

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального 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

О. Г. Анискина

Санкт-Петербург 2015

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Научный руководитель: Кандидат физико-математических, доцент
Анискина Ольга Георгиевна

Официальные оппоненты: **Закинян Роберт Гургенович**,
доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры общей и
теоретической физики Института математики и
естественных наук Северо-Кавказского
федерального университета.

Дорофеев Евгений Викторович,
кандидат физико-математических наук,
Заведующий лабораторией радиолокационных
метеорологических исследований и контроля
активных воздействий Главной Геофизической
обсерватории им. А.И. Воейкова

Ведущая организация: Международный центр по окружающей среде и
дистанционному зондированию имени Нансена
(«Нансен-центр»), Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится « 25 » февраля 2016 г. в 15 часов 00 мин на
заседании диссертационного совета Д.212.197.01 при Российском
государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г.
Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского
государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан « 20 » января 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент



Л.В.Кашлева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Общей циркуляцией атмосферы определяется распределение всех метеорологических величин. 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 климата.

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/час. 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. 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 прохождение таких циклонов приводит к огромным экономическим ущербам.

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. В некоторых работах авторы связывают глобальное потепление с интенсификацией циклонической циркуляции.

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, смещением магнитных полюсов. Причину изменения циркуляции, а, соответственно, и климата другие учёные видят в изменении

интенсивности Гольфстрима. Некоторые предполагают, что циркуляция меняется из-за антропогенного изменения газового и аэрозольного состава атмосферы. Хотя парниковые газы уменьшают амплитуду колебаний температуры у земной поверхности, сокращая ночное выхолаживание, но вместе с тем уменьшается и дневной нагрев. Немало исследователей видят ответ на вопрос об изменении циркуляции и климата во влиянии процессов, происходящих на Солнце и в межпланетной среде. Однако отношение ко всем этим утверждениям неоднозначно.

Традиционно 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.

Сегодня нет однозначного ответа на вопрос о реальных механизмах формирования изменений в атмосферной циркуляции. Это объясняется тем, что, несмотря на огромную научную значимость вышеупомянутых исследовательских работ, в большинстве 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, а значит необходимо рассматривать именно циклоны и антициклоны, которые определяют атмосферную циркуляцию и формируют реальную погоду и климат.

В данной работе основное внимание уделяется анализу повторяемости циклонов и изучению их характеристик в северном и южном полушариях Земли. В виду того, что в последние годы наблюдается большие изменения атмосферных характеристик, 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 метода;
- Разработка программного обеспечения объективной 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, а также антропогенного форсинга.

Предметом исследования является количественная оценка циклонических режимов атмосферы северного и южного полушарий, анализ их 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 неглубоких и средних циклонах. При высоком пороговом значении определяется много ложбин в приэкваториальной зоне, которые имеют отличную от внутритропических циклонов природу. При высоком разрешении анализируемых полей определяются многоцентровые депрессии и

обязательно использование дополнительных условий для фильтрации шумов.

2. На основе современных точных данных получены новые количественные оценки временной изменчивости характеристик циклонических режимов в различных областях земного шара. Выявлено увеличение количества циклонических режимов в обоих полушариях и увеличение глубины циклонов в северном полушарии. Выявлено увеличение количества глубоких циклонов в северном полушарии. Обнаружено увеличение индекса циклонической активности, которое связано с увеличением глубины циклонов в северном полушарии и с увеличением количества циклонов в южном полушарии.

3. Установлены частотно-временные характеристики изменчивости количества циклонов в зависимости от территории и времени года. Выявлены несколько видов колебаний во временных рядах характеристик 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 1970х 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 интенсивности и размеров с интенсивностью крупномасштабных режимов циркуляции. Выявлена значительная связь циркуляционных режимов южного и северного полушарий с Северо-Атлантическим колебанием, Атлантическим мультидекадным 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 циклонических и антициклонических режимов 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. Результаты могут быть использованы при составлении 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 климата и для принятия

управленческих решений в различных областях административной деятельности.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования временной структуры циклонических режимов в южном и северном полушарии. Выявлено два периода в изменении количества циклонических режимов и их характеристик. Во временных рядах некоторых характеристик циклонов дополнительно обнаружены резкие изменения в последнее десятилетие.

2. Результаты 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. Сеточные поля с хорошим разрешением требуют дополнительных условий для фильтрации шумов. Результаты по двум реанализам согласуются между собой.

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. Наблюдается увеличение количества циклонов в обоих полушариях. Также увеличивается индекс циклонической активности. Это связано с увеличением глубины циклонов в северном полушарии и увеличением их количества в южном.

4. Результаты анализа связи изменений характеристик циклонов с основными внешними и внутренними колебаниями атмосферы. 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 провёл численные эксперименты 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;

на 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», г. Аджман, Объединённые Арабские Эмираты, 22 – 23 ноября 2015;

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 166 страниц, в том числе 72 рисунков и 8 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 129 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность исследования внетропических циклонов, сформулированы цели и задачи работы, излагается теоретическая новизна и практическая значимость. Определены выносимые на защиту положения и результаты, а также описана структура диссертации.

В разделах **главы 1 «Методы идентификации циклонов, исследования их основных характеристик и дальних связей в атмосфере»** раскрыта актуальность исследования, дан обзор существующих методов идентификации циклонов, раскрыто общее состояние темы исследования и имеющиеся на данный момент научные результаты. Здесь же описывается выбранный метод идентификации, его модификация для исследования, описаны используемые в анализе данные.

В первом разделе главы 1 описываются используемые данные и методики исследования основных характеристик циклонических режимов.

В данной работе рассматривается взаимодействие атмосферы и океана, проанализированы такие циркуляционные системы как Южное колебание (Эль-Ниньо/Ла-Нинья), Северо-Атлантическое колебание, Атлантическое мульти-декадное колебанием. Их основные характеристики кратко описаны в первой главе. Также рассматривается связь циркуляции с процессами, происходящими на Солнце и свободное или чандлеровское колебание.

Даже в условиях современного изменения климата принято, что на отдельных небольших отрезках временного ряда, например, продолжительностью 30 лет колебания климатических характеристик являются квазистационарными, 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, которые динамически согласованы и однородны, а потому позволяют получить наиболее достоверные оценки.

В данном диссертационном исследовании использовались данные реанализов

- NCEP/NCAR. Использовались дискретные сеточные поля приземного давления, приведенного к уровню моря, с широтно-долготным разрешением сетки $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ по широте и долготе, за период с 1948 г. по 2014 г, временная дискретизация данных – 6 часов.

- ERA- INTERIM. Использовались сеточные поля приземного давления, приведенного к уровню моря, с широтно-долготным разрешением сетки $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ по широте и долготе, за период с января 1979 по июль 2015 года, временная дискретизация – 6 часов.

Для исследования основных закономерностей и выявления связей между циклоническими режимами и макроциркуляционными процессами использовались данные о Северо-Атлантическом колебании, Атлантическом мультити-декадном колебании, Южном колебании (Эль-Ниньо/Ла-Нинья) за каждый месяц, начиная с 1950 года по настоящее время

Во втором разделе первой главы рассматривается метод идентификации циклонов, используемый в данной диссертационной работе.

После проведенного анализа существующих методов идентификации циклонов было отдано предпочтение методу, разработанному в Лаборатории Взаимодействия Океана и Атмосферы и Мониторинга Климатических Изменений Института Океанологии РАН (ЛВОАМКИ, («Циклон», №2006612244)). 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.

Суть метода идентификации циклонов заключается в следующем. По полю сеточных значений приземного давления выбирался узел, в котором давление было минимальным и не превышало порогового значения. После этого для каждой точки, удовлетворяющей этому условию, сравнивались значения давления в 12 соседних узлах. Точка с сеточными координатами (i, j) считалась центром циклона, если давление в ней удовлетворяло следующим условиям

$$p_{ij} \leq p_{i+1j}, p_{ij} \leq p_{ij+1}, p_{ij} \leq p_{i-1j}, p_{ij} \leq p_{ij-1},$$

$$p_{ij} \leq p_{i+1j+1}, p_{ij} \leq p_{i-1j-1}, p_{ij} \leq p_{i+1j-1}, p_{ij} \leq p_{i-1j+1}$$

$$p_{i-1j} \leq p_{i-2j}, p_{ij} \leq p_{i+2j}, p_{i,j-1} \leq p_{i,j-2}, p_{i,j+1} \leq p_{i,j+2},$$

а также выполнялись некоторые дополнительные условия.

Анализ проводился по всему земному шару и по отдельным регионам.

Был создан программный комплекс, позволяющий идентифицировать циклоны в разных регионах и по разным данным.

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 приведен пример результата анализа поля давления с нанесенными на него точками, в которых определены центры циклонов.

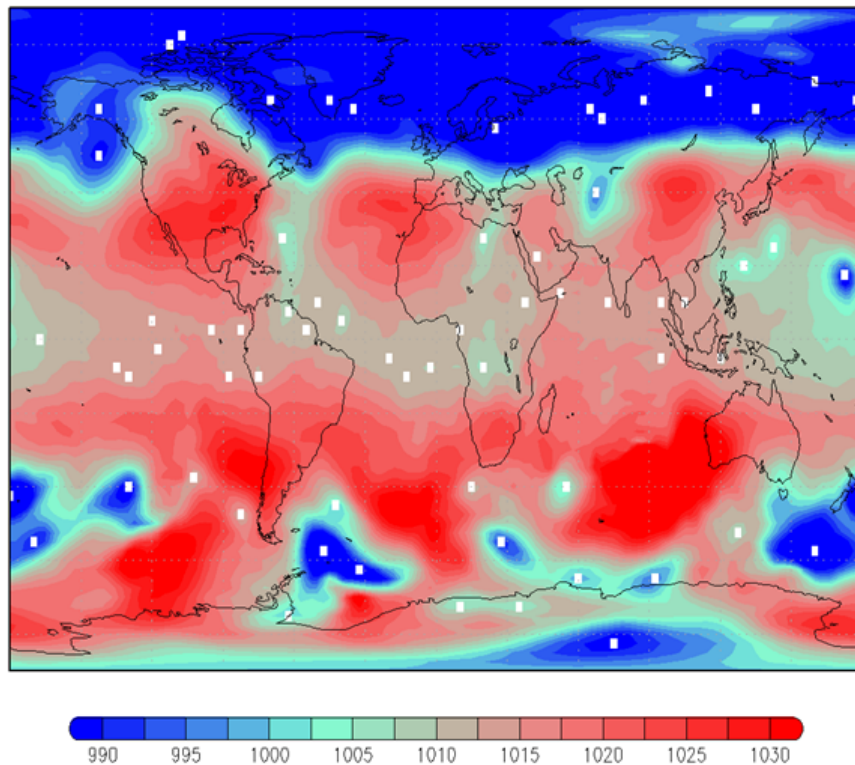


Рисунок 1 – Поле приземного давления и центры циклонов за срок 18 часов 4 января 1978 года, определённые по данным NCEP/NCAR

Проведена верификация результатов идентификации по синоптическим картам и спутниковым снимкам.

В разделе описаны численные эксперименты и проанализированы их результаты по определению порогового значения давления, используемого для идентификации циклонов. Оценено влияния параметров метода идентификации циклонов на качество результатов при разных разрешениях сеточных полей и для разных баз данных (NCEP/NCAR и ERA-INTERIM).

По результатам идентификации циклонов получены временные ряды количества циклонов, их характеристик и местоположения, которые обрабатывались в дальнейшем.

Для детального анализа циклонических режимов в ходе работы рассчитаны следующие характеристики циклонических режимов:

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

Перечисленные характеристики проанализированы в северном полушарии, южном полушарии и Атлантическом регионе Северного полушария и над Европой.

Описаны методы расчёта коэффициента корреляции, скользящих трендов и их значимости. Оценивался коэффициент корреляции для тридцатилетних периодов – с 1950 по 1980 год, 1951 по 1981 год и т.д. С помощью критерия Стьюдента оценена значимость корреляционных связей.

При анализе сеточных полей давления сначала выбиралось пороговое значение давления, которое может быть в центре циклона. В данной работе проведены численные эксперименты по выбору оптимального значения порогового давления в схеме идентификации циклонов.

В третьем разделе первой главы описаны методы получения геометрических характеристик циклонов. Для определения площади циклона сначала определялась его граница. Она рассчитывалась «по последней замкнутой изобаре». Для этого рассчитывался градиент

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

$$GR_{i+m,j} = \frac{P_{i,j+n} - P_{i,j+n-1}}{ndx},$$

где GR – градиент давления в циклоне по широте и долготе, гПа/м;
 dx, dy – Расстояние между узлами сетки по широте и долготе, км;
 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.

Граничным считался узел, в котором градиент давления обращался в нуль или менял знак на противоположный, то есть

$$GR_{i+m,j} \leq 0$$

$$GR_{i,j+n} \leq 0$$

Радиус циклона рассчитывался по формулам

$$R_x = m dx$$

$$R_y = n dy$$

После определения границ циклона рассчитывалась площадь циклона (S), которая определялась как сумма площадей четырех треугольников с вершинами в центре циклона и четырех точках, определенных в качестве границы циклона (рисунок 2)

$$S = \frac{(R_s + R_n)(R_w + R_e)}{2}$$

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;

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

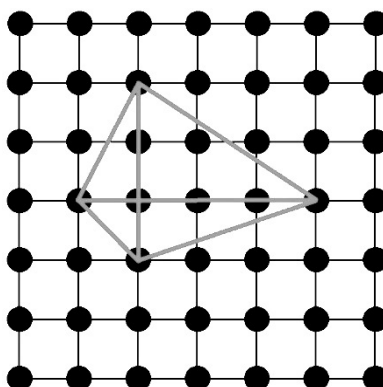


Рисунок 2 – Пример разбиения циклона на треугольники для оценки его площади

Для более наглядного представления рассчитанной величины площади, циклон представлялся в виде окружности с радиусом $R_{эф}$. Эффективный радиус циклона – величина, значение которой удобнее анализировать нежели площадь – рассчитывался следующим образом:

$$R_{эф} = \sqrt{\frac{S}{\pi}},$$

В четвёртом разделе первой главы описаны исследования индекса циклонической активности (*Cyclone activity index - CAI*). 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

$$CAI = \overline{P_c - P_{climate}^{cyclone\ month}},$$

где $P_{climate}$ – среднее значение давления в узле, соответствующем центру циклона;
 P_c – давление в центре циклона.

Среднее значение давления в каждом узле рассчитывалось по данным реанализа в каждой точке в анализируемом месяце за 66 лет для реанализа NCEP/NCAR и за 36 лет для реанализа ERA-INTERIM. Так как в обоих случаях длина ряд данных более 30 лет, это позволяет использовать осредненные среднемесячные данные в качестве климатических.

Была оценена глубина циклонов. Был рассчитан, так называемый, «средний» циклон для каждого месяца. Для этого значения давления во всех узлах, в которых определялся центр циклона, складывались и делились на общее количество циклонов в заданном месяце заданного года в данной точке.

Рассчитывались аномалии анализированных характеристик циклонических режимов и их нормированные значения. Нормирование проводилось на модуль величины максимального отклонения от нормы.

В пятом разделе первой главы рассмотрена методика исследования временных рядов характеристик циклонических режимов на скрытые циклы колебаний. Исследовались временные ряды количества циклонов, их глубины и индекса циклонической активности с использованием вейвлет-анализа, являющимся мощным средством спектрального анализа динамики системы. В качестве материнского использовался вейвлет Морле.

Во второй главе «Характеристики циклонов на основе реанализа NCEP/NCAR» приведены результаты исследования, полученные на основе реанализа NCEP/NCAR.

Приведены результаты анализа годового и месячного количества циклонов как в северном, так и в южном полушариях. Временной ход годового количества циклонов представлен на рисунке 3.

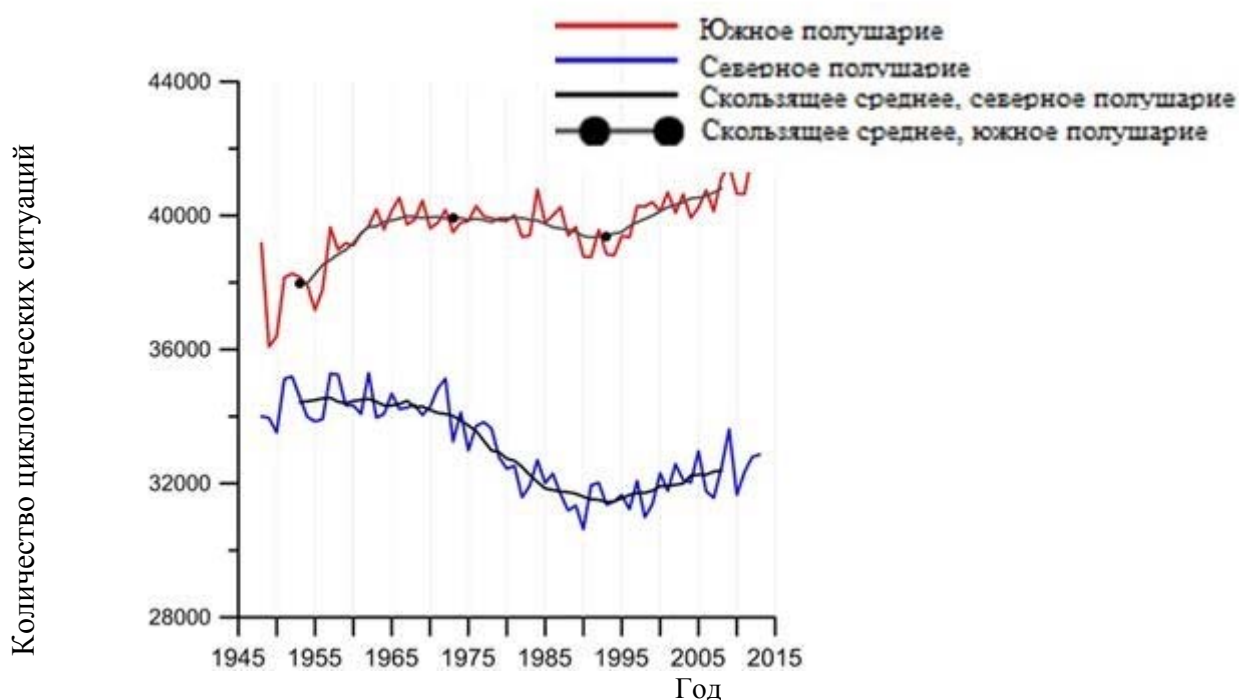


Рисунок 3– Изменение суммарного количества циклонов в северном и южном полушариях

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

Временная изменчивость годового количества циклонов 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). 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 нашему мнению, существует совместное влияние собственных колебаний сложной динамической системы Земля-океан-атмосфера и антропогенного форсинга, который частично проявляется через естественные геофизические процессы.

Все характеристики циклонических режимов претерпевают бОльшие изменения 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.

Изменения количества циклонов в южном (в меньшей степени) и северном полушарии можно связать с повышением глобальной температуры атмосферы – наиболее значительные (в северном полушарии) изменения количества циклонов 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 и 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. Временной ряд количества циклонов был разбит на отрезки продолжительностью 30 лет с отключением 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.

Скользящие коэффициенты линейного тренда представлены на рисунке 4. Одна точка на графике соответствует коэффициенту линейного тренда за тридцатилетний период, начиная от года, к которому относится точка на графике. Цифры над каждой точкой показывают значимость коэффициента линейного тренда: 1 – коэффициент значим, 0 – коэффициент незначим.

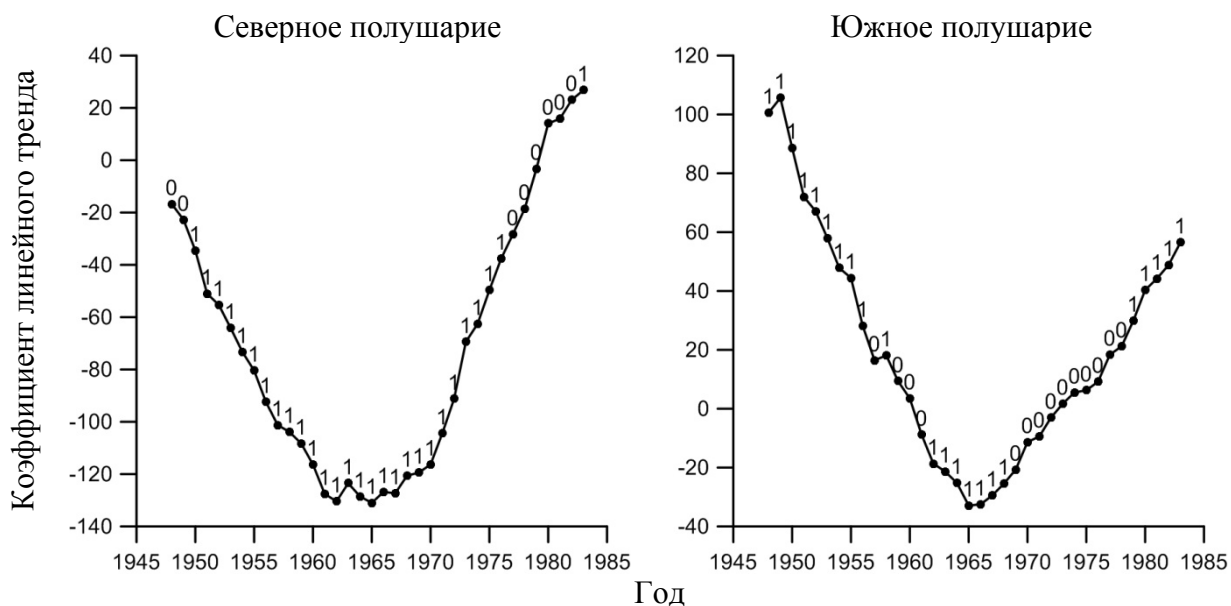


Рисунок 4 – Скользящий коэффициент линейного тренда и его значимость для годового количества циклонов в северном и южном полушарии

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 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 хорошо согласуется 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 мульти-декадное колебание и на количество циклонов. Дальнейшие исследования позволяют сделать именно этот вывод.

Проведён анализ временных рядов суммарного количества циклонических ситуаций за 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. 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 в южном полушарии.

Во втором разделе второй главы описаны результаты исследования глубины циклонов по данным реанализа NCEP/NCAR. Анализ 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 давления 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». В северном полушарии колебания экстремальных значений давления (размах) сильнее, чем в южном. В южном полушарии изменения меньше. Разница между «максимальным» и «минимальным» давлением в северном полушарии больше и прослеживается тенденция к её увеличению. В северном полушарии циклоны существенно глубже, чем в южном. Сделан вывод о том, что циклоны и в северном и в южном полушариях углубляются, при этом углубление циклонов в северном полушарии значительнее.

Проведён анализ сезонного хода экстремальных значений давления в центре циклона – 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 рассмотреть период до 1980 г 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.

В южном полушарии изменения в сезонности наблюдения экстремальных значений до и после 1980 годов менее заметны.

В третьем разделе второй главы приведены результаты исследования площади циклонов по данным реанализа NCEP/NCAR.

В северном полушарии максимальная аномалия площади циклонов наблюдается в холодный период года (январь и март), минимальная – в тёплый период года (июль). Если анализируемый временной ряд 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 временного 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, показательно для последних десятилетий именно изменения в переходные месяцы (в северном полушарии большие циклоны стали чаще наблюдаться также в марте).

В четвёртом разделе второй главы приводятся результаты исследование объема переносимого циклонами приземного воздуха на основе данных реанализа NCEP/NCAR. 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 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.

В разделе пять второй главы рассмотрены результаты исследования циклонической активности на основе данных реанализа NCEP/NCAR. Индекс циклонической активности CAI очень сложная и неоднозначная для анализа величина, так как 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. Максимальная аномалия, т.е. наиболее глубокие относительно климатической нормы в данной точке 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 еще чаще. Наиболее высокая частота максимальной аномалии же сместилась с января на февраль (опять февраль!). В южном полушарии картина совершенно другая – здесь не наблюдается практически никакого изменения индекса циклонической активности со временем. Сами значения индекса циклонической активности значительно меньше. Приблизительно равно количество циклонов, в которых давление в центре выше нормы и ниже нормы. Малая изменчивость индекса циклонической активности в южном полушарии проявляется и в распределении по месяцам повторяемости экстремальных значений индекса CAI. До и после 1980 года сохраняются одни и те же закономерности.

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 можно сделать вывод о том, в северном полушарии циклоническая активность более обуславливается глубиной циклонов, нежели их количеством. В южном полушарии таких закономерностей не обнаружено.

В шестом разделе второй главы рассматривается Связь Северо-Атлантического колебания и характеристик циклонов северного полушария. 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. Пример, полученных результатов, представлен на рисунке 5. Белым цветом на рисунке отмечены области незначимых коэффициентов корреляции.

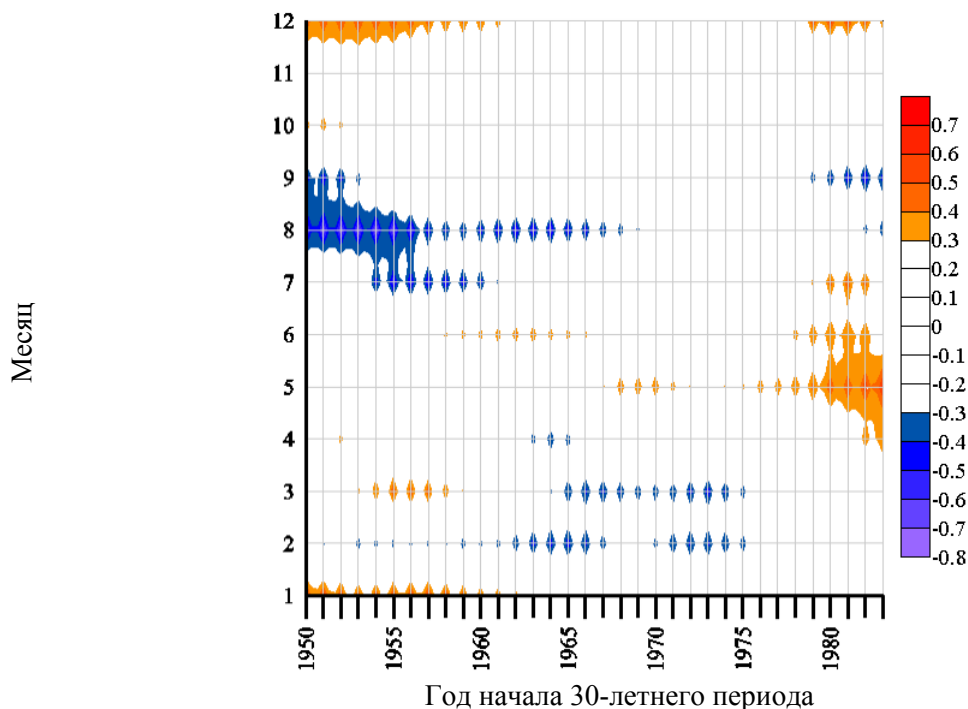


Рисунок 5 – Коэффициенты корреляции для скользящих тридцатилетних периодов между САК и глубиной циклонов в северном полушарии

Коэффициенты корреляции рассчитывались для индекса САК и аномалии глубины циклонов, то есть отрицательный коэффициент корреляции означает, что усиление САК соответствует отрицательным аномалиям глубины циклонов – циклоны углубляются. 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 между САК и глубиной циклонов в 60 гг. и 80 гг. 20 столетия.

В большинстве своем 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. Связи между САК и количеством циклонов выражены сильнее. В последние десятилетия прослеживается 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 значит 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. 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 циклонические режимы 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. 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.

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.

В седьмом разделе второй главы рассмотрена связь Южного колебания (Эль-Ниньо/Ла-Нинья) и характеристик циклонов северного и южного полушарий. Анализ показал, что существуют значимые коэффициенты корреляции индекса Южного колебания и глубины циклонов южного полушария с сентября по ноябрь практически на протяжении всего исследуемого периода. 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. Наиболее сильная отрицательная корреляция индекса Южного колебания и количества циклонов в последние годы наблюдается в весенние месяцы. 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. Хочется отметить, что перелом в 1965 году, который отмечался и ранее, означает, что меняются тренды во временном ряду с периода от 1965 по 1995 года и далее. Перелом в 1980 году, который отмечается в связях Южного колебания и индекса САІ, означает изменения во временном отрезке от 1980 до 2010 года. Значит, связи с в южном полушарии изменились позднее, что можно также сопоставить с антропогенным форсингом, который в южном, менее индустриально развитом, полушарии проявляется позже.

Найдена значимая корреляция между глубиной циклонов северного полушария и индексом Южного колебания. Как и ранее, наблюдается переход к другим сценариям связей в 1980х годах. Количество циклонов северного полушария с индексом Южного колебания коррелирует плохо.

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). Глубина и количество циклонов в Европе слабо связаны с Южным колебанием.

В восьмом разделе второй главы проанализирована связь между Атлантической мульти-декадной осцилляцией и характеристиками циклонов северного полушарий. Анализ проводился для сглаженных за три года характеристик циклонической активности, глубиной и количеством циклонов. Были выявлены значимые корреляционные связи между индексом АМО, количеством циклонов, индексом циклонической активности САІ и глубиной циклонов. До середины 50-х годов коэффициенты корреляции, которые значительны практически во все месяцы, положительные, с середины 60-х годов знак коэффициентов корреляции изменился на противоположный.

Также приведены результаты анализа связи АМО с характеристиками циклонов в Европе и северной Атлантике. Картина, полученная для региона северной Атлантики и Европы, кардинально отличается от той, что

наблюдается для северного полушария в целом. Опять на всех временных рядах чётко прослеживаются два периода, точка смены сценариев развития приходится на период приблизительно 1965-1985 гг.

В девятой части второй главы приводятся результаты исследования характеристик циклонов на скрытые колебания с использованием вейвлет-анализа. На рисунке 6 представлен пример частотно-временного портрета количества циклонов в северном и южном полушариях, соответственно. Светло-синим цветом обозначены наиболее слабые колебания, красным – наиболее сильные. В результате исследования выявлены колебания, которые дают основание связать изменения количества и характеристик циклонов с солнечной активностью и собственным колебанием системы Земля-океан-атмосфера, а также говорить о влиянии антропогенного форсинга.

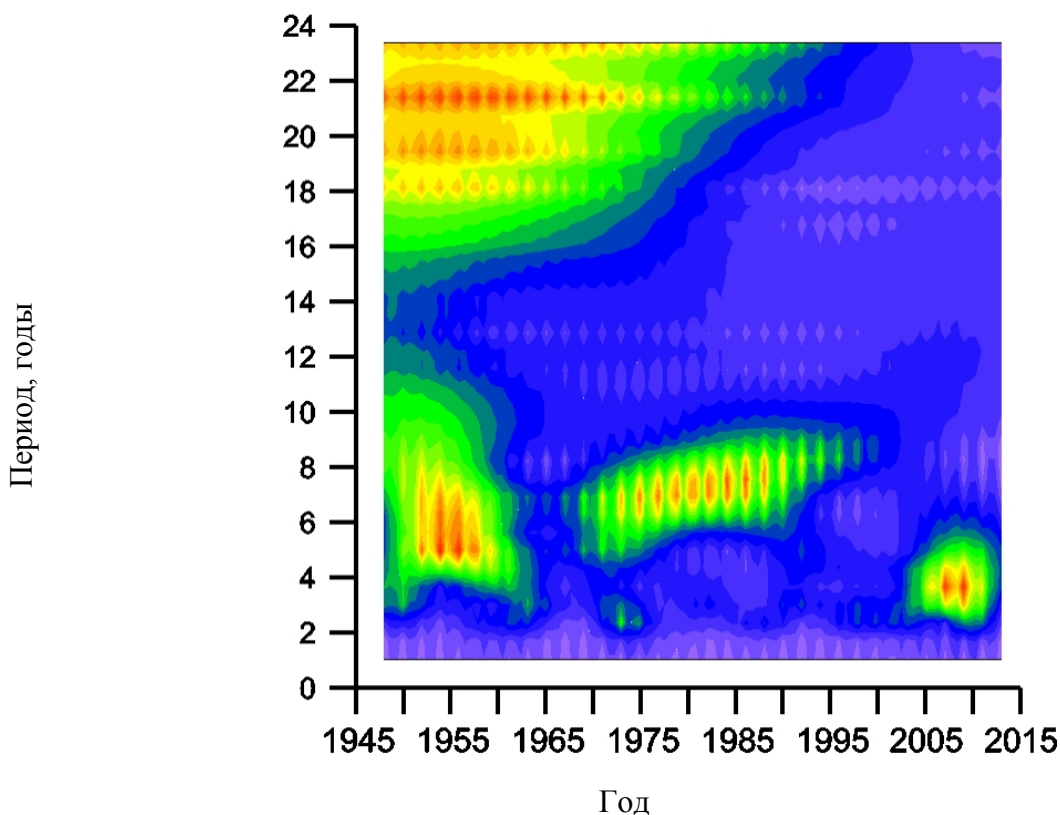


Рисунок 6 – Частотно-временной портрет количества циклонов в северном полушарии

В третьей главе «Анализ характеристик циклонических режимов на основе данных реанализа ERA-INTERIM» описываются результаты исследования характеристик циклонических режимов разных регионов по результатам реанализа ERA-INTERIM и сравнение результатов, полученным по двум реанализам. Структура третьей главы повторяет структуру второй, в каждом разделе анализируется одна из характеристик циклонических режимов северного и южного полушарий, также Европейско-Атлантического региона.

По результатам реанализа ERA-INTERIM было выявлено большее количество циклонов, что объяснимо более хорошим разрешением данных. Временные изменения всех характеристик согласуется с результатами, полученными ранее. Отличие от реанализа NCEP/NCAR проявляется в том, что разница между наиболее и наименее глубокими циклонами в северном полушарии уменьшается. Этот факт объясним большим количеством определённых барических образований.

В четвёртой главе «Сравнение количества и характеристик «экстремальных» циклонов по результатам идентификации в реанализе NCEP/NCAR и ERA-INTERIM» проведён анализ циклонических режимов, связанных с глубокими циклонами.

В ходе исследования сравнивалось количество и характеристики глубоких циклонов, идентифицированных по разным реанализам. «Экстремальными» считались циклоны с атмосферным давлением в центре менее 970 гПа.

Четвёртая глава состоит из двух разделов, в которых приводятся результаты анализа количества «экстремальных» циклонов и их глубины.

На рисунке 7 приведён временной ход количества «экстремальных» циклонов по данным реанализа ERA-INTERIM. В северном полушарии таких циклонов приблизительно в 10 раз больше. Соответственно, разница амплитуды изменения в северном полушарии также больше. Ранее в нашем исследовании был получен такой же результат – в южном полушарии преобладают «средние» неглубокие циклоны. В северном полушарии отчетливо прослеживается тенденция на увеличение количества «экстремальных» циклонов.

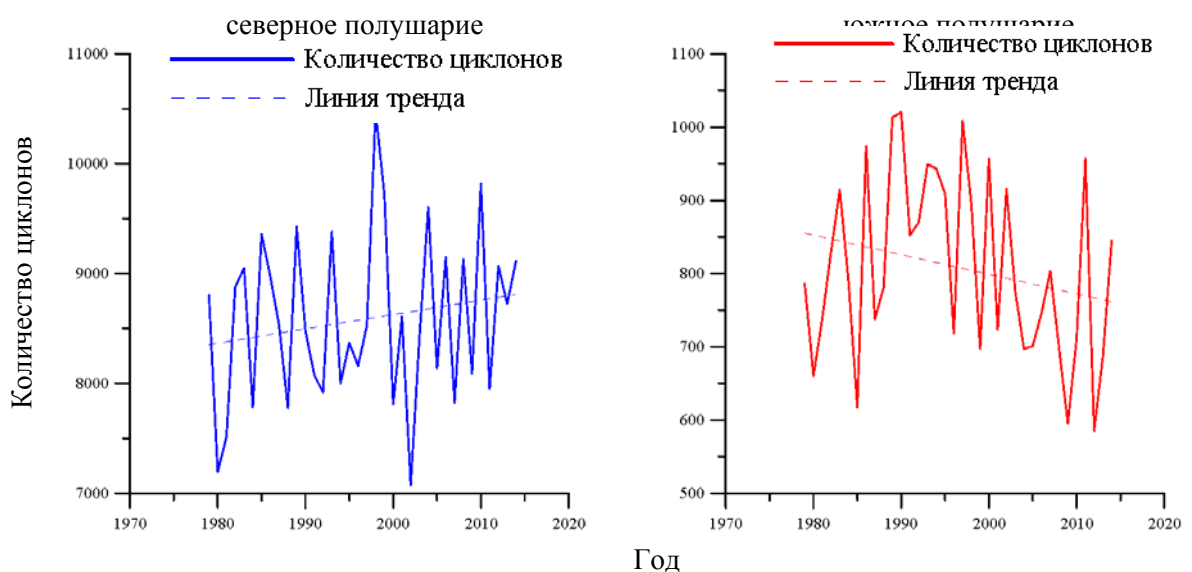


Рисунок 7 – Количество «экстремальных» циклонов, идентифицированных по ERA-INTERIM в северном (левая панель) и южном (правая панель) полушариях.

В ходе исследования количество «экстремальных» циклонов было проанализировано с помощью ранговых диаграмм (box-whiskers-plots), пример которой представлен на рисунке 8. 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 величин ряда.

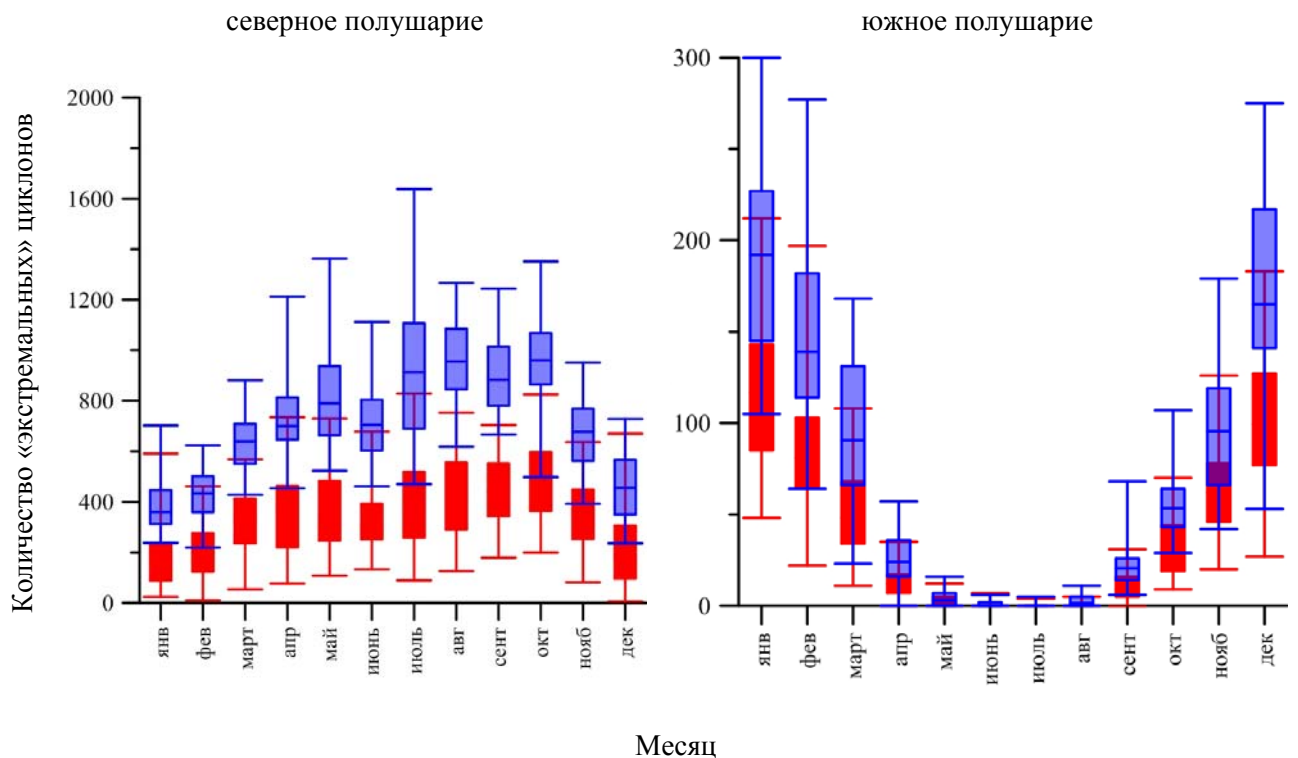


Рисунок 8 – Количество циклонов, идентифицированных в северном (левая панель) и южном (правая панель) полушариях.

Из анализа ранговых диаграмм следует, что хотя на основе реанализа ERA-INTERIM идентифицируется значительно больше циклонов, чем на основе NCEP/NCAR, общий годовой ход одинаков.

В южном полушарии по данным обоих реанализов экстремальное давление в центре циклонов мало меняется. В северном же по результатам реанализа NCEP/NCAR давление в «экстремальных» циклонах уменьшается значительно. Однако на основе реанализа ERA-INTERIM значительных изменений в глубине таких циклонов не происходит. Экстремально низкие значения давления в циклонах северного полушария наблюдались в конце 90-х – начале 2000-х, в южном – в начале 90-х. Самые глубокие из «экстремальных» циклонов в южном полушарии отмечают с конца весны до начала осени, в северном полушарии наблюдаются аналогичные тенденции, однако сами циклоны здесь глубже.

В заключении приведены основные выводы:

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, 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 мультидекадного колебания и антропогенным форсингом.

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

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

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

В северном полушарии циклоны существенно глубже, чем в южном.

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.

Количество циклонов, определённое по реанализам ERA-INTERIM и NCEP/NCAR, отличается приблизительно на 25% при одинаковых условиях идентификации.

Основные закономерности, выявленные по разным реанализам, совпадают.

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.