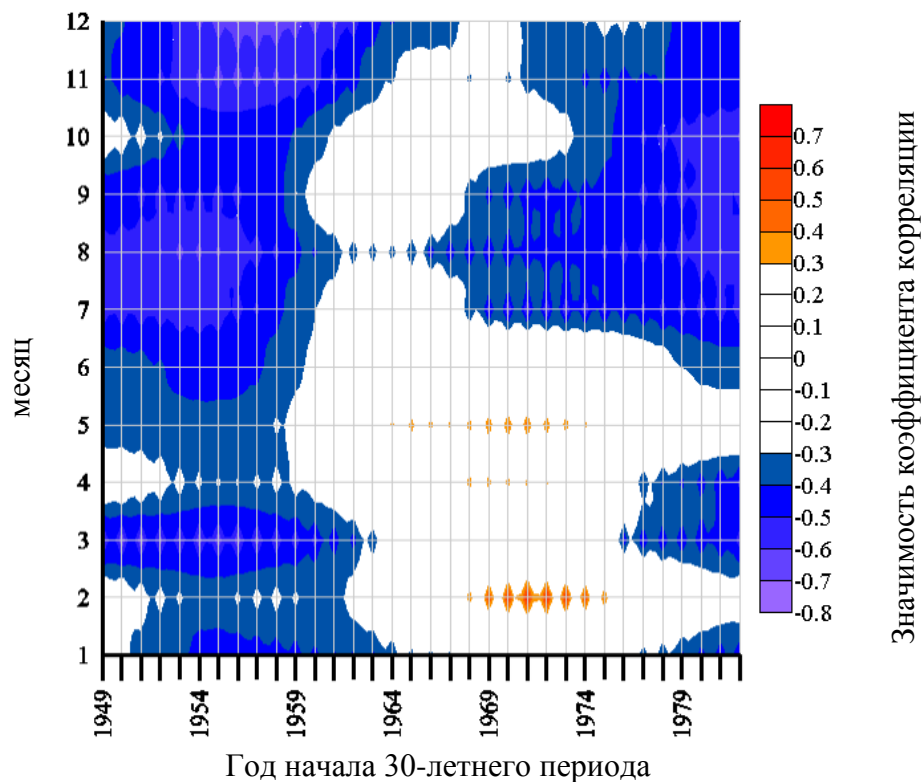


Рисунок 2.40 – Скользящие коэффициенты корреляции между индексом АМО и циклонической активностью в Европе и Северной Атлантике

Как видно, картина, полученная для региона северной Атлантики и Европы, кардинально отличается от той, что наблюдается для северного полушария в целом. Скорее всего, это можно объяснить слишком большими масштабами полушария, а потому сложностью происходящих в нем процессов. Таким образом, ни одно из рассмотренных колебаний не описывает в полной мере происходящие здесь процессы.

Опять на всех временных зависимостях чётко прослеживаются два периода, точка схемы сценариев развития приходится на период приблизительно 1965-1985 гг.

2.9 Исследование характеристик циклонов на скрытые колебания

В ходе работы все характеристики циклонов были исследованы на скрытые колебания с использованием вейвлет-анализа. На рисунках 2.41 изображены частотно-временные портреты количества циклонов в северном и южном полушарии соответственно. Светло-синим цветом обозначены наиболее слабые колебания, красным – наиболее сильные. Как видно, в начале периода (приблизительно до 70-х годов) в северном полушарии наблюдались сильные 22-летние колебания, в 50-х, а также с 70-х до 90-х годов прослеживались колебания с периодом приблизительно 6-7 лет, в последние годы стало усиливаться 4-летнее колебание.

В южном полушарии (см. рисунок 2.42) колебания более слабые, но и здесь в начале периода (приблизительно до 70-х годов) прослеживается 22-летнее колебание. Кроме того, в начале периода также отмечается колебание с периодом около 6-7 лет, но оно имеет меньшую амплитуду, чем в северном полушарии и менее продолжительно по времени.

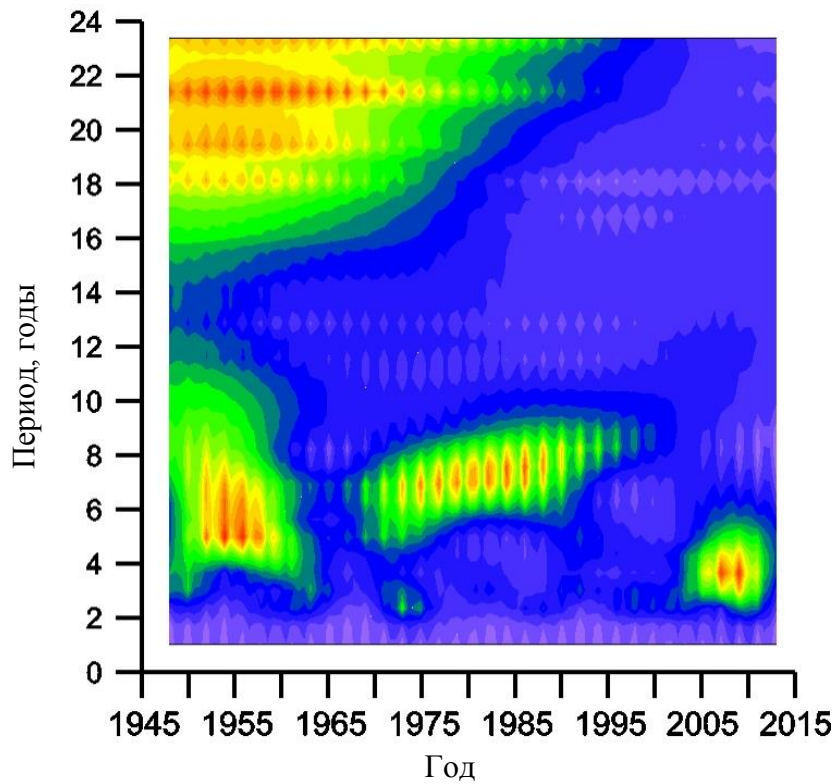


Рисунок 2.41 – Частотно-временной портрет количества циклонов в северном полушарии

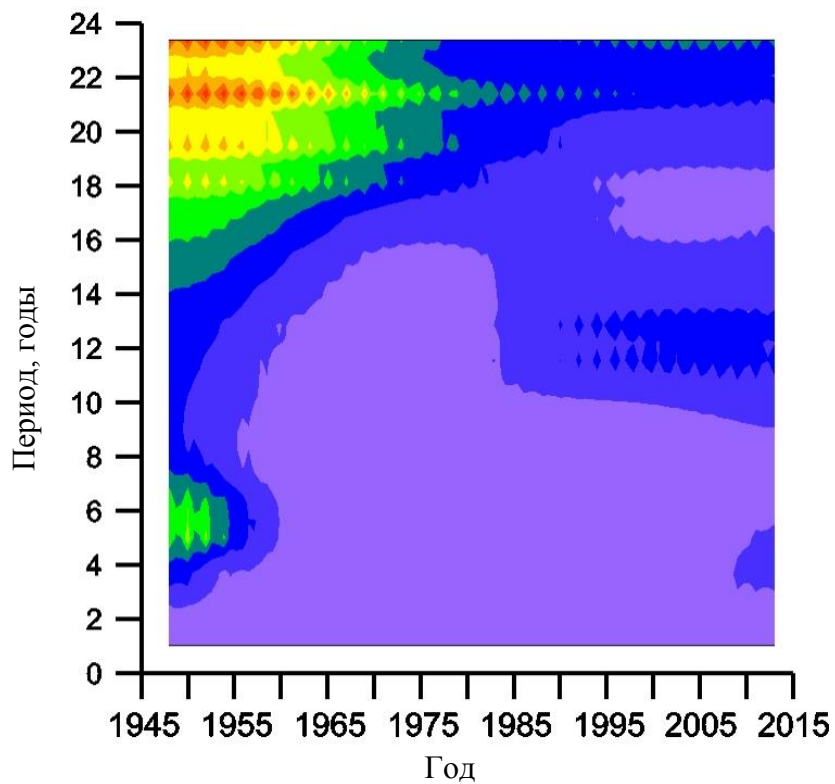


Рисунок 2.42 – Частотно-временной портрет количества циклонов в южном полушарии

Если говорить о связи выявленных колебаний с какими-либо внутренними или внешними параметрами, то, к сожалению, в рамках исследования невозможно оценить связи климатических изменений со всеми возможными изменениями внешних и внутренних параметров, действующих на земную атмосферу. Однако, по мнению автора, 22-летние колебание можно объяснить 22-летним циклом солнечной активности, которое в свою очередь состоит из одиннадцатилетних колебаний разных знаков. Признание реальности 22-летнего цикла солнечной активности произошло благодаря американскому астроному Джорджу Эллери Хейлу (George Ellery Hale), который определил, что полярность магнитных полей ведущих (хвостовых) пятен северного (южного) полушария Солнца изменяется на противоположную при переходе от одного 11-летнего цикла к другому [95].

Колебание с периодом в 7 лет можно связать с явлением резонанса двух колебаний: магнитных полюсов Земли: с периодом около 14 месяцев и сезонного с периодом 12 месяцев. Первое колебание связано с небольшими колебаниями планеты относительно оси вращения. Магнитные полюса перемещаются по земной поверхности вокруг среднего полюса в направлении вращения Земли, то есть с запада на восток. Соответственно, эти колебания влияют, прежде всего, на океан. Так как влияние атмосферы на океан проявляется через передачу ему количества движения, а океана на атмосферу через передачу энергии, то можно предположить, что именно колебания в передаче тепла океаном влияют на образование циклонов. Закручивание и раскручивание траектории полюса объясняется тем, что он совершает два периодических движения: свободное или чандлеровское (названо в честь открывшего его в 1891 г. С. Чандлера) с периодом около 14 месяцев и вынужденное - с годовым периодом. Чандлеровское движение полюсов возникает, если ось вращения Земли отклонена от оси ее наибольшего момента инерции. Движение полюсов, вызванное действием на Землю периодических сил атмосферы и гидросферы, называется вынужденным. Нетрудно посчитать,

что эти колебания совпадают приблизительно раз в семь лет. Сложение этих движений и дает наблюдаемую картину [99].

Из физики известно, что если несколько волн с волновыми числами K_i и частотами ω_i , вступают в резонанс, то при этом окончательная частота определяется равенствами (2.4) и (2.5).

$$\sum_i K_i = 0, \quad (2.4)$$

$$\sum_i \omega_i = 0 \quad (2.5)$$

Период резонанса, согласно этим выражениям, составит 7 лет.

В ходе работы вейвлет-анализу также подверглись такие характеристики циклонов как глубина и циклоническая активность. На рисунке 2.43 представлен частотно-временной портрет глубины циклонов северного полушария, на рисунке 2.44 он же, но более детальный, для колебаний с меньшей частотой. Красным цветом обозначены наиболее сильные колебания.

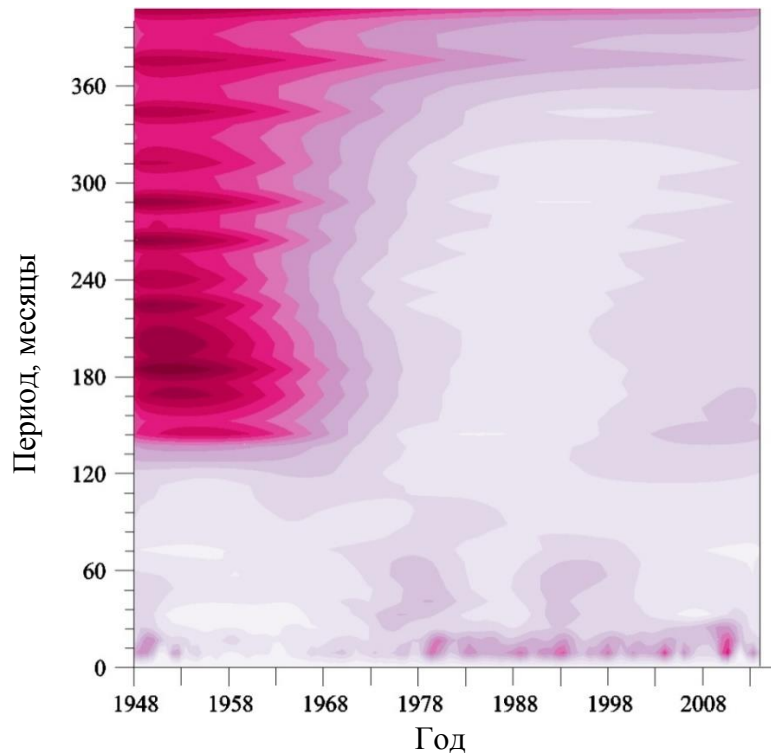


Рисунок 2.43 – Частотно-временной портрет глубины циклонов в северном полушарии

Как следует из анализа частотно-временных портретов, приблизительно до 70-х годов наблюдались довольно сильные колебания, период которых составляла от 12 до 30 лет. Наиболее яркие из них можно объяснить влиянием солнечной активности (с периодом в 15, 22 и 24 года). В последние же годы такой силы колебаний не наблюдается. Во весь исследуемый период сильными являются более мелкие колебания, чтобы рассмотреть их, обратимся к рисунку 2.44.

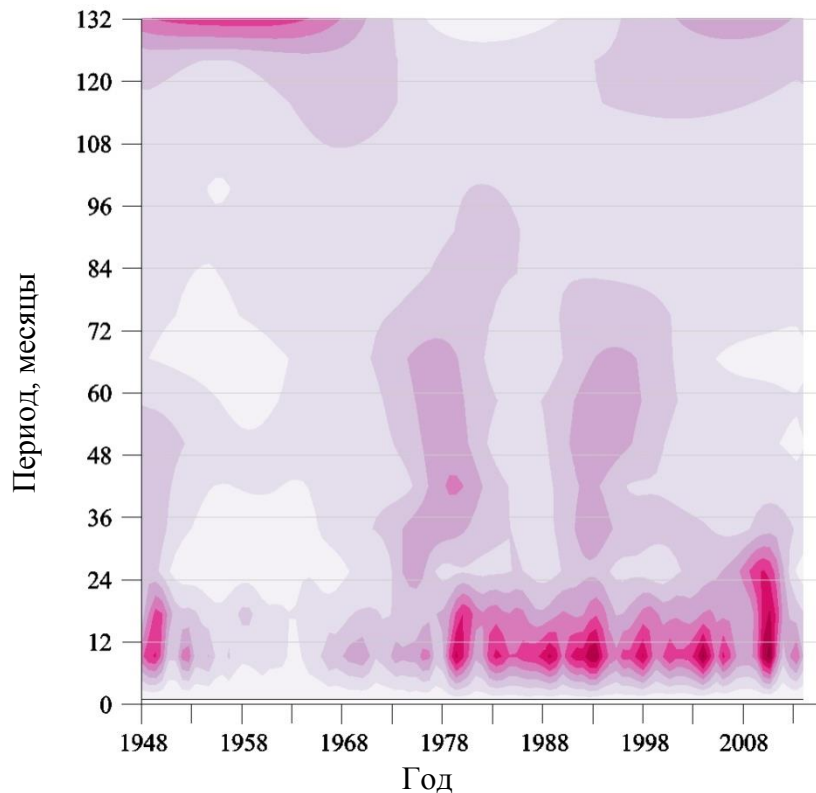


Рисунок 2.44 – Частотно-временной портрет глубины циклонов в северном полушарии

Как следует из анализа частотно-временного портрета, представленного на рисунке 2.44, в начале периода в глубине циклонов прослеживались колебания с частотой приблизительно год. Потом они становятся менее ярко выраженными и вновь возобновились лишь с конца 70-х. Очевидно, что это колебание сезонное и зависит от вращения Земли вокруг Солнца. Интересным здесь является факт, что в последние годы усилилось квазидвухлетнее колебание, которое является одной из наиболее значимых высокочастотных компонент межгодовых собственных колебаний атмосферы и наиболее сильно прослеживается в верхних слоях атмосферы [125].

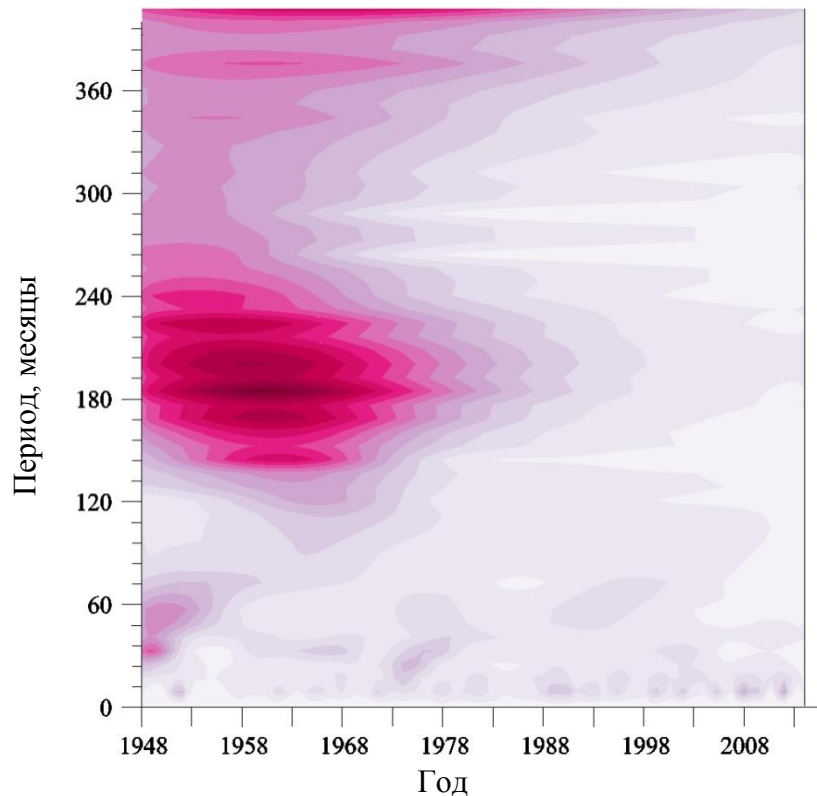


Рисунок 2.45 – Частотно-временной портрет глубины циклонов в южном полушарии

На рисунке 2.45 представлен частотно-временной портрет глубины циклонов для южного полушария. Здесь особенно сильна гармоника с периодом в 15 лет. Остальные, более слабые, с периодом около 12, 17 и 19 лет. Предположительно, эти колебания связаны с влиянием солнечной активности. Если рассмотреть волны с более низкой частотой (см. рисунок 2.46), то видно, что хотя также присутствуют гармоники с периодом в 1 год, но их интенсивность значительно ниже, чем в северном полушарии. Кроме того, в начале периода наблюдалось колебание с периодом около 4 лет, в 60-х же заметно влияние 11-летнего колебания.

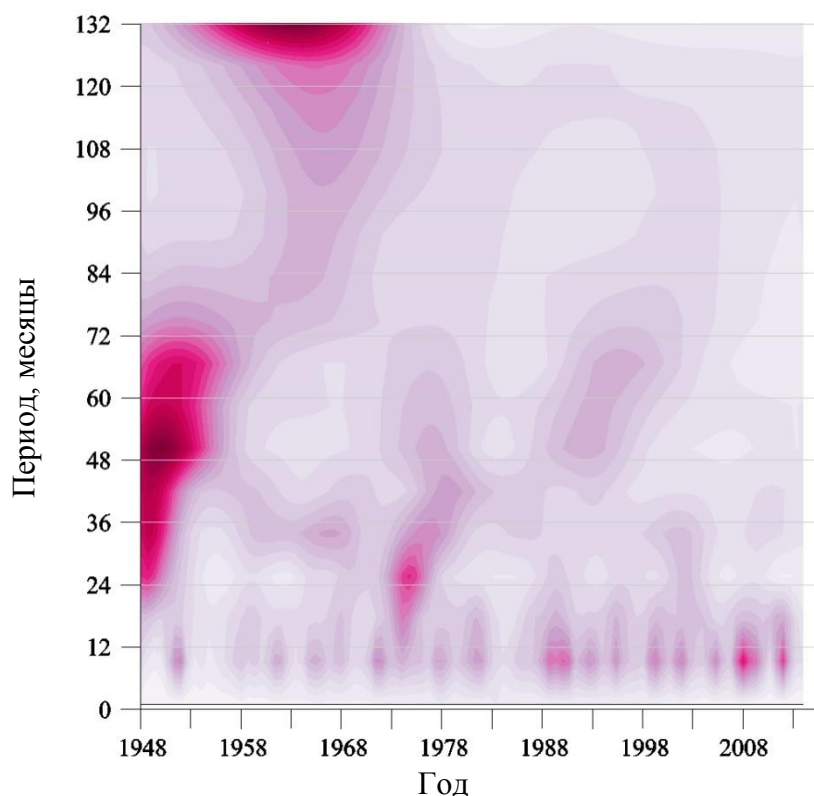


Рисунок 2.45 – Частотно-временной портрет глубины циклонов в южном полушарии

Что касается циклонической активности, то её колебания более слабые и имеют меньшую периодичность (см. рисунок 2.46). Отчетливо прослеживаются только колебания с периодом около одного года.

Выводы из главы

По результатам реанализа NCEP/NCAR нет однозначной связи между изменением глобального климата последних десятилетий и характеристиками циклонических режимов. Однако во всех исследованиях получено, что в восьмидесятые года XX столетия произошло изменение в циклонических процессах и в их связях с основными характеристиками циркуляции атмосферы и внешними геофизическими параметрами системы Земли-океан-атмосферы.

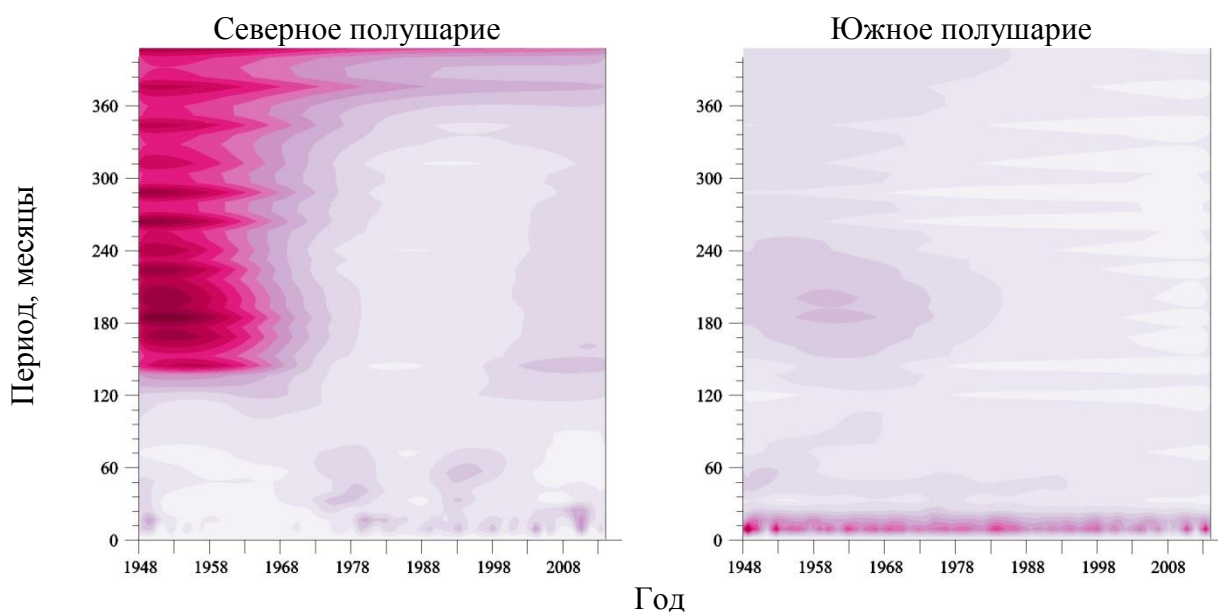


Рисунок 2.46 – Частотно-временной портрет циклонической активности в северном (левая панель) и южном (правая панель) полушариях

Согласно исследованию, изменение характеристик и количества барических депрессий весьма неоднозначно и зависит от многих факторов. Так, количество циклонов в обоих полушариях стало увеличиваться только с 90-х годов, однако анализируя весь ряд, можно предположить, что изменения в обоих случаях носят периодический характер и наблюдались во всю историю земной атмосферы. Выявлено, что количество и характеристики циклонов во многом (но не полностью) определяются известными климатическими индексами. Так, процессы в северном полушарии хорошо коррелируют с изменением величины Атлантической мульти-декадной осцилляции, а в южном – с Южным колебанием. В результате исследования выявлено, что Атлантическое мульти-декадное колебание, являясь низкочастотной составляющей Северо-Атлантического колебания, лучше описывает происходящие в масштабах полушария процессы, чем само Северо-Атлантическое колебание. Кроме того, установлены корреляционные связи Южного колебания с процессами в северном полушарии. Эти дальние связи

достаточно малы и не периодичны (как и само Южное колебание), но они, безусловно, есть. По мнению автора, существует совместное влияние на циклонические режимы собственных колебаний сложной динамической системы Земля-океан-атмосфера и антропогенного форсинга, который частично проявляется через естественные геофизические процессы. Что касается размаха глубины циклонов, то в северном эта величина гораздо больше, чем в южном, кроме того, здесь сильнее проявляются флуктуации давления. В обоих полушариях в холодное время года наблюдается максимальная аномалия площади. Есть между полушариями и различия. Так, в северном полушарии наибольшей глубины циклоны достигают в холодное время года, а наиболее близки они к климатической норме напортив в теплое, в южном полушарии наиболее глубокие циклоны встречаются летом, а наименее глубокие – осенью. Также в северном полушарии циклоническая активность больше обуславливается глубиной циклонов, нежели их количеством, в южном зависимость не такая однозначная. В результате исследования выявлены колебания, которые дают основание связать изменения количества и характеристик циклонов с солнечной активностью, с собственными колебанием земной атмосферы, а также с колебанием положения магнитных полюсов планеты.

3 Анализ характеристик циклонических режимов на основе данных реанализа ERA-INTERIM

3.1 Анализ количества циклонических ситуаций

Для оценки результатов реанализа ERA-INTERIM и сравнения их с результатами реанализа NCEP/NCAR проводились эксперименты с пороговым значением давления, используемым при идентификации циклонов. Были проведены численные эксперименты со значениями давления 995 гПа, 1000 гПа, 1005 гПа, 1010 гПа и 1015 гПа. Далее рассмотрим результаты экспериментов с наиболее показательными значениями порогового давления – 1015 гПа и 1000 гПа. Напомним, что аналогичные эксперименты с полями давления реанализа NCEP/NCAR показали, что оптимальным пороговым давлением является значение 1015 гПа.

В численных экспериментах по результатам реанализа ERA-INTERIM в обоих полушариях было выявлено большее количество циклонов (см. рисунок 3.1), чем в реанализе NCEP/NCAR (см. рисунок 2.1). И это несмотря на тот факт, что в экспериментах с полями реанализа ERA-INTERIM расчет происходил с учетом «зоны влияния» и ограничением ее горизонтальных размеров, то есть учитывалось, что возможно существование многоцентровых циклонов. Различие в результатах объясняется тем, что реанализ ERA-INTERIM имеет более высокое пространственное разрешение, а значит воспроизводит также и те циклоны, размеры которых меньше разрешающей способности сетки реанализа NCEP/NCAR. Шаг сетки в данных реанализа NCEP/NCAR 2.5° по широте и долготе, следовательно, могут быть воспроизведены циклоны с размером по горизонтали больше 5° по широте и долготе, а уверенно будут описаны синоптические вихри, только начиная с диаметра 10° по широте и долготе. В реанализе же ERA-INTERIM будут

воспроизводиться циклоны с горизонтальными размерами больше 1.5° по широте и долготе.

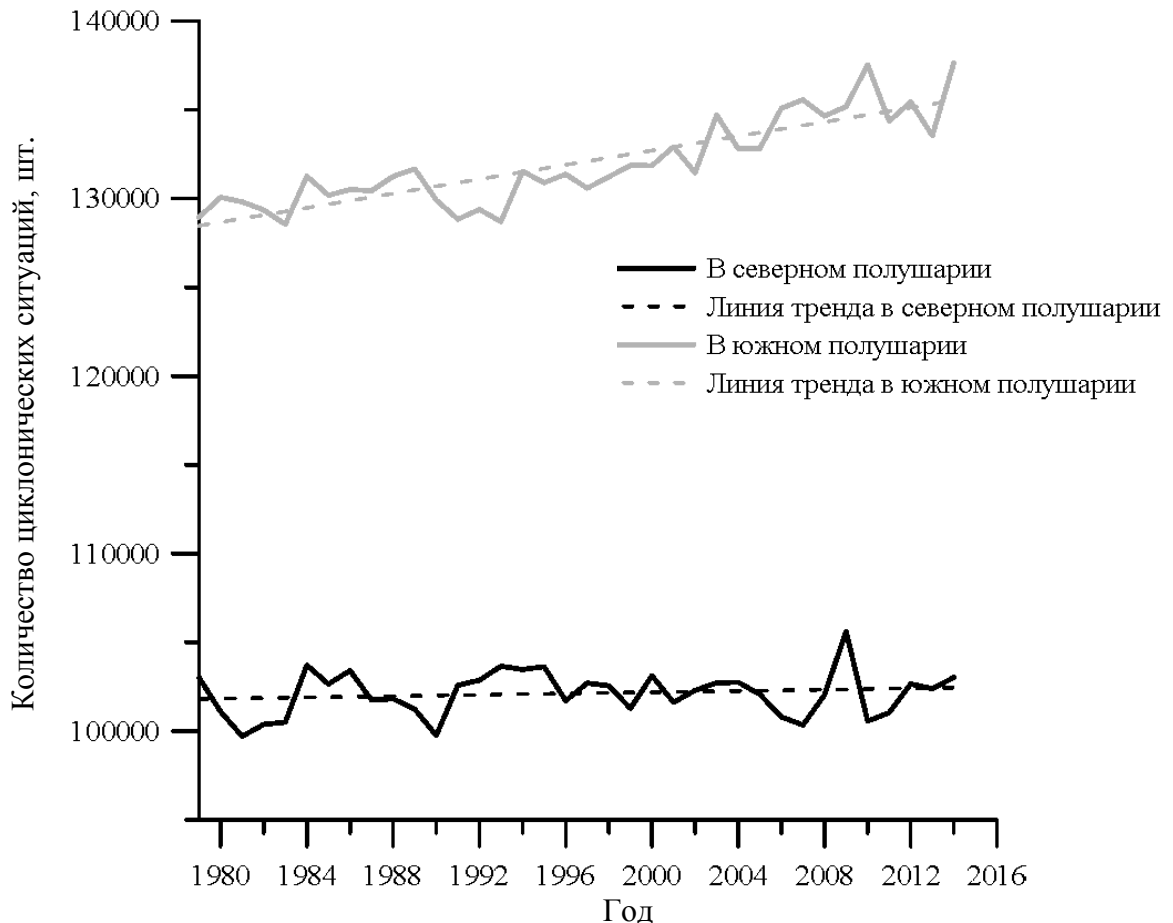


Рисунок 3.1 – Динамика временной изменчивости количества циклонических ситуаций в северном и южном полушариях, оцененная по результатам реанализа ERA/INTERIM

В результате в южном полушарии циклонов было обнаружено приблизительно на 25% больше, чем в северном. Изменение количества циклонов в северном полушарии менее значительно, чем в южном: количество циклонов здесь почти не меняется, в южном же есть небольшой прирост, но в сравнении с общим количеством циклонов он совсем незначительный. При разнице в количестве идентифицированных циклонов общие закономерности временной динамики сохраняются. Только произвести анализ связи количества

циклонов с Атлантическим мульти-декадным колебанием невозможно из-за малой длины ряда реанализа ERA-INTERIM.

Если при работе с реанализом NCEP/NCAR для фильтрации неглубоких циклонов искусственно исключались приэкваториальные регионы, то при анализе результатов ERA-INTERIM, как уже отмечалось, было принято решение снизить пороговое значение. Количество циклонов идентифицированных по полю давления реанализа ERA-INTERIM с пороговым значением 1010 гПа и 1000 гПа представлено на рисунках 3.2 и 3.3, соответственно.

Как видно из совместного анализа рисунков 3.1-3.3, при снижении порогового значения давления в алгоритме численной идентификации циклонов, уменьшается количество обнаруженных циклонов. В северном полушарии их количество уменьшилось приблизительно в три раза, в южном приблизительно в шесть. Из этого можно сделать вывод, что в обоих полушариях преобладают циклоны неглубокие, но в южном полушарии их особенно много. Отфильтровав такие барические образования, мы получаем оценки наиболее мощных циклонов, которых в северном полушарии больше.



Рисунок 3.2 – Временной ход количества циклонических ситуаций в северном и южном полушариях по результатам реанализа ERA-INTERIM с пороговым значением давления 1010 гПа



Рисунок 3.3 – Временной ход количества циклонических ситуаций в северном и южном полушариях по результатам реанализа ERA-INTERIM с пороговым значением давления 1000 гПа

Интересным является тот факт, что изменения количества циклонов с давлением в центре меньше 1000 гПа в последние десятилетия незначительны. Поэтому, чтобы понять динамику изменений в циклонических режимах в атмосфере нужно оценивать другие климатические характеристики циклонов и их изменчивость.

Необходимо заметить, что пороговое значение давления при идентификации циклонов влияет только на масштабы циклонических образований, участвующих в анализе, но не снижает качество идентификации. Поэтому для того, чтобы полнее описать все временные изменения, происходящие с циклоническими режимами в атмосфере обоих полушарий, в дальнейшем будут рассмотрены результаты идентификации циклонов с использованием порогового значения, позволяющим воспроизвести

наибольшее их количество, то есть с пороговым значением 1015 гПа, как и при обработке данных реанализа NCEP/NCAR.

3.2 Исследование глубины циклонов на основе результатов реанализа ERA-INTERIM

Характеристикой глубины циклона является давление в его центре и горизонтальные размеры циклонического вихря. Среднее давление в центре циклонического образования рассчитывалось согласно методике, описанной в пункте 2.2. Аналогичным же образом из рассчитанных среднемесячных значений находилось минимальное и максимальное, которое в дальнейшем мы будем именовать, как и ранее, «минимальным» и «максимальным» давлением в центре циклона. Временной ход минимального и максимального годового давления в центре циклона представлен на рисунке 3.4.

Как видно из анализа зависимости, приведённой на рисунке 3.4, на основе реанализа ERA-INTERIM можно сделать тот же вывод, как и при анализе результатов идентификации циклонов по NCEP/NCAR – циклоны в северном полушарии много глубже циклонов южного. Амплитуда колебаний давления в глубоких циклонах приблизительно в 2 раза больше, чем в наименее глубоких. В северном полушарии даже наименее глубокие циклоны все-таки имеют меньшее давление в центре, чем наиболее глубокие циклоны в южном полушарии. Кроме того, в северном полушарии больше амплитуда колебаний экстремальных значений. Амплитуда изменения (размах) «минимального» давления в северном полушарии составляет приблизительно 6 гПа, а «максимального» около 3 гПа. В южном же полушарии величина размаха давления в наименее глубоких циклонах составляет около 2 гПа, в наиболее глубоких – 1 гПа.

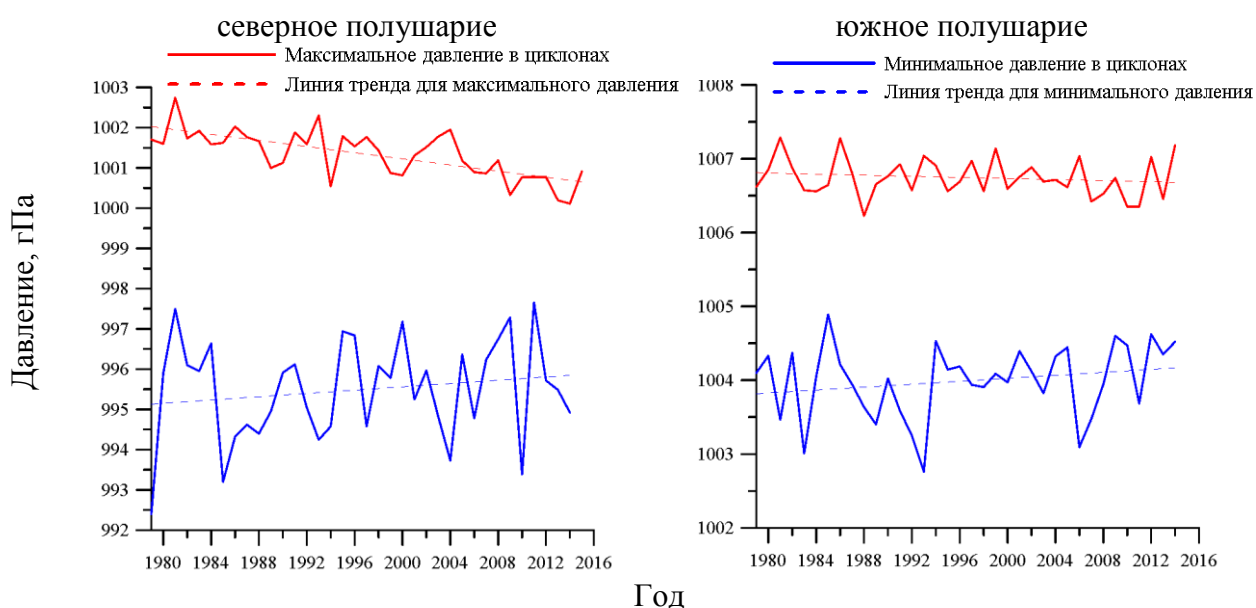


Рисунок 3.4 – «Минимальное» и «максимальное» среднегодовое давление в циклонах северного и южного полушария

В южном полушарии давление в центре экстремальных циклонов мало меняется, однако в северном есть тенденция к уменьшению разницы между минимальными и максимальными значениями давления в циклонах, что не соответствует результатам, полученным при анализе полей NCEP/NCAR. Объяснить это несоответствие можно большим количеством циклонов, участвующих в оценках по ERA-INTERIM. Как уже отмечалось, в анализе увеличилось количество неглубоких циклонов и именно они, по всей видимости, снижают анализируемые экстремальные значения давления.

Анализ сезонов, на которые приходятся экстремальные значения давления в центре циклона показал результаты (схожие с оценками по NCEP/NCAR), которые представлены на рисунках 3.5 и 3.6. В северном полушарии наиболее глубокие циклоны чаще приходятся на февраль, наименее глубокие – на июль.

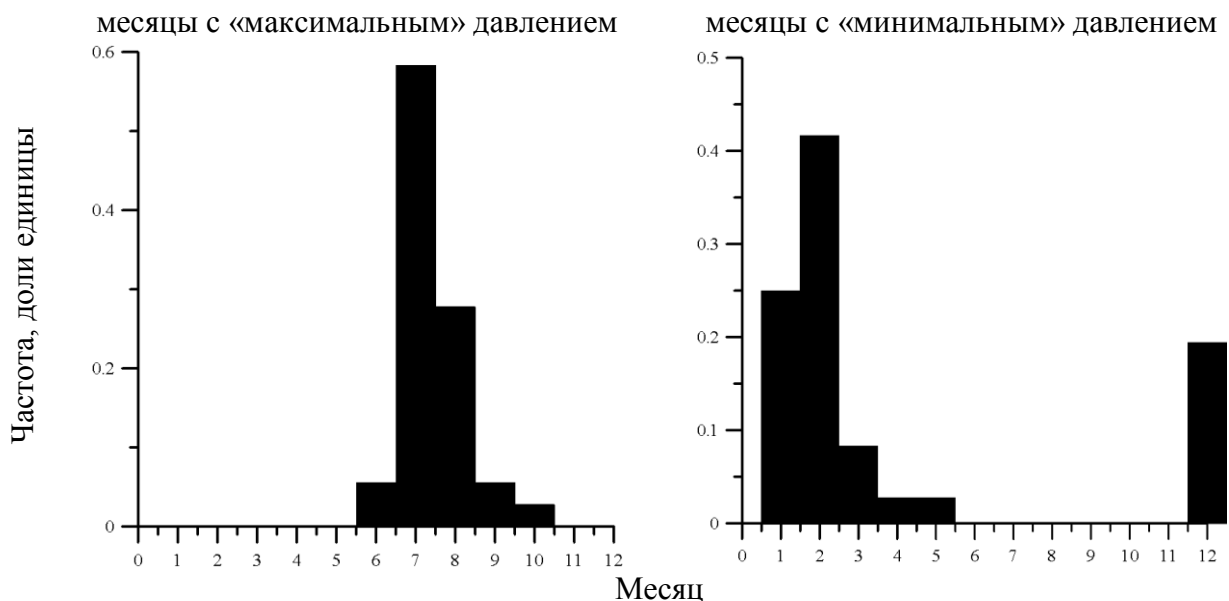


Рисунок 3.5 – Частота повторяемости «минимального» и «максимального» среднемесячного давления в циклонах в северном полушарии

По результатам анализа глубины циклонов в южном полушарии на основе реанализа ERA-INTERIM наиболее глубокие циклоны чаще наблюдаются в январе (также как и в анализе реанализа NCEP/NCAR), наименее же глубокие чаще отмечаются в сентябре и октябре (в реанализе NCEP/NCAR – апрель и май)

Площадь циклонов определялась по методике, применяемой и для анализа результатов реанализа NCEP/NCAR, описанной в 1.3. Для анализа площадей циклонов были рассчитаны нормированные значения величины аномалии площади. Расчет происходил в два этапа: сначала рассчитывалась аномалия, которая нормировалась на максимальное значение. Также анализировался сезонных ход аномалий площадей циклонов в северном и южном полушариях. Гистограммы результатов представлены на рисунках 3.7 и 3.8.

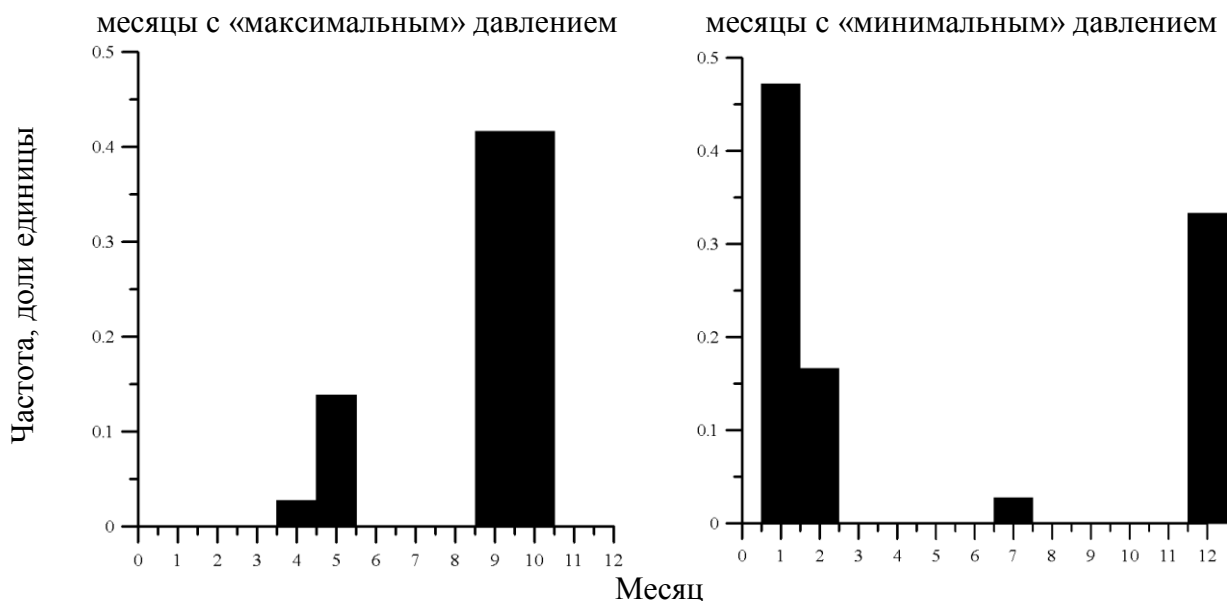


Рисунок 3.6 – Частота повторяемости «минимального» и «максимального» среднемесячного давления в циклонах в южном полушарии

3.3 Исследование площади циклонов на основе результатов реанализа ERA-INTERIM

В северном полушарии максимальная аномалия площади циклонов наблюдается в феврале, минимальная – в весенние и летние месяцы (с 1980 года для реанализа NCEP/NCAR максимальные аномалии площади также наблюдались в феврале, минимальные в июле)

В южном полушарии (см. рисунок 3.8) максимальные аномалии площади циклонов достигали в июле (согласуется с NCEP/NCAR), минимальные аномалии площади чаще всего наблюдались в феврале (что также согласуется с NCEP/NCAR).

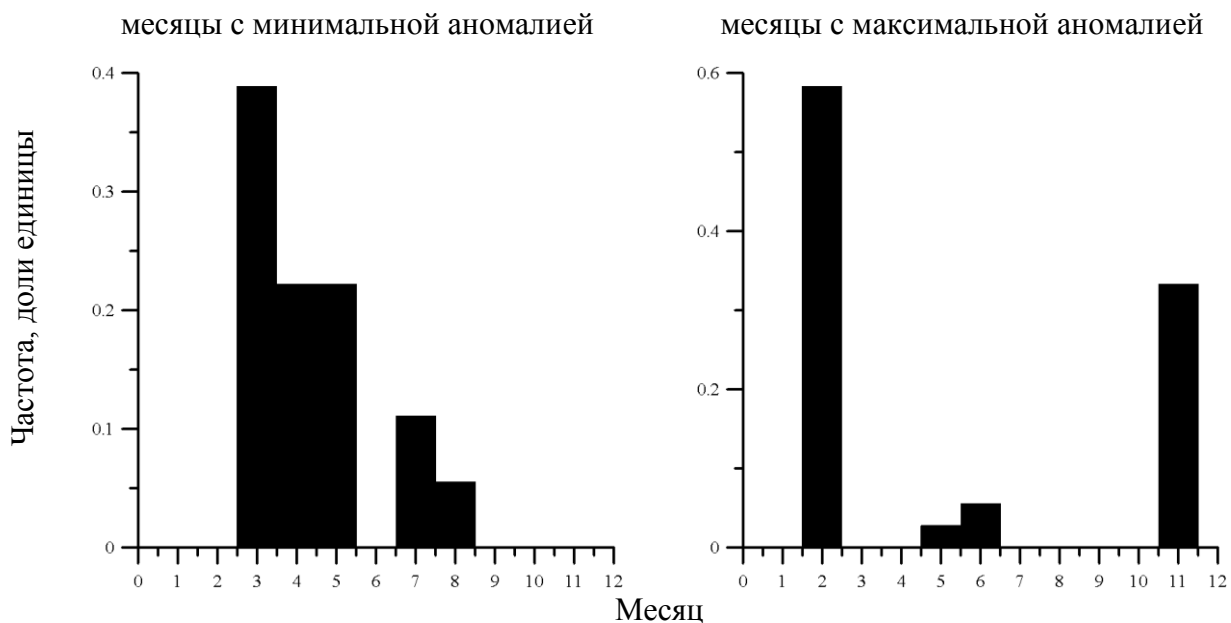


Рисунок 3.7 – Частота повторяемости максимальных и минимальных аномалий площади в северном полушарии

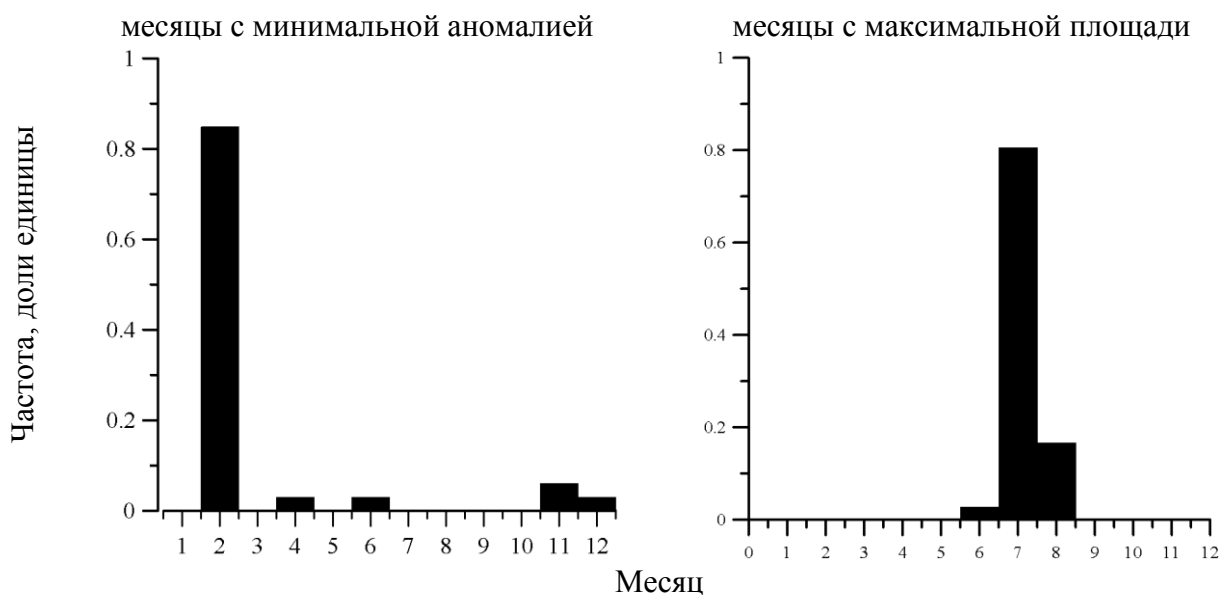


Рисунок 3.8 – Частота повторяемости максимальных и минимальных аномалий площади в южном полушарии

3.4 Исследование объема переносимого циклонами приземного воздуха на основе результатов реанализа ERA-INTERIM

В отличие от результатов, полученных при анализе данных NCEP/NCAR, оценка количества переносимого циклонами приземного воздуха по данным ERA-INTERIM позволяет сделать более четкие выводы. Это связано с лучшим разрешением реанализа ERA-INTERIM, которое позволяет идентифицировать более мелкие барические образования. Значит, если по данным реанализа NCEP/NCAR в какой-либо области идентифицировался всего один циклон и оценивалась его площадь, которой, естественно, присваивалось достаточно большое значение (что влияло на оценку объема и уменьшало горизонтальный градиент давления), то в полях давления реанализа ERA-INTERIM в той же самой области могло быть найдено несколько более мелких циклонов, вычисление площади которых происходило более точно и точнее определялся горизонтальный градиент давления. Таким образом, в оценках по данным реанализа NCEP/NCAR могли быть ошибочно определены бóльшие площади и объемы, чем есть на самом деле. Эти ошибки в оценках по реанализу ERA-INTERIM исправлены.

В ERA-INTERIM даже само распределение нормированных аномалий объема имеет меньшую дисперсию, ярко прослеживается сезонность. Минимальный объем воздуха циклонами северного полушария чаще переносится в теплое время года (почти с одинаковой частотой выпадает на май и август). Максимальные же объемы приземного воздуха в северном полушарии чаще выпадают на февраль. Последнее особенно интересно. В виду того, что в это время велик контраст температур между экватором и полюсом, то максимальные объемы воздуха, переносимые в это время года могут показывать интенсификацию тепло- и влагообмена между широтами. Этот вопрос будут рассмотрен дальше при анализе связи характеристик циклонических режимов и индексов циркуляции.

В южном полушарии минимальная аномалия объема переносимого приземного воздуха чаще наблюдается в ноябре (для реанализа NCEP/NCAR был февраль). Максимальные же аномалии чаще всего приходятся на сентябрь

(в NCEP/NCAR с одинаковой частотой отмечались апрель, май, июнь и сентябрь).

3.5 Исследование циклонической активности на основе данных реанализа ERA-INTERIM

По результатам реанализа ERA-INTERIM были получено, что минимальная величина аномалии циклонической активности в северном полушарии наблюдается в мае и июле (в реанализе NCEP/NCAR также был получен июль). Максимальная же нормированная аномалия отмечается в зимние месяцы, максимальная частота приходится на декабрь и февраль (в реанализе NCEP/NCAR после 1980 года также отмечался февраль). Таким образом, в летние месяцы, циклоны в северном полушарии наименее глубокие относительно климатической нормы, наиболее же глубокие относительно климатической нормы циклоны наблюдаются в зимнее время.

По результатам исследования, основанном на реанализе ERA-INTERIM, в южном полушарии максимальная аномалия циклонической активности наблюдается в июле (в NCEP/NCAR после 1980 года также отмечался июль), минимальная – в марте (в NCEP/NCAR после 1980 года чаще отмечался декабрь). Стоит учесть, что оценки, полученные по результатам реанализа NCEP/NCAR, более размыты и нечетки в виду того, что здесь детектируется меньшее количество барических депрессий, полученные с его помощью оценки можно отнести и ко всему сезону (холодному или тёплому) в целом.

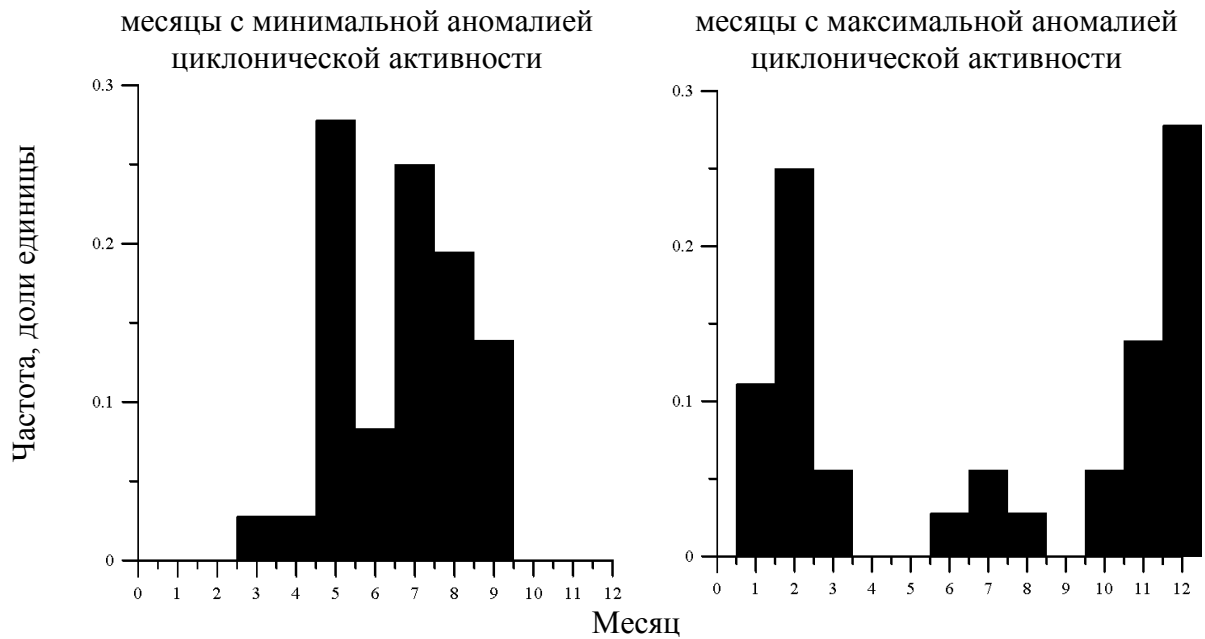


Рисунок 3.9 – Частота повторяемости максимальной и минимальной аномалии циклонической активности в северном полушарии

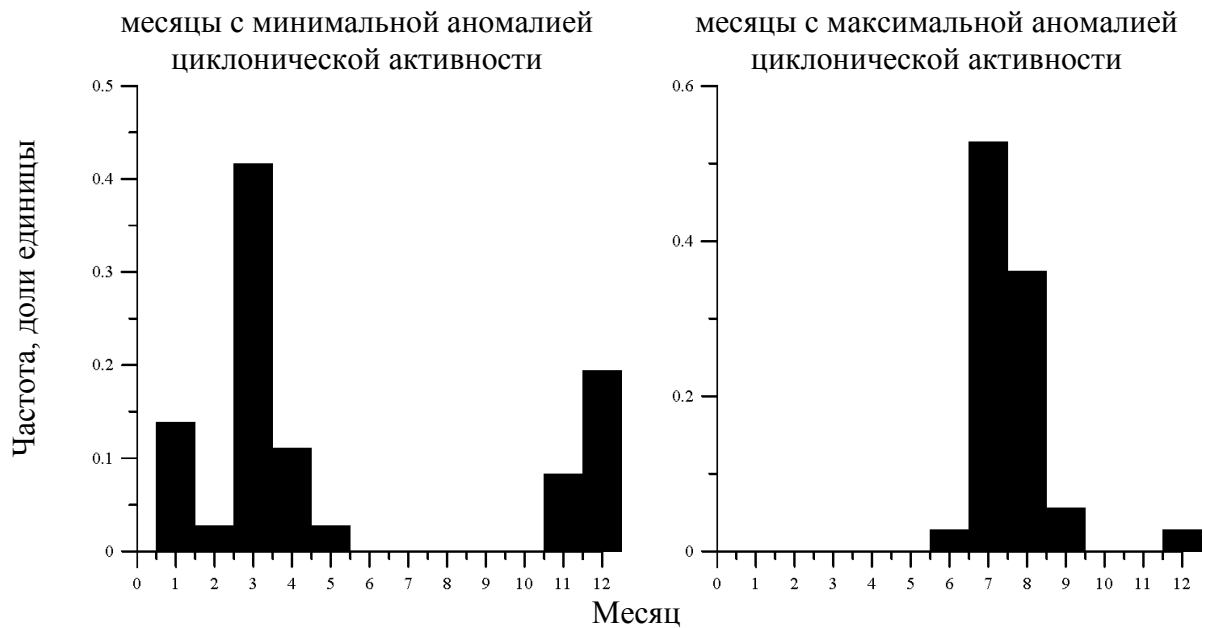


Рисунок 3.10 – Частота повторяемости максимальной и минимальной аномалии циклонической активности в южном полушарии

Так как индекс циклонической активности является одной из основных характеристик циклонических режимов, то очень интересным было определение корреляционной связи индекса САИ с количеством и глубиной

циклонов, особенно учитывая, что результаты, полученные по оценкам и циклонической активности и характеристик циклонов несколько отличаются при численных экспериментах с разными реанализами. Коэффициент корреляции оценивался с помощью *t*-статистики Стьюдента (уровень значимости составлял 99.5%). Рассматривались сглаженные временные ряды – окно осреднения составляло три года.

Коэффициенты корреляции между циклонической активностью и количеством циклонов, оцененные по результатам реанализа ERA-INTERIM, оказались более низкими. Результат оценки коэффициентов корреляции и их значимость представлена в таблице 3.1. Как и ранее цифрой «1» обозначаются значимые коэффициенты корреляции, а цифрой «0» коэффициенты корреляции, чей уровень значимости ниже 99.5%.

Таблица 3.1 – Коэффициент корреляции циклонической активности и количества циклонов

Месяц	Коэффициент корреляции		Значимость	
	Северное полушарие	Южное полушарие	Северное полушарие	Южное полушарие
Январь	0.37	-0.44	1	1
Февраль	0.46	-0.31	1	1
Март	0.05	-0.74	0	1
Апрель	-0.01	-0.48	0	1
Май	-0.31	-0.20	1	0
Июнь	-0.19	0.23	0	0
Июль	-0.31	0.73	1	1
Август	-0.40	0.57	1	1
Сентябрь	-0.23	0.17	0	0

Продолжение таблицы 3.1

Месяц	Коэффициент корреляции		Значимость	
	Северное полушарие	Южное полушарие	Северное полушарие	Южное полушарие
Октябрь	-0.09	-0.23	0	0
Ноябрь	0.49	-0.26	1	0
Декабрь	0.35	-0.42	1	1

Приблизительно такие же закономерности прослеживаются и при определении коэффициентов корреляции между индексом циклонической активности и глубиной циклонов, которые представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2–Коэффициент корреляции циклонической активности и глубины циклонов

Месяц	Коэффициент корреляции		Значимость	
	Северное полушарие	Южное полушарие	Северное полушарие	Южное полушарие
Январь	0.33	-0.43	1	1
Февраль	0.49	-0.22	1	0
Март	0.04	-0.72	0	1
Апрель	-0.04	-0.41	0	1
Май	-0.30	-0.18	1	0
Июнь	-0.22	0.24	0	0
Июль	-0.27	0.76	0	1
Август	-0.37	0.62	1	1
Сентябрь	-0.21	0.24	0	0
Октябрь	-0.08	-0.17	0	0
Ноябрь	0.47	-0.19	1	0

Продолжение таблицы 3.2

Месяц	Коэффициент корреляции		Значимость	
	Северное полушарие	Южное полушарие	Северное полушарие	Южное полушарие
Декабрь	0.35	-0.36	1	1

Как видно, корреляционные связи циклонической активности с количеством и глубиной циклонов в обоих полушариях меньше, чем при исследовании полей реанализа NCEP/NCAR. По этим результатам можно судить о том, что процессы, происходящие в атмосфере, в реанализе ERA-INTERIM воспроизводятся лучше за счёт более близкого к действительности описания сложных прямых и обратных связей, данные более точные, здесь учтено большее количество влияющих на них факторов. В виду этого, а также из-за не очень большой продолжительности ряда, сложно оценить влияние, которое оказывал какой-либо один из множества факторов. Общие же закономерности в обоих наборах данных совпадают.

На рисунках 3.11 и 3.12 представлены коэффициенты корреляции циклонической активности с глубиной и количеством циклонов. Пунктирными линиями обозначены значения 0.2, 0.5, 0.7 и 0.9, с помощью которых можно определить степень связи между разными явлениями. Красными цифрами кодируется значимость, также как было и ранее.

Как видно из анализа графиков, представленных на рисунках 3.11 и 3.12, корреляционные зависимости между циклонической активностью и количеством циклонов в разных полушариях очень похожи между собой. Значимые отрицательные корреляционные связи в обоих полушариях отмечаются летом, положительные – зимой, в переходные сезоны коэффициент корреляции близок к нулю и не значим. При анализе этих корреляционных зависимостей более четко видно, что сила циклонической активности может определяться как глубиной циклонов, так и их количеством.

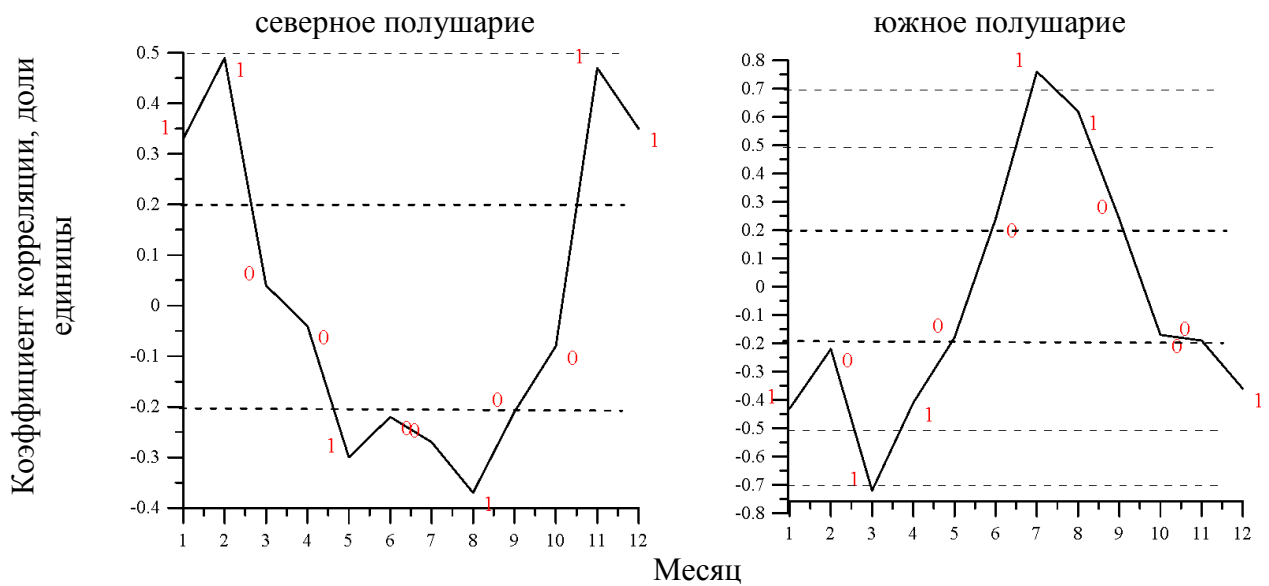


Рисунок 3.11 – Коэффициент корреляции между циклонической активностью и глубиной циклонов

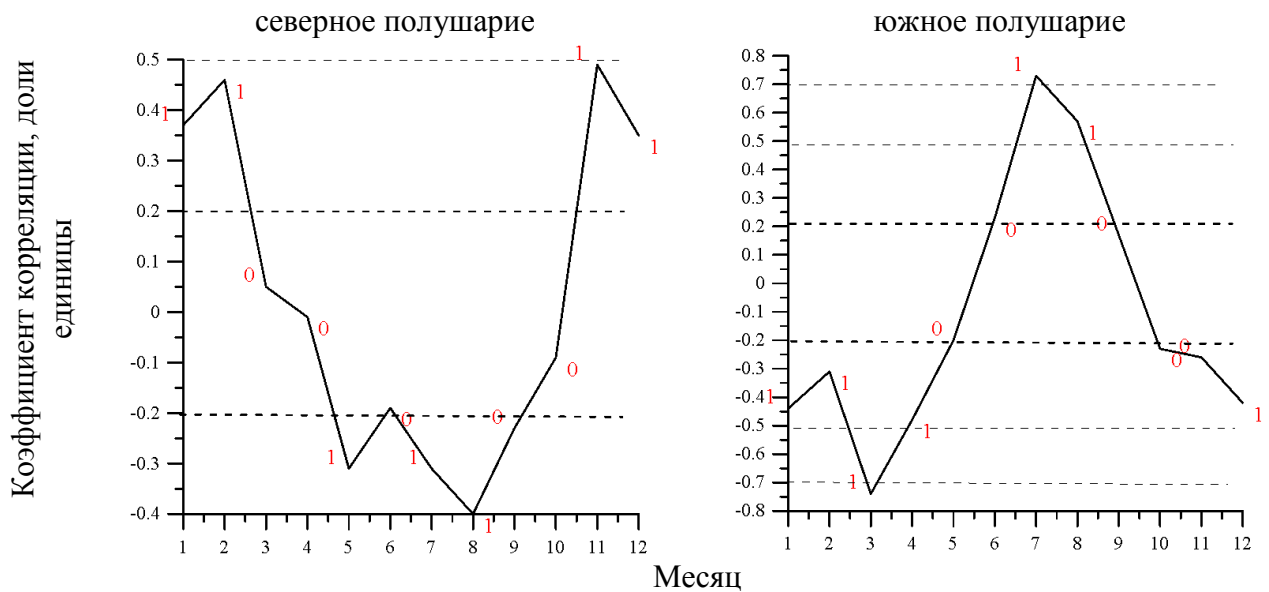


Рисунок 3.12 – Коэффициент корреляции между циклонической активностью и количеством циклонов

3.6 Связь Северо-Атлантического колебания и характеристик циклонов северного полушария

Аналогично тому, как при работе с реанализом NCEP/NCAR (пункт 2.6) на основе данных о характеристиках циклонических режимов южного и северного полушарий, рассчитанных по реанализу ERA-INTERIM, были определены коэффициенты корреляции между индексом Северо-Атлантического колебания и основными характеристиками циклонических режимов. Для расчёта коэффициентов корреляции использовались вышеупомянутые формулы t -статистики Стьюдента (формулы 3.1-3.3)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (3.1)$$

где X_i – текущие значения предиктора;

Y_i – текущие значения предиктанта;

\bar{X} – среднее значение в рассматриваемый месяц и период наблюдений;

\bar{Y} – среднее значение в рассматриваемый месяц и период наблюдений;

N – количество лет в выбранном периоде наблюдений.

Достоверность найденных коэффициентов корреляции оценивалась с помощью t -статистики Стьюдента.

Значение коэффициентов корреляции рассчитывалось по формуле (3.2), достоверность – по формуле (3.3).

$$r_{кр} = \frac{t_{\beta}}{(n-2+t_{\beta}^2)^{0.5}}, \quad (3.2)$$

где $r_{кр}$ – Критическое значение коэффициента корреляции;

t_{β} – критерий Стьюдента при уровне значимости $(1 - \beta)$;

$n - 2$ – число степеней свободы.

Если значение коэффициента корреляции оказывалось выше, чем критическое его значение (3.3) , то коэффициент считался значимым.

$$r \geq |r_{кр}| \quad (3.3)$$

Так как ряд достаточно короткий, то корреляция оценивалась для всего ряда – нет возможности оценить скользящие характеристики для тридцатилетних периодов. Уровень значимости при оценке коэффициентов корреляции тоже был снижен и составлял 95,5%. Чтобы убрать лишние флуктуации, оценка происходила для сглаженных за пять лет значений. Результаты представлены в таблице 3.3.

Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод о том, что чётко прослеживается связь между Северо-Атлантическим колебанием и индексом циклонической активности САИ и эта связь значима. Довольно странно на наш взгляд, что коэффициенты корреляции между индексом Северо-Атлантического колебания и характеристиками циклонов отсутствует. Это можно объяснить и тем, что Северо-Атлантическое колебание не является основным фактором (как уже выясняли ранее по данным NCEP/NCAR), влияющим на циклонические режимы и тем, что анализируемый временной ряд не имеет достаточной длины, а также тем (и это, скорее всего, является главным), что влияние Северо-Атлантического колебания на разные регионы

земного шара отличается. Так как в данном исследовании рассматриваются только глобальные характеристики, то однозначно нельзя оценить влияние Северо-Атлантического колебания на циклонические режимы северного полушария.

Таблица 3.3 – Коэффициент корреляции индекса Северо-Атлантического колебания с индексом циклонической активности (I), количеством циклонов (II), и глубиной циклонов (III)

Месяц	Коэффициент корреляции между индексом САК и			Значимость корреляции между индексом САК и		
	I	II	III	I	II	III
Январь	0.42	0.12	0.13	1	0	0
Февраль	0.61	-0.12	0.00	1	0	0
Март	-0.26	0.29	0.08	0	0	0
Апрель	0.69	-0.07	-0.21	1	0	0
Май	0.52	0.10	0.08	1	0	0
Июнь	0.24	0.14	0.21	0	0	0
Июль	-0.27	0.06	0.09	0	0	0
Август	-0.42	-0.04	0.20	1	0	0
Сентябрь	0.15	-0.35	-0.22	0	1	0
Октябрь	-0.33	0.11	0.12	1	0	0
Ноябрь	0.01	-0.12	-0.16	0	0	0
Декабрь	0.17	-0.30	-0.40	0	1	1

3.7 Связь Южного колебания (Эль-Ниньо/Ла-Нинья) и характеристик циклонических режимов северного и южного полушария

Для того чтобы выяснить насколько сильна связь характеристик циклонов с Южным колебанием (Эль-Ниньо/Ла-Нинья) и есть ли она вообще, с помощью *t*-статистики Стьюдента согласно формулам (3.1-3.3) были рассчитаны коэффициенты корреляции между индексом Южного колебания и основными циклоническими характеристиками, определёнными по данным реанализа ERA-INTERIM: циклонической активностью (I), количеством циклонов (II) и их глубиной (III). Результаты оценки для южного полушария представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Коэффициент корреляции индекса Южного колебания с индексом циклонической активности (I), количеством циклонов (II), и глубиной циклонов южного полушария (III)

Месяц	Коэффициент корреляции между индексом Южного колебания и			Значимость корреляции между индексом Южного колебания и		
	I	II	III	I	II	III
Январь	-0.71	0.18	0.31	1	0	1
Февраль	0.29	-0.21	0.26	0	0	0
Март	-0.16	-0.22	0.20	0	0	0
Апрель	0.70	-0.23	0.16	1	0	0
Май	0.36	-0.24	-0.04	1	0	0
Июнь	0.33	-0.12	-0.11	1	0	0
Июль	-0.14	-0.44	-0.18	0	1	0
Август	0.40	-0.25	0.22	1	0	0
Сентябрь	0.81	-0.16	0.19	1	0	0
Октябрь	0.60	-0.19	0.19	1	0	0

Продолжение таблицы 3.4

Месяц	Коэффициент корреляции между индексом Южного колебания и			Значимость корреляции между индексом Южного колебания и		
	I	II	III	I	II	III
Ноябрь	0.29	-0.19	0.19	0	0	0
Декабрь	-0.05	-0.18	0.30	0	0	1

Анализ коэффициентов корреляции индекса Южного колебания (Эль-Ниньо/Ла-Нинья) с характеристиками циклонических режимов Южного полушария позволяет сделать аналогичные выводы, что и при анализе корреляционных связей с Северо-Атлантическим колебанием. Южное колебание, безусловно, оказывает влияние на циклоническую активность южного полушария, однако в силу глобальности рассматриваемых процессов и достаточно короткого ряда нет возможности достоверно оценить его влияние на количество и глубину барических образований.

Корреляционная связь также оценивалась между Южным колебанием и характеристиками циклонов северного полушария.

Таблица 3.5 – Коэффициент корреляции индекса Южного колебания с индексом циклонической активности (I), количеством циклонов (II), и глубиной циклонов северного полушария (III)

Месяц	Коэффициент корреляции между индексом Южного колебания и			Значимость корреляции между индексом Южного колебания и		
	I	II	III	I	II	III
Январь	0.74	0.39	0.32	1	1	1
Февраль	0.61	0.32	0.27	1	1	0
Март	-0.28	0.29	0.20	0	0	0
Апрель	-0.14	-0.08	0.16	0	0	0

Продолжение таблицы 3.5

Месяц	Коэффициент корреляции между индексом Южного колебания и			Значимость корреляции между индексом Южного колебания и		
	I	II	III	I	II	III
Май	0.01	0.08	-0.04	0	0	0
Июнь	-0.11	-0.03	-0.11	0	0	0
Июль	0.24	-0.06	-0.17	0	0	0
Август	-0.43	0.24	0.21	1	0	0
Сентябрь	-0.58	0.36	0.18	1	1	0
Октябрь	0.15	0.32	0.19	0	1	0
Ноябрь	0.38	0.35	0.19	1	1	0
Декабрь	0.71	0.35	0.31	1	1	1

Как видно из таблицы, Южного колебание связано с циклонической активностью северного полушария даже сильнее, чем Северо-Атлантическое колебание, особенно это влияние сильно в зимние месяцы. Интересным является, что в осенние и зимние месяцы отмечена значимая положительная корреляционная связь между количеством циклонов северного полушария и южным колебанием, эта связь даже значимей, чем связь количества циклонов и Северо-Атлантическим колебанием.

Выводы из главы

По результатам реанализа ERA-INTERIM было выявлено большее количество циклонов, что объяснимо более хорошим разрешением данных. Ряд здесь более короткий, однако полученные результаты позволяют говорить о том, что изменение количества циклонов в северном полушарии менее значительно, чем в южном. Относительно глубины барических образований получены сходные результаты, что и в предыдущей главе.

В северном полушарии циклоны обладают большей глубиной. Отличие от реанализа NCEP/NCAR проявляется в том, что разница между наиболее и наименее глубокими циклонами в северном полушарии уменьшается (там же она напротив увеличивалась). Этот факт объясним большим количеством детектированных барических образований, а потому можно сделать вывод о том, что если для анализа долгопериодной изменчивости лучше привлекать данные реанализа NCEP/NCAR, то изменение более тонких характеристик лучше исследовать по данным ERA-INTERIM.

Относительно сезонных изменений также получены сходные результаты. В северном полушарии наиболее глубокие циклоны отмечаются в холодное время года, наименее глубокие – летом.

Характеристики глубины циклонов в южном полушарии по данным ERA-INTERIM отличаются. Это можно объяснить меньшим разбросом в значениях и учётом большого количества «средних» циклонов в анализе. Можно сделать вывод, что во временном ходе экстремальные циклоны в южном полушарии не имеют чёткой сезонности и цикличности.

Аналогично выводам, сделанным в предыдущей главе, можно сказать, что циклоны северного полушария много глубже, чем южного. Кроме того, в северном полушарии больше амплитуда экстремальных значений.

Размер циклонов в обоих полушариях более всего отклоняются от нормы в холодный период, меньше – в теплый.

Более высокое разрешение, а значит и лучшее качество идентификации, позволили сделать вывод об изменении объема переносимого циклонами приземного воздуха. Максимальный объем воздуха циклонами северного полушария переносится зимой. В виду того, что в это время велик контраст температур между экватором и полюсом, то максимальные объемы воздуха, переносимые в это время года могут усиливать тепло- и влагообмен между широтами, хотя, безусловно, для уточнения этого требуется дополнительный

анализ траекторий циклонов. Эту работу планируется сделать в будущем. В южном полушарии максимальный объем воздуха чаще переносится весной.

В обоих полушариях в летние месяцы циклоны наименее глубокие относительно климатической нормы, наиболее же глубокие относительно климатической нормы циклоны наблюдаются в зимнее время.

В виду того, что в реанализе ERA-INTERIM учитывается влияние многих факторов, а ряд довольно короткий, в ходе исследования нет возможности исследовать долгопериодные незашумленные связи. Из-за этого связь характеристик циклонов с основными индексами циркуляции менее очевидна. По результатам работы можно сделать вывод, что реанализ ERA-INTERIM более пригоден для изучения тонких характеристик циклонов и их изменений, долгопериодные изменения же лучше исследовать на основе реанализа NCEP/NCAR.

4 Сравнение количества и характеристик «экстремальных» циклонов по результатам идентификации в реанализе NCEP/NCAR и ERA-INTERIM

Проект IMILAST путем сравнения 15 различных методов идентификации циклонов [44] показал более высокую согласованность существующих методик идентификации для глубоких циклонов. Этот вывод справедлив как для количественных характеристик барических депрессий, так и для годовых характеристик циклонов и тенденций их изменения. Вывод этот вполне логичен, так как в случае исследования глубоких циклонов захватывается более широкий спектр процессов для идентификации, а также удовлетворяются более жесткие условия идентификации. В виду предположения о том, что в связи с глобальными климатическими изменениями растет количество экстремальных циклонов [126, 127], которое подтверждается и нашим исследованием, показалось интересным рассмотреть изменения глубоких циклонов.

В ходе исследования сравнивалось количество и характеристики глубоких циклонов, идентифицированных по разным реанализам. «Экстремальными» циклонами во многих исследованиях обычно обозначают циклоны с атмосферным давлением в центре менее 980 или 970 гПа [127, 128, 129]. В данном исследовании в качестве «порогового» значения для экстремальных циклонов принималось давление 970 гПа.

4.1 Анализ количества «экстремальных» циклонов

На рисунке 4.1 приведено количество «экстремальных» циклонов, идентифицированных по данным реанализа ERA-INTERIM. В северном полушарии таких циклонов приблизительно в 10 раз больше. Соответственно, разница амплитуды изменения в северном полушарии также больше. Если в

в южном полушарии она составляет всего 435 циклонов, то в северном 3401. В нашем предыдущем исследовании был получен такой же результат – в южном полушарии преобладают «средние» неглубокие циклоны. В виду незначительности изменений в южном полушарии обратим внимание в основном на северное полушарие.

В северном полушарии отчетливо прослеживается тенденция на увеличение количества «экстремальных» циклонов. Кроме того, интересным является тот факт, что в конце 90-х – начале 2000-х годов количество глубоких циклонов колебалось от экстремально высоких до экстремально низких значений.

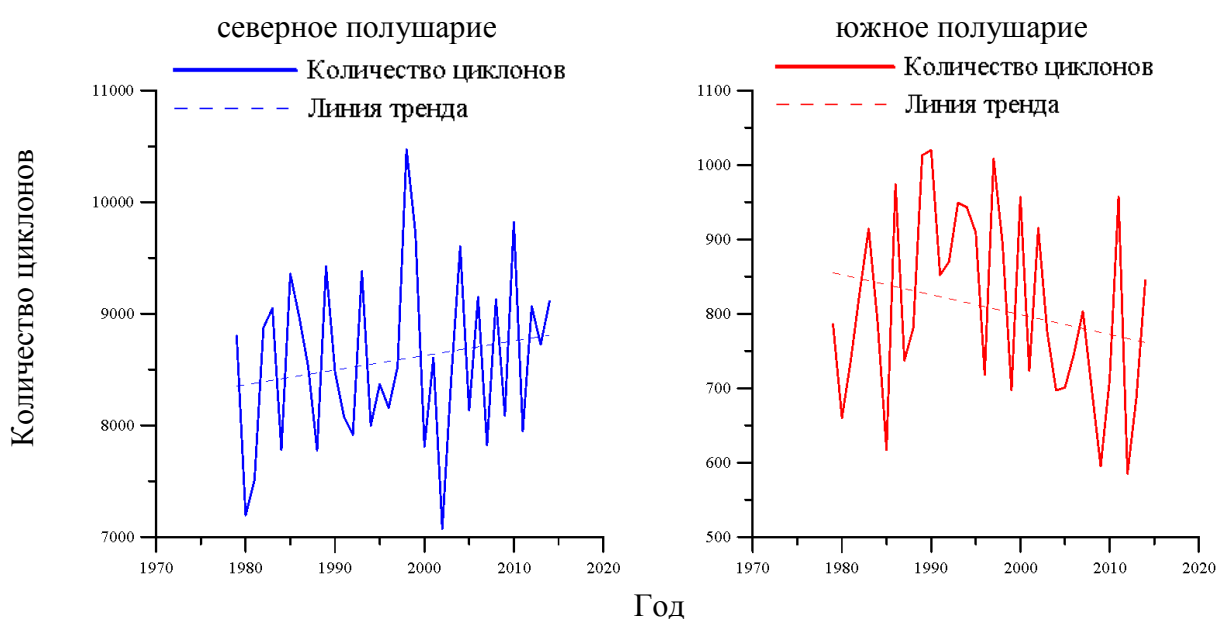


Рисунок 4.1 – Количество «экстремальных» циклонов, идентифицированных по ERA-INTERIM в северном (левая панель) и южном (правая панель) полушариях

По результатам идентификации глубоких циклонов по данным реанализа NCEP/NCAR можно сделать аналогичные выводы. Во-первых, количество «экстремальных» циклонов также приблизительно в 10 раз меньше. Амплитуда

колебаний в количестве циклонов в северном полушарии составляет 5183, а в южном – 422.

Что касается отмеченных тенденций изменения, то они такие же, как при анализе данных ERA-INTERIM. Если рассматривать временной отрезок с 1979 года, то в северном полушарии количество циклонов увеличивается, а в южном наоборот уменьшается.

Общее количество идентифицированных циклонов в поле давления реанализа NCEP/NCAR меньше приблизительно на 30-40%, чем для реанализа ERA-INTERIM. Этот факт ожидаем и связан, как уже отмечалось, с худшим разрешением реанализа NCEP/NCAR.

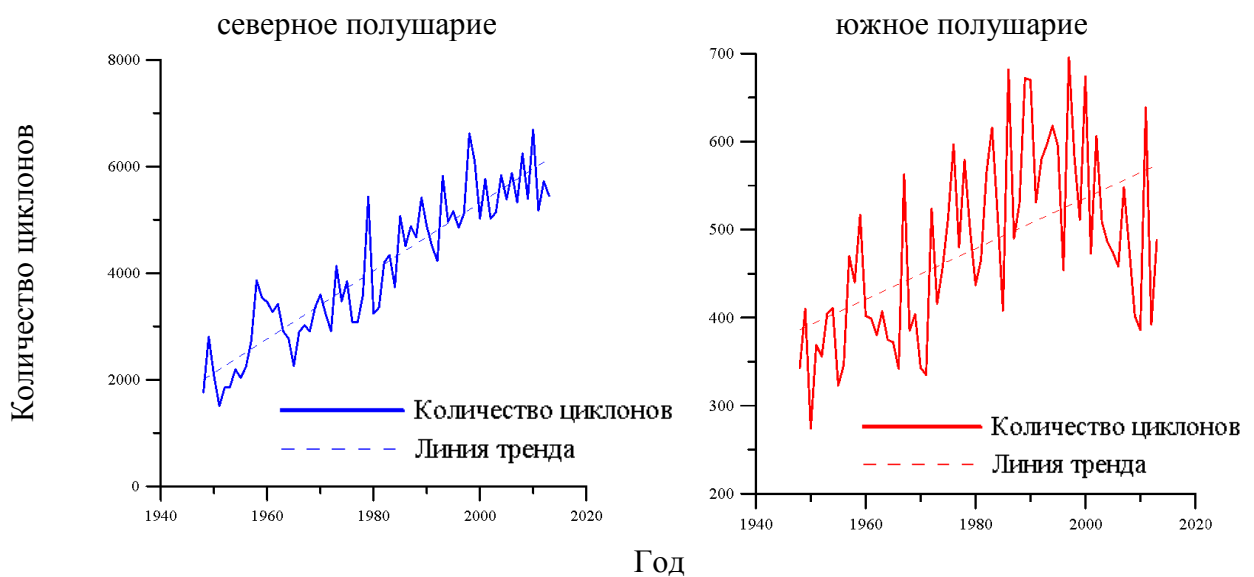


Рисунок 4.2 – Количество циклонов, идентифицированных в поле NCEP/NCAR, в северном (левая панель) и южном (правая панель) полушариях

В ходе исследования количество «экстремальных» циклонов, идентифицированных по обоим реанализам, было проанализировано с помощью ранговых диаграмм (box-whiskers-plots). Результаты представлены на рисунке 4.3. Синим цветом обозначены результаты, полученные на основе реанализа ERA-INTERIM, красным – на основе NCEP/NCAR. На диаграммах прямоугольник показывает значения от 25 и 75 квартили, в центре его линией

обозначена медиана, также показаны максимальное и минимальное значение ряда.

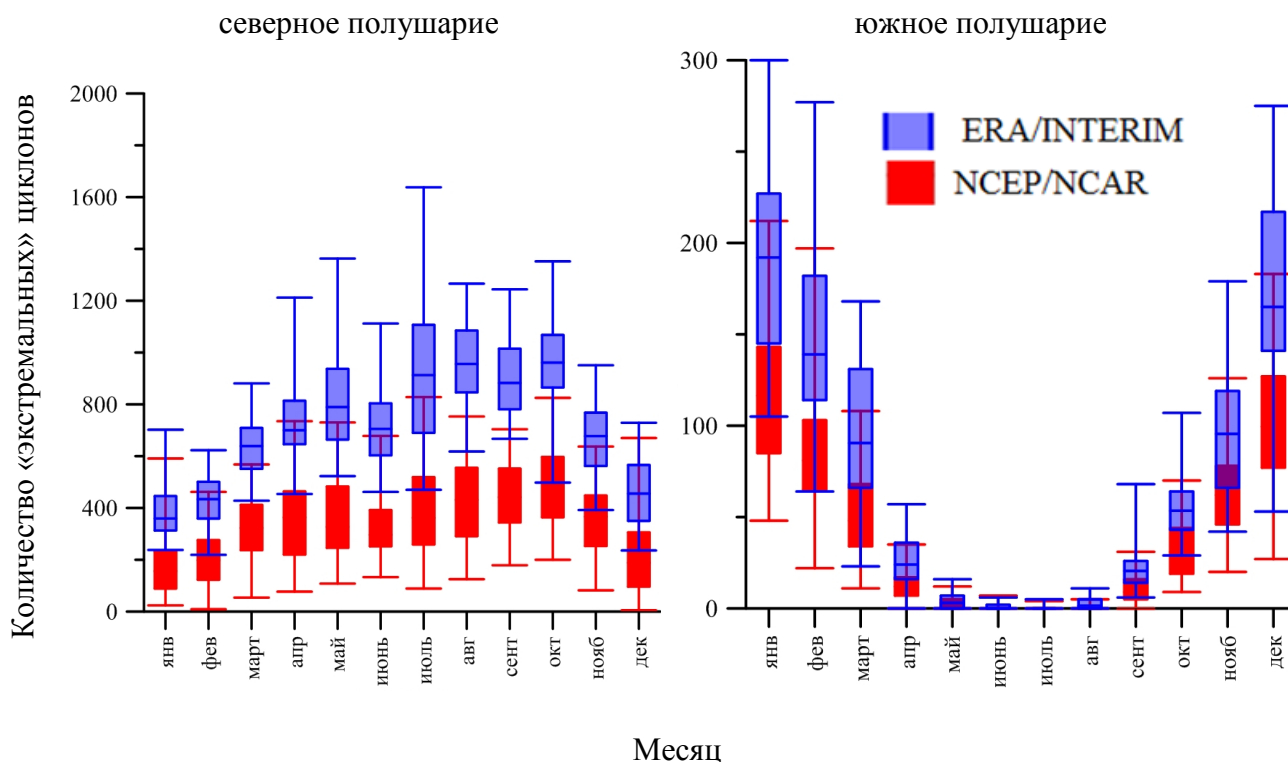


Рисунок 4.3 – Количество циклонов, идентифицированных в северном (левая панель) и южном (правая панель) полушариях.

Из анализа рисунка следует, что хотя на основе реанализа ERA-INTERIM идентифицируется значительно больше циклонов, чем на основе NCEP/NCAR, общий годовой ход одинаков в обоих полушариях. Кроме того, можно оценить сезонное распределение циклонов. По результатам обоих реанализов в теплое время года в обоих полушариях количество циклонов больше.

4.2 Исследование глубины «экстремальных» циклонов

При расчёте с новым пороговым значением изменились и остальные параметры. Изменилась оценка среднего давления в циклонах в каждом месяце, изменились и нормированные значения давления. Среднее давление

рассчитывалось аналогично описанному выше методу (в пунктах 2.2 и 3.2), то есть считалось среднемесячное давление в циклонах для каждого года, после этого из полученных двенадцати значений выбиралось минимальное. «Минимальное» для каждого года значение давления в циклонах северного и южного полушарий представлено на рисунке 4.4.

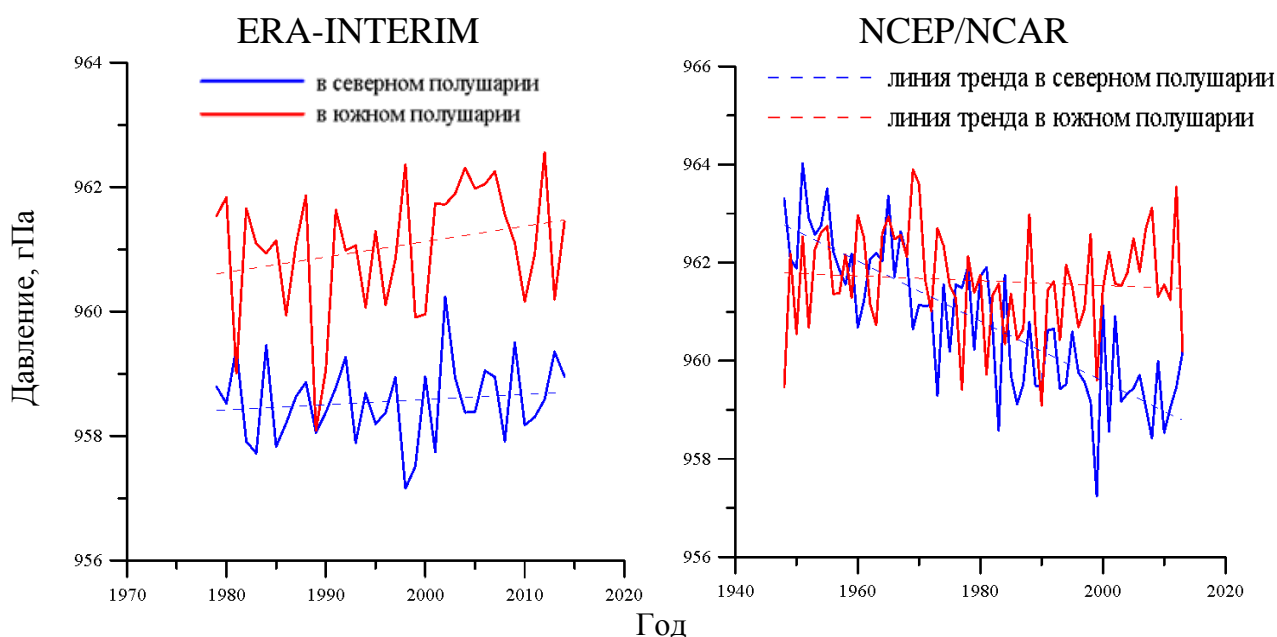


Рисунок 4.4 – «Минимальное» значение давления в циклонах северного и южного полушарий по результатам идентификации в поле реанализа ERA-INTERIM (левая панель) и NCEP/NCAR (правая панель)

В южном полушарии по данным обоих реанализов давление мало меняется. В северном же по результатам реанализа NCEP/NCAR давление в «экстремальных» циклонах уменьшается значительно, но с 1980-х здесь также отмечены снижения темпов углубления «экстремальных» циклонов. Однако на основе реанализа ERA-INTERIM значительных изменений в глубине таких циклонов не происходит. В виду того, что реанализ ERA-INTERIM обладает лучшим разрешением, а модель, на которой он сделан, – лучшей системой усвоения данных, он лучше чувствует изменение «тонких» характеристик циклонов, а значит его результатам можно больше доверять. В реанализе

NCEP/NCAR давление в «экстремальных» циклонах получилось выше, чем в реанализе ERA-INTERIM, что еще раз подтверждает то, что его разрешение не позволяет «увидеть» глубокие циклоны небольших размеров.

Однако в целом основные закономерности и выявленные экстремумы по обоим реанализам совпадают. Так, по результатам идентификации в полях давления и NCEP/NCAR и ERA-INTERIM можно заключить, что экстремально низких значений давление в северном полушарии достигало в конце 90-х – начале 2000-х, в южном – в начале 90-х.

Для оценки среднего давления в циклонах в каждом месяце суммировалось давление в центре каждой из найденных барических депрессий, после этого полученное значение делилось на их количество.

$$P_{смон} = \frac{\sum P_{i,j}}{N} \quad (4.1)$$

где $P_{смон}$ – давление в «среднем» циклоне в каждом месяце;
 N – количество идентифицированных циклонов;
 $P_{i,j}$ – давление в центре идентифицированного циклона

Ранговые диаграммы такого «среднего» давления представлены на рисунке 4.5. Красным цветом представлены результаты, полученные на основе данных NCEP/NCAR, синим – на основе реанализа ERA-INTERIM. Видно, что, несмотря на большее количество глубоких циклонов, определённых по реанализу ERA-INTERIM, общий ход «среднего» давления схож по результатам обоих реанализов.

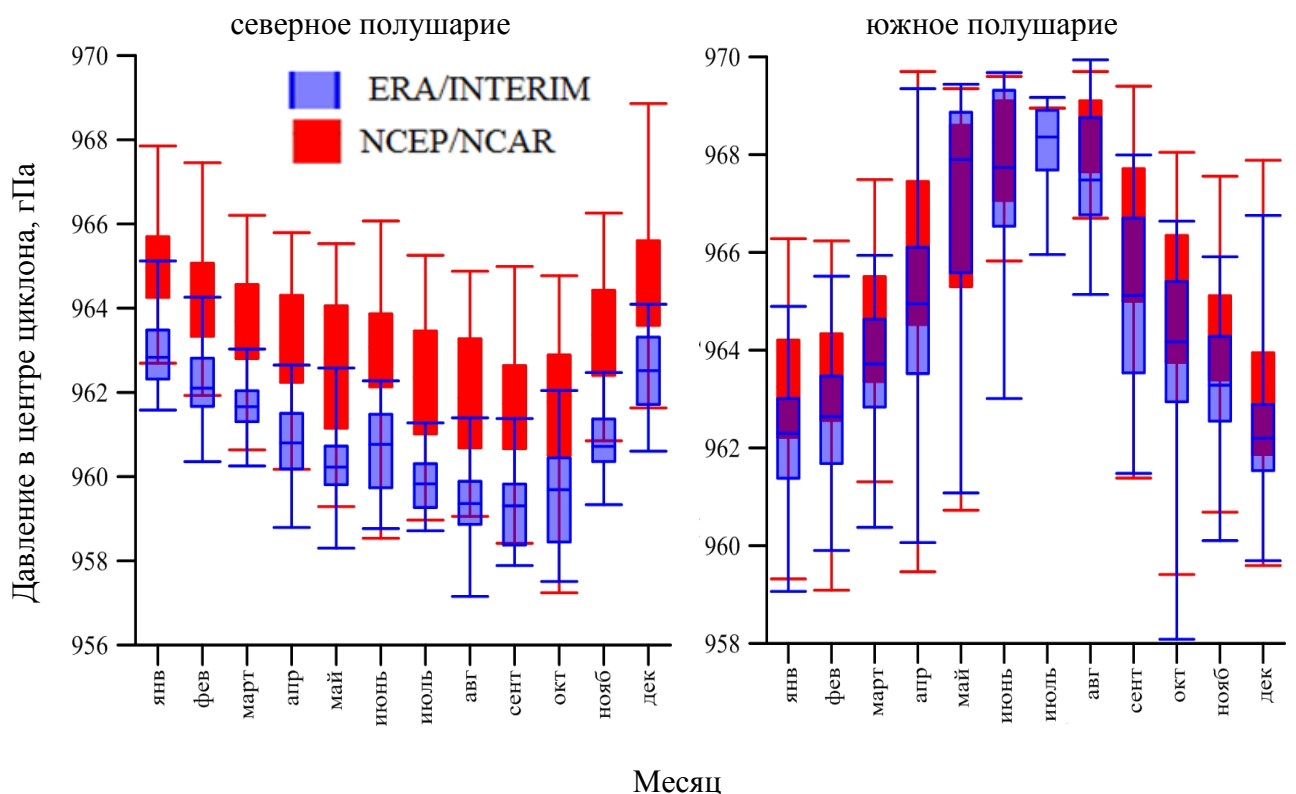


Рисунок 4.5 – Среднемесячное давление в циклонах, идентифицированных в северном (левая панель) и южном (правая панель) полушариях.

На основе обоих реанализов можно сделать вывод, что наибольшей глубины экстремальные циклоны северного полушария достигают в конце лета и начале осени (с августа по октябрь), в южном полушарии наибольшей глубины такие циклоны достигают весной (в октябре). На ранговой диаграмме видно, что «экстремальные» циклоны северного полушария глубже своих аналогов из южного полушария. Кроме того, если в южном полушарии ярко выражен годовой ход в давлении «экстремальных» циклонов, то в северном полушарии циклоны с давлением ниже 965 гПа встречаются круглогодично. Этот факт можно объяснить большей поверхностью суши в северном полушарии и, соответственно, более часто встречающимися контрастами температуры и влажности здесь.

Таким образом, хотя результаты реанализов отличаются количественно, качественно они совпадают.

Очевидно, что хотя реанализ NCEP/NCAR не позволяет уловить изменения «экстремальных» величин, зато позволяет проанализировать долгопериодную динамику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение изменений циклонической активности очень важно для полноценного понимания крупномасштабной динамики атмосферы, для исследования долгопериодной изменчивости происходящих в ней процессов, в вопросах изучения изменений климата, для повышения качества долгосрочных прогнозов погоды, а также для диагностики происходящих региональных и глобальных изменений.

Циклоны играют исключительно важную роль в формировании атмосферных процессов, отвечают за транспортировку тепла и влаги, кроме того, тесно связаны с опасными явлениями погоды. Этим объясняется актуальность темы данного исследования.

В ходе исследований были решены следующие задачи

- –Выбран обоснованный метод численной идентификации циклонов, произведена его адаптация к анализируемым данным реанализов ERA-INTERIM и NCEP/NCAR;
- –Создан программный комплекс по идентификации циклонов и оценки их различных характеристик;
- –Произведена оценка влияния горизонтального разрешения сеточных полей метеорологических величин на качество идентификации циклонов и оценку их характеристик;
- –Проведён сравнительный анализ данных разных реанализов: NCEP/NCAR и ERA-INTERIM;
- –Исследованы характеристики циклонических режимов и их временная изменчивость в северном и южном полушариях земного шара;
- –Выявлены связи изменчивости характеристик циклонических режимов и характеристик крупномасштабной циркуляции атмосферы.

Основными выводами диссертации являются:

Временной ход количества циклонов в северном и южном полушариях различен.

В южном полушарии циклонов больше, но большинство из них неглубокие.

В северном полушарии больше циклонов с давлением в центре значительно меньше среднего для данного региона.

Общее количество циклонов в южном полушарии увеличивается. До 80-х годов в среднем количество циклонов не менялось (коэффициент линейного тренда приблизительно равен нулю), начиная с конца 80-х годов, количество циклонов в южном полушарии увеличивается.

Временная изменчивость количества циклонов в северном полушарии носит более сложный характер – наряду с мелкомасштабными колебаниями четко различимо колебание с периодом приблизительно 60 лет. Это колебание может быть объяснено влиянием Атлантического мульти-декадного колебания и антропогенным форсингом.

Внутренняя динамика процессов, происходящих в южном и северном полушариях одинакова – начиная с периода 1965 – 1985 год появляется положительная тенденция в изменчивости количества циклонов.

Уменьшение количества циклонов сильнее в северном полушарии, а современное увеличение ярче проявляется в южном полушарии.

В северном полушарии колебания экстремальных значений давления сильнее, чем в южном. Разница между экстремальными значениями давления в северном полушарии больше.

В северном полушарии циклоны существенно глубже, чем в южном.

Максимум повторяемости наиболее глубоких циклонов в северном полушарии в последние десятилетия переместился на весенние месяцы – до периода «глобального потепления» самые глубокие циклоны наблюдались в январе, феврале, а сейчас самые глубокие циклоны наблюдаются в феврале и

марте. Сдвинулся с августа на июль и максимум повторяемости самых близких к климатической норме циклонов. Частота повторяемости глубоких циклонов выросла в два раза.

В южном полушарии изменения в месяцах с экстремальными значениями менее заметны. Частота появления наиболее и наименее глубоких циклонов в последние десятилетия не изменилось.

В обоих полушариях преобладает количество неглубоких циклонов, однако в южном полушарии таких барических образований гораздо больше, чем в северном.

В южном полушарии максимальные аномалии площади циклонов наблюдаются в холодное время года (максимум приходится на июль и август), минимальные же аномалии площади чаще всего наблюдались в феврале.

До 1980 года максимальная аномалия площади циклонов отмечалась в августе, то после 1980 года максимум почти с такой же частотой стал наблюдаться в июле и марте.

Наиболее часто средний циклон (малые аномалии) в северном полушарии отмечается в июле, что означает, что именно в этом месяце реже всего наблюдаются аномалии, как давления в центре циклона, так и в частоте появления циклонических ситуаций. Максимальная аномалия, т.е. наиболее глубокие относительно климатической нормы циклоны, чаще всего наблюдаются в холодное время года, и большинство случаев приходится на январь и февраль.

До 1980 года самая сильная циклоническая активность наблюдалась в северном полушарии в январе и феврале, а наименьшая активность – в июле.

После 1980 года минимальная аномалия циклонической активности стала приходиться на июль.

Наиболее высокая частота максимальной аномалии же сместилась с января на февраль.

Основные закономерности, выявленные по разным реанализам, совпадают.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нестеров, Е. С. О возможности прогноза опасного волнения в Северной Атлантике с повышенной заблаговременностью / Е.С. Нестеров // Труды ГУ ГМЦ РФ. – 2013. – Вып. 350. - С. 5-12.
2. Мостамади, С.В. Моделирование полей ветра и давления для гидродинамического прогноза штормовых нагонов: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук / С.В. Мостамади. – СПб, 2013. – С. 1-24.
3. Ulbrich, U. Changing Northern Hemisphere Storm Tracks in an Ensemble of IPCC Climate Change Simulations / Ulbrich U., Pinto J.G., Kupfer H., Leckebusch G.C., Spanghel T., Reyers M. // Journal of Climate, Vol. 21(8). – 2008. -P. 1669-1679. - DOI: 10.1175/2007JCLI 19921.
4. Бардин, М.Ю. Изменчивость характеристик циклоничности в средней тропосфере умеренных широт Северного полушария / М.Ю. Бардин // Метеорология и гидрология. –1995. – № 11. – С. 24–37.
5. Хромов, С.П. Метеорология и климатология: учебник., 4-е.: перераб. и доп. / С.П. Хромов, М.А. Петросянц. – М.: МГУ, 1994. –520 с.
6. Дуванин, А.И. О взаимодействии между гидрометеорологическими макропроцессами в океане и атмосфере./ А.И. Дуванин // Вести МГУ. – Серия «География».- 1977. – № 5. – С. 89—95.
7. Berhinger, D. Thermal feed-back on wind-stress as a contribution cause of Gulf-Stream / D. Berhinger, L. Regier, H. Stommel // Journal of Marine Research., Vol. 37 (4). – 1979.-С. 699–709.
8. Угрюмов, А.И. Тепловой режим океана и долгосрочные прогнозы погоды / А.И. Угрюмов. – Л.: Гидрометиздат, 1981. – С. 1-200

9. Лаппо, С.С. Крупномасштабное тепловое взаимодействие в системе океан—атмосфера и энергоактивные зоны Мирового океана / Лаппо С.С, Гулев С.К., Рождественский А.Е. // Л.: Гидрометиздат, 1990.- С. 1-334
10. Kushnir, Y. Low frequency variability in the Northern Hemisphere winter: Geographical distribution, structure and time-scale dependence // Y. Kushnir, J. M. Wallace // Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 46 (20). – 1989. – P.3122-3143. - DOI: 10.1175/1520-0469(1989)046<3122:LFVITN>2.0.CO;2
11. Wallace, J. M. The influence of sea-surface temperature on surface wind in the eastern equatorial Pacific: Seasonal and interannual variability / Wallace, J. M., T. P. Mitchell, and C Deser // Journal of Climate, Vol. 2 (12)– 1989. – P. 1492-1499- DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1989\)002<1492:TIOSST>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1989)002<1492:TIOSST>2.0.CO;2)
12. Deser, C Surface climate variations over the North Atlantic Ocean during winter / C. Deser, M.L. Blackmon // Journal of Climate, Vol. 6 (9) – 1993. – P. 1743-1753
13. Kushnir, Y Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions // Journal of Climate, Vol. 7, Issue 1– 1994. – P. 141-197.
14. Швед, Г.М. Циркуляция атмосферы / Г.М. Швед // Соросовский образовательный журнал №3. –1997. – С. 75-81
15. Bjerknes, J Atlantic Air-Sea interaction / J Bjerknes // Advances in Geophysics, Vol. 10 (1)– 1964. – P. 1-82
16. Корт, В.Г., Крупномасштабное взаимодействие вод Северной Атлантики с атмосферой / В.Г. Корт // Океанология Т.16 (4). – 1976. -- С. 565-570.
17. Хромов, С.П. Метеорология и климатология для географических факультетов. / С.П. Хромов, 1968. Л.: Гидрометиздат, С. 1-492

18. Сытинский, А.Д Зависимость циркуляции атмосферы Земли от процессов на Солнце и межпланетарной среде / А.Д. Сытинский, В.Н. Боков, Д.А. Оборин // геомагнетизм и аэрономия. – 2003. – Т. 43 (1). С. 1–7.
19. Gray, L. J. Solar influences on climate / L. J. Gray, J. Beer, M. Geller, .D. Haigh, M. Lockwood, K. Matthes, U. Cubasch, D. Fleitmann, G. Harrison, L. Hood, J. Luterbacher, G.A. Meehl, D. Shindell, B. van Geel, W. White // Geophysics № 48, RG4001,. –2010. – P. 1-53. – DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1994\)007<0141:IVINAS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1994)007<0141:IVINAS>2.0.CO;2)
20. Ammann, C. M Solar signals in records and simulations of past climates / C. M. Ammann // Memorie della Società Astronomica Italiana № 76. –2005. – P. 802-804
21. Ammann, C. M Solar influence on climate during the past millennium: Results from transient simulations with the NCAR Climate System Model / C. M. Ammann, F. Joos, D. S. Schimel, B. L. Otto-Bliesner, R. A. Tomas // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America № 104. –2007. – P. 3713-3718. – DOI: 10.1073/pnas.0605064103
22. Geller, M. A. Solar cycles and the atmosphere / M. A Geller // Nature № 332. –1988. – P. 584-585. – DOI: 10.1038/332584a0.
23. Haigh, J. D. The effects of solar variability on the Earth's climate / J. D Haigh // Philosophical Transactions of the Royal Society Vol.361 № 1802 –2003. – P. 95-111. – DOI: 10.1098/rsta.2002.1111.
24. Haigh, J. D. The Sun and the Earth's climate / J. D Haigh // Solar Physics, 4, lrsp-2007-2.
25. Hoyt, D. V. The Role of the Sun in Climate Change / D. V Hoyt, K. H. Schatten – U.K.: Oxford University Press, 1997, – 279 pp.

26. Thejll, P. On correlations between the North Atlantic Oscillation, geopotential heights and geomagnetic activity/ В Christiansen, Н. Gleisner // Geophysical Research Letters., Vol 30 (6), 1347. – DOI: 10.1029/2002GL016598.
27. Хромов, С.П. Метеорологический словарь. / С.П. Хромов, Л.И. Мамонтова, 1974. Л.: Гидрометиздат, С. 1-568
28. Рудева, И.А. Жизненный цикл атмосферных внетропических циклонов Северного полушария и его связь с процессами взаимодействия океана и атмосферы / И.А.Рудева // Известия РАН. Физика атмосферы и океана Т.44.- 2008. – с.1-7
29. Blackmon, MX. Time Variation of 500 mb Height Fluctuations with Long, Intermediate and Short Time Scales as Deduced from Lag-Correlation Statistics / MX Blackmon, Y.-H. Lee, J.M. Wallace H.-H. Hsu // Journal of the Atmospheric Sciences, Vol 41. – 1984. . – P.981-991
30. Trenberth, K.E. Storm tracks in the Southern Hemisphere./ K.E Trenberth // Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 48 (19).-1991. – P.2159-2178
31. Ayrault, F. North Atlantic ultra high frequency variability. / F Ayrault,, F.Lalauette, A. Joly, C.Loo // Tellus, Vol,47A.- 1995. – P.671-696.
32. Branstator, G. Organization of storm track anomalies by recurring low frequency circulation anomalies. / G. Branstator // Journal of the Atmospheric Sciences Vol. 52.-1995. – P. 207-226.
33. Christoph, M. Midwinter suppression of Northern Hemisphere storm track activity in the real atmosphere and in GCM experiments. / M Christoph, U.Ulbrich, P.Speth // Journal of the Atmospheric Sciences Vol.54 – 1997. – P.1589-1599.
34. Rogers, J.C. North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability in the Northern Europe / Rogers, J.C. // Journal of Climate, Vol. 10. – 1997. – P.1635-1647.

35. Gulev, S.K. Synoptic and sub-synoptic variability in the North Atlantic as revealed by the Ocean Weather Station data./ S.K Gulev., O. Zolina, Y. Reva // *Tellus* Vol. 52A. 2000. – P.323-329.
36. Gulev, S.K. Interannual and seasonal variability in the intensities of synoptic scale processes in the North Atlantic mid latitudes from the NCEP/NCAR Reanalysis data / S.K Gulev, T. Jung, and E. Ruprecht. // *J. Climate* № 1.-2002-5– P. 809-828.
37. Hoskins, B.J. The shape, propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems / B.J Hoskins, I. N. James, G. H. White // *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol 40 (7) -1983.– P 1595-1612.
38. Hoskins, B J. A diagnostic study of the dynamics of the Northern Hemisphere winter of 1985-1986. / B J.Hoskins, P. D. Sardeshmukh // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* № 113 – 1987.– P.759-778.
39. Wallace, J. M. On the relationship between cyclone tracks, anticyclone tracks and baroclinic wave guides / J. M. Wallace, G.-H. Lim, M. L. Blackmon // *J. Atmos. Sci.* № 45.– 1988.– P. 439-462.
40. Hurrell, J.W. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation / J. W. Hurrell, // *Science* № 269.-1995.-P.676-679.
41. Lambert, S. Intense extratropical Northern Hemisphere winter cyclone events: 1899-1991 / S. Lambert, // *Journal of Geophysical Research.*№ 101.-P 21319-21325.
42. Schinke, H. On the occurrence of deep cyclones over Europe and the North Atlantic in the period 1930-1991 / H. Schinke // *Beitraege zur Physik der Atmosphaere.*№ 66.– 1993.– P. 223-237.
43. Dronia H. On the accumulation of excessive low pressure systems over the North Atlantic during the winter season (November to march) 1988/89 to 1990/91. - (in German) / H. Dronia // *die Witterung im Ubersee* № 39.-1991.- P. 3- 27,

44. Neu U. IMILAST: A Community Effort to Intercompare Extratropical Cyclone Detection and Tracking Algorithms / U. Neu, M. G. Akperov, N. Bellenbaum, R. Benestad, R. Blender, R. Caballero, A. Coccozza, H. Dacre, Y. Feng, K. Fraedrich, J. Grieger, S. Gulev, J. Hanley, T. Hewson, M. Inatsu, K. Keay, S. F. Kew, I. Kindem, G. C. Leckebusch, M. L. R. Liberato, P. Lionello, I. I. Mokhov, J. G. Pinto, C. C. Raible, M., Reale, I. Rudeva, M. Schuster, I. Simmonds, M. Sinclair, M. Sprenger, N. D. Tilinina, I. F. Trigo, S. Ulbrich, U. Ulbrich, X. L. Wang, H. Wernli // *Bulletin of the American Meteorological Society* Vol. 4 (94). - 2013. - P. 529–547
45. Murray, R. J. A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data. Part I: development and operation of the scheme / R. J. Murray, Simmonds I. A // *Australian Meteorological Magazine*. № 39. – 1991. – P. 155–166.
46. Hodges, K. I. Feature tracking on the unit sphere. / K. I. Hodges // *Monthly Weather Review*, Vol. 123, Issue 12 – 1995. – P. 3458–3465.
47. Serreze, M. C. Climatological aspects of cyclone development and decay in the Arctic. / M. C. Serreze // *Atmosphere-Ocean* Vol. 33, Issue 1 . – 2008. – P. 1-23 DOI:10.1080/07055900.1995.9649522
48. Simmonds, I. A refinement of cyclone tracking methods with data from FROST. / I. Simmonds, R. J. Murray, R. M. Leighton // *Australian Meteorological Magazine*, Special Issue – 1999. – P. 35–49.
49. Lionello, P., F. Cyclones in the Mediterranean region: The present and the doubled CO₂ climate scenarios. / Lionello, P., F. Dalan, E. Elvini // *Climate Research*, Vol. 22 . – 2002. – P. 147–159.
50. Benestad, R. E. The use of a calculus-based cyclone identification method for generating storm statistics / R. E. Benestad, D. Chen // *Tellus*, Vol. 58 (4) – 2006. – P. 473–486.

51. Trigo, I. F. Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: A comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses / I. F. Trigo // *Climate Dynamics*, Vol. 26 (2) – 2006. – P. 127–143.
52. Wernli, H., Surface cyclones in the ERA-40 dataset (1958–2001). Part I: Novel identification method and global climatology / H. Wernli, C. Schierozza // *J. Atmospheric Sciences*, Vol. 63(10) – 2006. – P. 2486–2507.
53. Akperov, M.G. Probability distributions for cyclones and anticyclones from the NCEP/NCAR reanalysis data and the INM RAS climate model / M.G. Akperov, M.Yu. Bardin, E.M. Volodin, G.S. Golitsyn, I.I. Mokhov // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 43, No. 6. – 2007. – P. 705–712.
54. Рудева, И.А. Жизненный цикл атмосферных внетропических циклонов Северного полушария и его связь с процессами взаимодействия океана и атмосферы / И.А. Рудева // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана* Т.44.- 2008. – с.1-7
55. Inatsu, M. The neighbor enclosed area tracking algorithm for extratropical wintertime cyclones / M. Inatsu // *Atmospheric Science Letters*, Vol.10 (4). – 2009. — P 267–272. DOI: 10.1002/asl.238
56. Kew, S.F. Potential vorticity anomalies of the lowermost stratosphere: a 10-yr winter climatology / S.F. Kew, M. Sprenger, H.C. Davies // *Monthly Weather Review*, Vol.138, Issue 4. – 2010. — P 1234–1249.
57. Hanley, J. Objective identification and tracking of multicentre cyclones in the ERA Interim reanalysis data set / J. Hanley, R. Caballero // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 138, Issue 664 – 2012. – P. 612–625.

58. Международный проект сравнения методов идентификации внетропических циклонов [Электронный ресурс]. - 2015. - Режим доступа: <http://www.proclim.ch>
59. Leckebusch, G.C. Trends and interannual variability of extra-tropical cyclones derived from different diagnostic methods/ G.C Leckebusch, X.L. Wang, S.F. Kew, J. Grieger, M. Schuster, U. Ulbrich, S. Gulev and the IMILAST team // EGU General Assembly, Vienna, Austria 22-27 April 2012. – 2012. – P. 12234.
60. Stein, O. A reconstructed time series of the number of extreme low pressure events since 1880 / O. Stein, A. Hense // Meteor. Z .№3. – 1994. – P., 43-46.
61. Simmonds, I. Arctic climate change as manifest in cyclone behavior / I. Simmonds, C. Burke, K. Keay // Journal of climate. Vol. 21(22). –2008. – P. 5777–5796.
62. Serreze, M.C. Icelandic low cyclone activity: Climatological features, linkages with the NAO and relationships with recent changes in the Northern Hemisphere circulation / M.C Serreze, F. Carse, R.G. Barry, J.C, Rogers // Journal of climate Vol. 10 (3). –1997. – P. 453–464.
63. Wang, X.L. Climatology and changes of extratropical cyclone activity: comparison of ERA-40 with NCEP/NCAR reanalysis for 1958–2001 / X.L. Wang, V.R. Swail, F.W. Zwiers // Journal of climate Vol. 19 (13). – 2006. – P. 3145–3166.
64. Bardin, M.Yu. North Atlantic oscillation and synoptic variability in the European-Atlantic region in winter / M.Yu. Bardin, A.B. Polonsky // Journal Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. Vol. 41(2). – 2005. – P. 127–136.

65. Бардин, М.Ю. Основные моды изменчивости повторяемости циклонов зимой в Атлантическом секторе / М.Ю. Бардин // Метеорология и гидрология № 1. – 2000. – Р. 42–52.
66. Акперов, М.Г., Мохов И.И. Сравнительный анализ методов идентификации внетропических циклонов / М.Г. Акперов, И.И. Мохов // Изв. АН. Физика атмосферы и океана Т. 46 (5). – 2010. – С. 620–637.
67. Zhang, X Climatology and Interannual Variability of Arctic Cyclone Activity: 1948–2002 / X. Zhang, J. E. Walsh, J. Zhang, U.S. Bhatt // Journal of climate Vol. 17 (12) – 2004. – Р. 2300-2317
68. Золина, О.Г. Климатология циклонической активности в северном полушарии и её связь с процессами взаимодействия океана и атмосферы: дис. канд. физ.-мат. наук: 25.00.28, 25.00.30: защищена 2002. / О.Г. Золина — М., 2002. — 268 с.
69. Рудева, И.А. Жизненный цикл атмосферных внетропических циклонов Северного полушария и его связь с процессами взаимодействия океаны и атмосферы: дис. канд. физ.-мат. наук.: 25.00.28, 25.00.30: защищена 2008. / И.А. Рудева— М., 2008. — 214 с.
70. Sinclair, M.R. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere / M.R. Sinclair // Monthly Weather Review. №10. – 1994. – Р. 2239–2256.
71. Русин, И.Н. Описание структуры поля давления с помощью графов / И.Н. Русин // Метеорология и гидрология № 2. – 1997. — С. 42–50.
72. Иванов, Б. Н. Геометрический подход к решению задачи построения траекторий циклонов и антициклонов / Б.Н. Иванов // Вычислительные методы и программирование Т. 15. –2014. — С. 370–382.

73. Акперов, М.Г. Анализ современных режимов внетропических циклонов в тропосфере Северного полушария и тенденций их изменения по данным реанализа и модельным расчетам: : дис. канд. физ.-мат. наук.: 25.00.29: защищена 2012. – М., 2012. – 102 с.
74. Единая государственная система об обстановке в Мировом океане [Электронный ресурс] . – 2015. – Режим доступа: <http://data.oceaninfo.ru>
75. Hayden, В.Р. Season-to-season cyclone frequency prediction / В.Р. Hayden, W. Smith // Monthly Weather Review, Vol. 110, Issue 4 . –1982 . –Р. 239-253.
76. Нелепо, А.Б. Энергетика взаимодействия между океаном и атмосферой в зоне действия феномена Эль-Ниньо / А.Б. Нелепо, З.Р. Калашников, Г.Г. Хунджуа // Труды III конференции «Физические проблемы экологии» № 10. – 2002. – С.118-123.
77. Dijkstra, H.A. The ENSO phenomenon: theory and mechanisms / H.A. Dijkstra // Advances in Geosciences. Vol. 6 . – 2006. – P. 3-15. – DOI:10.5194/adgeo-6-3-2006
78. Sokolikhina, E.V. The atmospheric circulation on the synoptic scale during the culmination phase of the El-Nino-Southern Oscillation events (1997-1998) / E.V Sokolikhina, E.K Semenov, N.N.Sokolikhina // Advances in Geosciences. Vol.6 . – 2006. – P.17-21.
79. Семенов, Е.К. Вертикальная циркуляция в тропической атмосфере в периоды экстремальных событий / Е.К. Семенов, Е.В. Соколихина, Н.Н. Соколихина // Метеорология и гидрология. № 7. –2008 . – С.17-28.
80. Вязилова, Н.А. Крупномасштабный влагообмен в тропиках Индийского и Тихого океанов в годы с явлением Эль-Ниньо – южное колебание / Н.А. Вязилова // Метеорология и гидрология. № 2. – 2008. – С.20-33.

81. Бышев, В.И. О проявлении эффекта Эль-Ниньо в Индийском океане / В.И. Бышев, Ю.А. Иванов, В.Г. Нейман, Ю.А. Романов, И.В. Серых, В.Е. Складов, А.Д. Щербинин. // Доклады РАН. Т. 419 (3). –2008. – С. 391-396.
82. Бондаренко, А.Л. О природе и возможности прогнозирования явления Эль-Ниньо - Ла-Нинья / А.Л. Бондаренко, В.В. Жмур // Метеорология и гидрология № 11. – 2004. – С.39-49.
83. Бондаренко, А. Л. Закономерности формирования явления Эль-Ниньо – Ла-Нинья / А. Л. Бондаренко, В. В. Жмур // Физические проблемы экологии (экологическая физика). № 13 –2005. – С. 35-44
84. Гущина, Д. Ю. Модификация Эль-Ниньо в условиях меняющегося климата: мониторинг, причины, удаленный отклик: автореф. дис. д. геогр. наук: 25.00.30. / Д.Ю. Гущина – М., 2014, С.14-44.
85. Смирнов А.Н., Смирнов Н.П. Колебания климата и биота Северной Атлантики. – Спб.: РГГМУ, 1998. – 149 с
86. Drinkwater, K.F. Climate and oceanographic variability in the North-West Atlantic during the 1980 and early 1990's. / K.F. Drinkwater // NAFO Scientific Council Studies. Vol. 24. –1996 . –P. 7-27. – DOI:10.2960/J.v18.a6
87. Drinkwater, K.F. Overview of environmental conditions in the North-West Atlantic in 1993 / K.F. Drinkwater // NAFO Scientific Council Studies, Vol. 23. – 1995. – P. 9-42.
88. Braskef, A. Sea-Ice variability in Greenland and Labrador Seas and their interaction with the North Atlantic Oscillation / A. Braskef, J. Curry, J. Maslanik // In: Conference on Polar Processes and Global Climate. Draft Summary Report. – 1997. – P. 23-25.
89. Hurrell, J.W. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation / J.W. Hurrell // Science, Vol. 269. –1995 . – P. 676-679.

90. Воробьев, В.Н. Сезонные и многолетние колебания уровня морей Северного Ледовитого океана / В.Н. Воробьев, С. Ю. Кочанов, Н. П. Смирнов – СПб: РГГМУ, 2000. – 114 с.
91. Нестеров, Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. – М.: Триада, 2013. – 144 с.
92. Karala, A. Behaviour of the centers of action above the Atlantic since 1881. Part II. Associations with regional climate anomalies / A. Karala, H. Machel, H. Flohn // International Journal of Climatology. Vol. 18. –1998. – P. 23-36. – DOI: 10.1002/(SICI)1097-0088(199801)18:1<23::AID-JOC226>3.0.CO;2-7.
93. Поисковый комплекс об изменениях Земли [Электронный ресурс] . – 2015. – Режим доступа: <http://oko-planet.su/>
94. Поисковый комплекс о характеристиках Земли [Электронный ресурс]. - 2015. - Режим доступа: <http://www.esrl.noaa.gov/>
95. Струве, О. Элементарная астрономия / О. Струве , Б. Линдс, Э. Пилланс – М: Наука, 1967. – 468 с.
96. Калинин, Ю.Д. Вековые геомагнитные вариации / Ю.Д. Калинин. – Новосибирск: Наука, 1984. –160 с.
97. Киселев, В.М. Неравномерность суточного вращения Земли / В. М. Киселев. – Новосибирск: Наука, 1980. 160 с.
98. Мирошниченко, Л.И. Солнечная активность и Земля / Л.И. Мирошниченко. – М: Наука, 1981. – 144 с.
99. Сидоренков, Н.С. Нестабильность вращения Земли / Н.С. Сидоренков // Вестник РАН. Т. 74, № 8.-2004 - С. 701-715
100. Лобанов, В.А. Практикум по климатологии часть 2 / Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е // СПб.: РГГМУ, 2012. – 178 с.
101. Поисковый комплекс о характеристиках Земли [Электронный ресурс]. - 2015. - Режим доступа: <http://apps.ecmwf.int/>

102. Kalnay, E. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project / E. Kalnay, E. Kalnay, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, Roy Jenne, Dennis Joseph // *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.77 (3). – 1996. – P 437-471. – doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
103. Kistler, R. The NCEP/NCAR 50-year Reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. / R. Kistler, E. Kalnay, W. Collins, S. Saha, G. White, J. Woollen, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, M. Kanamitsu, V. Kousky, H. van den Dool, R. Jenne, M. Fiorino // *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.82 Issue 2. – 2001. – P 247-267. – doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082%3C0247:TNNYRM%3E2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082%3C0247:TNNYRM%3E2.3.CO;2)
104. Parrish, D. F., Derber J. D. The National Meteorological Center spectral statistical interpolation analysis system / D.F. Parrish, J.D. Derber // *Monthly Weather Review*. Vol.120 Issue 8. –1992. – P. 1747-176. – Doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120%3C1747:TNMCSS%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120%3C1747:TNMCSS%3E2.0.CO;2)
105. Hodges, K. I. Feature tracking on the unit sphere. / K. I Hodges // *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 123 (12) – 1995. – P. 3458–3465.
106. Dee, D.P. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D.P. Dee, S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Kållberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thépaut and F. Vitart // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 137 Issue 656. – 2011. – P. 553-597. – DOI: 10.1002/qj.828

107. Uppala, S.M. The ERA-40 re-analysis / S. M. Uppala, P. W. Kållberg, A. J. Simmons, U. Andrae, V. Da Costa Bechtold, M. Fiorino, J. K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G. A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R. P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M. A. Balmaseda, A. C. M. Beljaars, L. Van De Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Hólm, B. J. Hoskins, L. Isaksen, P. A. E. M. Janssen, R. Jenne, A. P. McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Morcrette, N. A. Rayner, R. W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K. E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo and J. Woollen // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 131. (612). – 2005. – P. 2961-3012. – DOI: 10.1256/qj.04.176
108. [Электронный ресурс] . – 2015. – Режим доступа: <http://software.ecmwf.int>
109. Hewson, T. D. Objective identification, typing and tracking of the complete life-cycles of cyclonic features at high spatial resolution / T. D. Hewson, H. A. Titley // *Meteorological Applications* Vol.17 (3) – 2010. – P. 355–381.
110. Barnston, A.G. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns / A.G. Barnston, R.E. Livezey // *Monthly Weather Review*. Vol. 115 (6). –1987. – P. 1083-1126.
111. Zolina, O Improving accuracy of mapping cyclone numbers and frequencies / O. Zolina, S.K. Gulev // *Monthly Weather Review*. № 130. –2002. – P. 748-759.
112. Луценко, Э.И. Полярные мезомасштабные циклонические вихри в атмосфере Арктики. Справочное пособие / Э.И. Луценко, В.Е. Лагун // СПб.: ААНИИ, 2010. – 97 с.
113. Laffineur, T. Polar Lows over the Nordic Seas: Improved Representation in ERA-Interim Compared to ERA-40 and the Impact on Downscaled Simulations / T. Laffineur, C. Claud, J.-P. Chaboureau, and G. Noer // *Monthly Weather Review*. Vol. 142. Issue 6. –2014. – P 2271–2289. – doi:10.1175/MWR-D-13-00171.1.

114. Noer, G. Dates and Positions of Polar lows over the Nordic Seas between 2000 and 2010 / G. Noer, T. Lien // *Met. no report*. Vol. 16. –2010. – P. 1-7
115. Короновский, А.В. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения / Короновский А.В., Храмов А.Е. // М.: Физматлит, 2003. – 174 с.
116. Andronova, N. G. Causes of global temperature changes during the 19th and 20th centuries / N. G. Andronova, M. E. Schlesinger // *Geophysical Research Letters* №27. – 2000 – P.2137–2140
117. Delworth, T. L. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere / T. L. Delworth, M. E. Mann // *Climate Dynamics* №1627 . – 2000 – P. 661–676
118. Bridgman, H. *The Global Climate System* / H. Bridgman, J. Oliver . – Cambridge University Press, 2014. – 358с
119. Minobe, S. A 50–70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America/ S. Minobe // *Geophysical Research Letters*, Vol. 24, . – 1997 – P. 683–686
120. Поисковый комплекс о климатических изменениях Земли [Электронный ресурс] . – 2015. – Режим доступа: <http://www.Ipcc.ch>
121. Поисковый комплекс о характеристиках Земли [Электронный ресурс]. . – 2015. –Режим доступа: <http://www.globe.gov/>
122. Поисковый комплекс о характеристиках Земли [Электронный ресурс]. . – 2015. –Режим доступа: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>
123. Barnston, A.G. Classification, seasonality, and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns / A.G. Barnston // *Monthly Weather Review*, Vol.115, Issue 6. – 1987. — P 1083–1126
124. Железнова, И.В. Отклик в система океан-атмосфера на каноническое Эль-Ниньо и Эль-Ниньо Модоки: дис. канд. геогр. наук.: 25.00.28, 25.00.30: защищена 2015. / И.В. Железнова — М., 2015. — 264 с.

125. Хайруллина, Г.Р. Квазидвухлетние колебания в атмосфере Земли. Обзор: наблюдения и механизмы формирования – М.: ИКИ РАН, 2011. – 60 с.
126. Вязилова, Н.А. О штормовых циклонах в Северной Атлантике / Н.А. Вязилова, А.Е. Вязилова // Метеорология и гидрология № 6. – 2014. — С. 19–27.
127. Вязилова, Н.А. Об усилении экстремальности штормовой активности в Северной Атлантике по данным показателей ЕСИМО / Н.А. Вязилова // Труды ВНИИГМИ-МЦД, выпуск 179. – 2015 г
128. Bengtsson L. Will Extratropical Storms Intensify in a Warmer Climate? / L. Bengtsson, K. I. Hodges, N. Keenlyside // Journal of Climate, Vol. 22 (9). – 2009. - P. 2276-2301.
129. Paciorek, C. J. Multiple indices of Northern Hemisphere Cyclone Activity, Winters 1949 – 1999 // Journal of Climate, Vol. 15 (13). – 2002. -P. 1573-1590.