

На правах рукописи

Поднебесных Наталия Владимировна

**Динамика циклонической и антициклонической активности над
Сибирью**

25.00.30 – метеорология, климатология и агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор
Горбатенко Валентина Петровна

Официальные оппоненты: доктор географических наук, профессор
Кобышева Нина Владимировна
кандидат географических наук
Решетько Маргарита Викторовна

Ведущая организация: Институт географии СО РАН

Защита состоится ... 2010 г. в ... ч. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 327.005.01 в ГУ «ГГО» по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГУ «ГГО».

Автореферат разослан « ... » 2010 г.

Учёный секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций,
доктор географических наук

А.В. Мещерская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Современные изменения климата, начало которых датируется серединой 70-х годов прошлого столетия, находятся в центре внимания не только специалистов – климатологов, но и политиков, экономистов, представителей других общественных слоёв. Оценки, приведённые в IV отчёте МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата) (2007) свидетельствуют, что для периода 1906-2005 гг. глобальное потепление составило $0,74 \pm 0,18^{\circ}\text{C}$. Для России, согласно оценочному докладу об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2008) потепление за 100-летний период составило $1,29^{\circ}\text{C}$.

Пространственная структура потепления в XX веке характеризуется существенной неоднородностью, особенно во внетропических широтах. Потепление 40-х годов наиболее существенно проявилось в регионах, примыкающих к Северной Атлантике. Похолодание в период 1945-1975 гг. было типично для всего Северного полушария. Ускоренный рост температуры в 1976-2006 гг. особенно чётко проявился на континентах Северного полушария. В континентальных районах (за исключением прибрежных) ночные температуры повышались более быстрыми темпами, чем дневные. В Южном полушарии за период 1945-1975 гг. наблюдалось некоторое потепление, а в 1976-2006 гг. в некоторых регионах Южного полушария наблюдалось небольшое круглогодичное похолодание.

Изменения элементов климата в Северном полушарии проявились в повышении средней годовой глобальной температуры приземного слоя воздуха, подъёме уровня мирового океана, уменьшении площади снежного покрова, протяжённости и толщины льда арктических морей, повсеместном отступании неполярных ледников.

В качестве основной причины наблюдаемого глобального потепления МГЭИК рассматривает возрастание антропогенной нагрузки на климатическую систему и выбросы в атмосферу парниковых газов и сульфатных аэрозолей. В соответствии с этим сценарием изменения климата в XXI веке увязываются с возможными прогнозами антропогенных выбросов CO_2 , ограничению которых призван служить Киотский протокол (1997 г.). Основанные на численных моделях климата прогнозные оценки повышения приземной температуры воздуха (ПТВ) к 2010 г. находятся в пределах $1,4\text{--}5,8^{\circ}\text{C}$ при задании различных сценариев изменения концентрации CO_2 . Эти оценки МГЭИК, а также причины, вызывающие наблюдаемое потепление, пока остаются дискуссионными, так как значительная группа исследователей связывает происходящие изменения с естественными колебаниями климата.

Для углубленного понимания причин происходящих изменений климата требуется анализ воздействия на рассматриваемую территорию различных климатообразующих факторов. Среди них важное место занимает атмосферная циркуляция, поскольку она (наряду с океанической) приводит к перераспределению тепла от низких к умеренным и высоким широтам.

Исследованию влияния атмосферной циркуляции на климат посвящено большое количество работ. Наиболее часто рассматриваются связи между климатическими параметрами и телеконнекционными индексами, описывающими скорее глобальную циркуляцию (NAO, SOI, SCAND и др.). В ряде работ для описания циркуляции используются типизации, описывающие чередование определённых форм

макропроцессов (индексы Дзердзеевского, Виттельса, Каца и др.). В появившихся в последние годы работах по исследованию циклонической и антициклонической активности (Gulev et al. (2001), Ioannidou et al. (2008)) рассматриваются, полученные на основе баз данных реанализа, закономерности изменения вихревой активности как для полушария в целом, так и для отдельных регионов. Такие работы представляют большой интерес, однако, во-первых, их результаты должны быть протестированы с помощью аналогичных данных, получаемых с использованием синоптических карт и, во-вторых, эти работы не связывают изменения в циркуляции с изменениями климата в рассматриваемых пространственных областях.

Таким образом, изучение изменчивости характеристик местного климата на фоне динамики циклонической и антициклонической активности для климатически значимого временного интервала, совпадающего с периодом современного глобального потепления 1976-2006 гг. приобретает особую актуальность.

Актуальность настоящей работы определяется тем, что в ней:

- исследуются закономерности изменения вихревой активности в крупном климатообразующем районе Сибири за климатически значимый промежуток времени (1976-2006 гг.), отвечающий ускоренному глобальному потеплению;
- выявляются связи установленных изменений вихревой активности с происходящими в регионе климатическими изменениями.

Цель работы - исследование характеристик и динамики барических образований (циклонов и антициклонов), определявших климатические условия над исследуемой территорией за период 1976-2006 гг. по данным синоптических карт и данным NCEP/DOE AMIP II реанализа и изучение изменчивости температуры воздуха обусловленной вариативностью исследуемых циркуляционных процессов Сибири.

Основные задачи исследования:

1. на основе анализа синоптических карт за период 1976-2006 гг. провести классификацию барических образований, определяющих климатические условия Сибири, по месту их образования и траектории движения;
2. изучить внутригодовую и межгодовую изменчивость повторяемости барических образований различного генезиса;
3. сравнить характеристики барических образований различных типов, такие как: частота выхода на исследуемую территорию в разные сезоны и месяцы года, число дней с циклонами (антициклонами) над исследуемой территорией, значение давления в центрах барических образований, их горизонтальный градиент давления и вертикальная мощность барической системы;
4. сравнить результаты анализа приземных синоптических карт и карт, полученных с помощью реанализа NCEP/DOE AMIP II;
5. сопоставить тенденции изменений температуры воздуха и характеристик барических образований в исследуемом регионе.

Материал и методика исследования

Для получения динамики климатических характеристик циклонов и антициклонов над Сибирью были использованы приземные синоптические и высотные карты за период 1976-2006 гг. Выбор периода исследований обусловлен тем, что с середины 70-х гг. XX века существенно изменился характер динамики климата в его взаимосвязи с процессами атмосферной циркуляции. В сумме было проанализировано 45260 синоптических карт.

На основе анализа синоптических карт автором диссертации совместно с научным руководителем была разработана классификация циклонов и антициклонов, оказывавших влияние на климатические условия Сибири по месту их образования и траектории движения.

Для исследования была выделена территория, ограниченная $50-70^{\circ}$ с. ш. (от Обской губы до Алтая) и $60-110^{\circ}$ в. д. (от Урала до Енисея). В выбранном районе на синоптических картах прослеживались траектории центров барических образований, их повторяемость, продолжительность, давление в центре, градиент давления за каждый срок наблюдений и вертикальная мощность барических систем. Аналогичные характеристики исследовались по картам, полученным с помощью данных реанализа NCEP/DOE AMIP II, в сумме было проанализировано 40880 карт.

Для изучения тенденций изменения температуры воздуха в исследуемом регионе проанализированы ежесуточные данные по 169 наземным метеорологическим станциям и постам, расположенным на территории Сибири за 1976-2006 гг. По суточным значениям рассчитывались средние месячные значения температуры. Так как данные в силу различных причин содержат пропуски, то расчёт средних месячных величин проводился для тех месяцев, для которых количество пропусков в данных (за месяц) не превышало 5 суток. Далее, для каждой станции по средним месячным величинам вычисляли их средние годовые значения и тренды. Тренды находили для рядов средних месячных величин с пропусками не более 2 лет на 30-летнем интервале.

Научная новизна работы:

- Разработана классификация, отражающая всё разнообразие циклонов и антициклонов барических образований, приходящих на территорию Сибири либо образующихся над ней.
- Выявлены устойчивые статистические характеристики каждого из выделенных типов барических образований, наблюдавшихся над Сибирью, и определены их изменения за период с 1976 по 2006 гг.
- Впервые получены сравнительные характеристики циклонов и антициклонов по данным анализа синоптических карт и данным реанализа NCEP/DOE AMIP II над территорией Сибири.
- Впервые определены тенденции приземной температуры воздуха, обусловленные изменением характера циркуляционных процессов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Тенденции поведения барических образований над территорией Сибири за период с 1976 по 2006 гг. характеризуются уменьшением числа, как циклонов, так и антициклонов и увеличением их продолжительности, особенно антициклонов.
2. Данные реанализа NCEP/DOE AMIP-II, хорошо отражая общую качественную картину временной изменчивости барических образований, в 1,3 раза занижают число циклонов и антициклонов и в 2 раза завышают оценку градиента давления из-за низкого пространственного разрешения.
3. Основной вклад в повышение средних годовых значений приземной температуры воздуха на территории Сибири за период с 1976 по 2006 гг. вносят температуры февраля, марта, мая и октября при активизации меридиональной

южной группы циркуляции в переходные сезоны года и усиление циклонической (при ослаблении антициклонической) активности в холодный сезон.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертационной работе результатов обусловлена применением уже апробированных другими авторами динамико-стохастических подходов к решению задач прогноза и восстановления, метеорологических полей, а также аргументированностью исходных положений, логической непротиворечивостью рассуждений, корректным использованием современного математического аппарата.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные результаты по динамике вихревой активности и её влиянию на климатические условия региона могут быть использованы для тестирования и валидации региональных климатических моделей. Результаты данной работы можно использовать для прогноза климатических изменений на территории Сибири в будущем.

Работа выполнялась в рамках программы 7.10.1. “Интегрированные исследования природно-климатических изменений и связанных с ними рисков природопользования в Сибири” и программы Президиума РАН № 16 “Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы”.

Личный вклад автора. Непосредственно автором диссертации обработаны обширные материалы приземных синоптических и высотных карт, а также карт реанализа NCEP/DOE AMIP II по характеру приземного барического поля над территорией Сибири за период 1976-2006 гг., произведена классификация барических образований, выполнены статистические расчеты. Все научные результаты были получены либо автором, либо совместно с руководителями данной диссертационной работы.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на 21 научной конференции Российского и международного уровней, таких как:

- Шестое, Седьмое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу (Томск, ИМКЭС, 2005, 2007);
- V и VI международный симпозиум “Контроль и реабилитация окружающей среды” (Томск, ИМКЭС, 2006, 2008);
- International conference on environmental observations, modeling and informational systems “Enviromis” (Томск, ИМКЭС, 2006, 2008, 2010);
- International conference and young scientists school on computational information technologies for environmental sciences “Cites” (Томск, ИМКЭС, 2007; Красноярск, СФУ, 2009);
- Всероссийская научная конференция с международным участием “Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследования” (Казань, КГУ, 2009),
- Международная конференция “Ресурсная экономика, изменение климата и рациональное природопользование – 2009” (Красноярск, СФУ, 2009).

Публикации. Основные результаты, обобщённые и систематизированные в работе, отражены в 26 научных публикациях, в том числе 2 в реферируемых журналах: “Метеорология и гидрология” и “Оптика атмосферы и океана”.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы - 141 наименований. В ней содержится 153 страницы текста, 11 таблиц, 40 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, изложены цель и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе дан краткий исторический очерк и обзор литературных источников по рассматриваемому вопросу. Изучены работы Бордовской Л.И., Цибульского А.Е. для периода 1963-1967 гг., Поповой К.И. для 1942-1961 гг. (лето) и 1942-1951 гг. (тёплый период), Кошинского С.Д. для периода 1953 – 1972 гг. (зима). Для территории Алтая изучены работы Нарожной О.В., Нарожного Ю.К. 1954-1988 гг. (холодный период), Поповой К.И., Лупиной Н.Х. для 1942-1961 гг. (тёплый период) и ряда других авторов. Приведено обоснование выбора темы и периода исследований.

Вторая глава посвящена характеристике исходных материалов и методам их обработки. Для получения климатических характеристик циклонов и антициклонов над Сибирью были использованы приземные синоптические и высотные карты. Период исследования охватывает 31-летний промежуток времени с 1976 по 2006 гг. Выбор периода исследований обусловлен тем, что с середины 70-х гг. XX века существенно изменился характер динамики климата в его взаимосвязи с процессами атмосферной циркуляции. Была выделена территория для проведения исследования от 50 до 70° с.ш. и от 60 до 110° в.д. В выбранном для исследования районе прослеживались все траектории центров барических образований, их повторяемость, давление в центре, градиент давления, число дней с циклонами и антициклонами над исследуемой территорией, вертикальная мощность барической системы, как в межгодовом ходе, так и во внутригодовом. В качестве циклона (антициклона) рассматривалась область пониженного (повышенного) давления при наличии хотя бы одной замкнутой изобары с характерной циркуляцией и структурой метеорологических полей. Давление в центре, градиент давления и вертикальная мощность приводится в гПа, а число дней с циклонами (антициклонами) в сутках.

По данным реанализа NCEP/DOE AMIP II за период 1979-2006 гг. были построены карты высоты геопотенциала по Северному полушарию. Карты строились через каждые 6 ч. в основные метеорологические сроки (00, 06, 12 и 18 ч. всв). Дальнейший анализ и обработка характеристик проводились для той же территории, что и по приземным синоптическим картам. В исследованном районе отмечалась широта, долгота, число дней с циклонами и антициклонами, вертикальная мощность, число замкнутых изобар и ряд других параметров барических образований.

Изменчивость климатических характеристик, на примере температуры воздуха, определялась с помощью данных наблюдений, полученных на 169

метеорологических станциях, расположенных в рассматриваемом регионе. Для частичного устранения неоднородности в распределении станций по территории данные наблюдений интерполировались методом объективной интерполяции Крайгинга (Cressie, 1990) в узлы сетки $1 \times 1^\circ$. При построении оценок, характеризующих пространственное распределение какой-либо величины по территории, проводилось их коррекция на площадь, вызванная тем, что при движении к северу уменьшается площадь ячейки сетки. По скорректированным значениям рассчитанных величин проводились вычисления выборочной плотности вероятности $p(x)$ с последующим расчётом выборочной функции распределения $F(x)$. Объём выборки составлял 1000 узлов. В качестве характеристики средней величины выборки использовалась оценка по медиане функции распределения $F(x)$.

Для оценки вклада циркуляции в изменения средней по территории температуры воздуха находились корреляционные связи между значениями температуры воздуха и повторяемостью барических образований, оказывающих наибольшее влияние на формирование уровня средних значений температуры этого месяца.

В третьей главе анализируются характеристики барических образований над территорией Сибири в период 1976-2006 гг. За рассмотренный период над Сибирью отмечено 1420 циклонов и 1198 антициклонов. Общее число циклонов за год колеблется от 33 (2005 г.) до 71 (2003 г.), а антициклонов от 21 (2006 г.) до 66 (1995 г.) (рис. 1). Среднее число циклонов в год составляет 46, антициклонов 39.

Поскольку над Западной Сибирью наблюдается почти вдвое больше циклонов, чем над ЕТС (Хромов, 1960), и в четыре раза больше, чем над Средней Азией (Романов, 1956), то исследование динамики циклонической (антициклонической) активности может быть результативным для объяснения наблюдаемых над данной территорией климатических тенденций.

В сложном внутригодовом ходе повторяемости циклонов выделяется максимум в мае и хорошо выраженный минимум в июле, а во внутригодовом ходе повторяемости антициклонов максимум наблюдался в апреле, минимум в декабре. Июльский минимум в межгодовом ходе циклонов объясняется частым повторением в этом месяце синоптических ситуаций, определяемых малоградиентным полем. Весенний максимум в межгодовом ходе антициклонов связан с активной деятельностью Азиатского антициклона и частым проявлением приземного антициклогенеза в районе Урала.

Наибольшее число циклонов, как и антициклонов, зарегистрировано в весенние месяцы, а наименьшее – в зимние. Зимой над исследуемой территорией господствует сезонный центр действия атмосферы – Азиатский максимум и, как следствие этого, происходит стационарирование антициклонов.

При рассмотрении межгодового хода давления в центрах барических образований установлено, что во второй половине рассматриваемого периода давление в центрах циклонов и антициклонов несколько ниже, чем в первой половине (рис. 2). Это говорит о том, что к концу исследуемого периода циклоны стали более глубокими, а антициклоны менее интенсивными.



Рис. 1. Число циклонов и антициклонов над Сибирью в 1976-2006 гг.

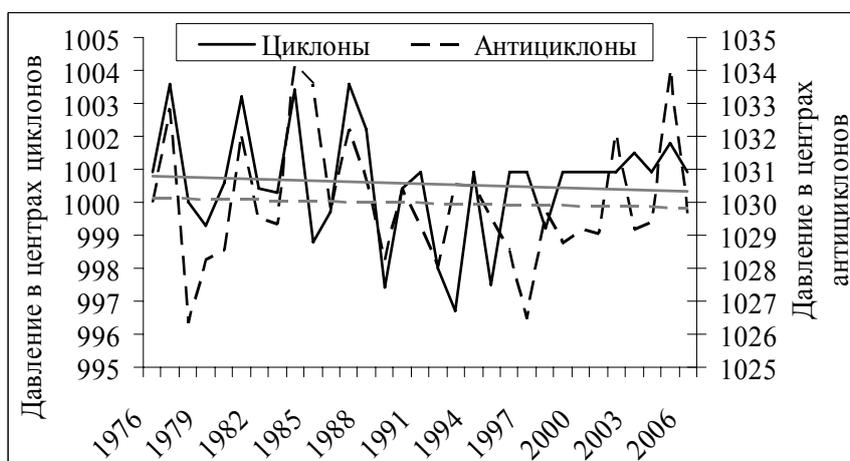


Рис. 2. Среднее давление в центрах циклонов и антициклонов (гПа)

Минимальное давление в центрах отмечалось для западных циклонов I типа смещающихся вдоль 60-65 параллели – 984,5 гПа, а максимальное для местных циклонов VI типа – 1022,1 гПа. В межгодовом распределении рост давления наблюдается в центрах практически всех типов циклонов, за исключением южных и местных циклонов (V, VI типы). Минимальное давление в центрах отмечалось для западных антициклонов XI типа – 1018,9 гПа, а максимальное для юго-восточных антициклонов VIII типа – 1045,0 гПа. В межгодовой динамике давление в центрах антициклонов ведёт себя по-разному, например, в юго-восточных и юго-западных антициклонах (VIII и XII типы) оно растёт к концу исследуемого периода, а в северных, северо-западных и западных антициклонах (IX, X, XI типы) наоборот, падает.

Были проанализированы данные о числе дней с циклонами и антициклонами над исследуемой территорией. Было получено, что среднее число дней с циклонами составляет 7,4 суток, а с антициклонами 11,3 суток (рис. 3)



Рис. 3. Среднее число дней с циклонами и антициклонами

В процессе анализа циклонической и антициклональной активности было замечено, что характеристики барических образований и характер их влияния на исследуемую территорию существенно отличаются в зависимости от места их зарождения и траектории движения на территорию Сибири. В связи с этим все барические образования, приходящие на территорию или образующиеся над ней, были разделены на семь типов циклонов и пять типов антициклонов (рис. 4).

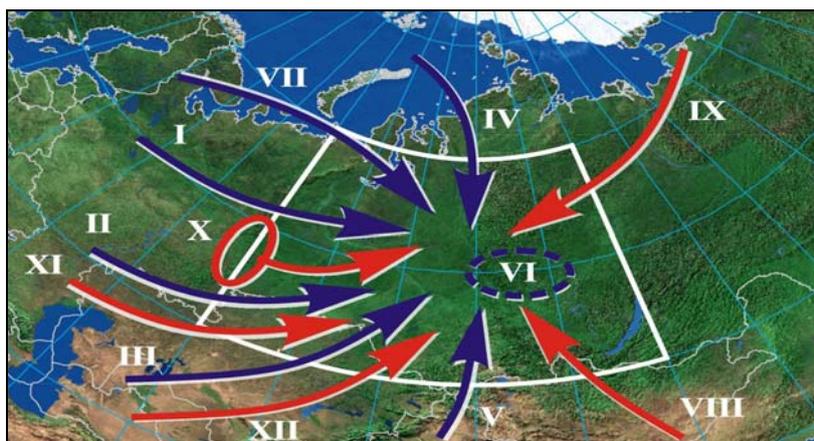


Рис. 4. Карта-схема траекторий движения циклонов и антициклонов, пришедших на территорию Сибири и образывавшихся над ней (I-VII – тип циклона; VIII-XII – тип антициклона; пунктирная область – область образования местных циклонов; область на западе изучаемой территории – область стационарирования антициклонов X типа)

Выделенные типы барических образований были исследованы по таким характеристикам как: давление в центре ($P_{ц}$), градиент давления в радиусе 1000 км (L , гПа), частота выхода (число барических образований – n), число дней с циклонами и антициклонами над исследуемой территорией (t , сутки), вертикальная мощность барической системы (H , гПа) и месяц в котором преобладал тот или иной тип барических образований (табл.1, 2).

Таблица 1

Среднегодовые параметры циклонов и их стандартные отклонения, влиявшие на климатические особенности Сибири в 1976-2006 гг.

Параметры циклонов	Тип циклонов						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
n	3,0/1,5	6,8/2,8	5,6/2,8	8,5/3,7	5,8/3,4	4,5/2,8	11,7/5,0
P _ц , гПа	996/6,8	1001/4,3	1002/3,5	996/3,7	1004/2,8	1013/5,6	994/4,2
t, сутки	5,5/0,5	6,9/1,0	5,4/1,1	6,3/1,7	4,7/1,6	2,9/0,4	8,4/3,9
L, гПа	6,9/2,7	6,4/2,6	6,7/2,6	7,3/1,9	5,6/1,6	4,1/1,6	7,7/1,8
H, гПа	300	300	300	300	500	700	300
Месяц	март	апрель	май	декабрь	август	февраль	ноябрь

Примечание: через / приведено стандартное отклонение σ .

Таблица 2

Среднегодовые параметры антициклонов и их стандартные отклонения, влиявшие на климатические особенности Сибири в 1976-2006 гг.

Параметры антициклонов	Тип антициклонов				
	VIII	IX	X	XI	XII
n	10,0/3,5	8,2/3,0	3,7/2,4	10,1/3,8	6,7/5,2
P _ц , гПа	1035/4,2	1028/2,9	1030/4,9	1028/3,4	1029/4,6
t, сутки	8,9/5,0	8,2/2,9	9,3/1,7	9,7/1,8	7,4/1,5
L, гПа	6,3/2,3	3,7/1,2	3,0/1,4	3,4/1,3	3,2/1,4
H, гПа	500	300	300	300	500
Месяц	январь	июнь	сентябрь	май	октябрь

Примечание: через / приведено стандартное отклонение σ .

При рассмотрении продолжительности нахождения циклонов и антициклонов на исследуемой территории обнаружено, что циклоны оказывают влияние на исследуемую территорию, в среднем, в течение 1,5-5,5 суток, а антициклоны 2-6,5 суток.

Наибольший градиент давления имеют циклоны северной группы, смещающиеся как из северных районов Западной Сибири на юг (IV тип) (7,3 гПа), так и из района Кольского полуострова (VII тип) (7,7 гПа). Наименьший градиент давления имеют местные циклоны, образующиеся в районе междуречья Обь-Иртыш и на юге Западной Сибири (VI тип) (4,1 гПа). Наибольший градиент давления имеют антициклоны с центром над Тувой, Алтаем, Монголией (VIII тип) (6,3 гПа), а наименьший – антициклоны с центром над Уралом (X тип) (3,0 гПа).

Осенью градиент давления в циклонах наибольший, летом – наименьший. Градиент давления антициклонов, в свою очередь, максимален зимой, минимален летом, в переходные сезоны года отмечены незначительные колебания.

Поскольку градиент давления между периферией и центром барических образований увеличивается к концу исследуемого периода, то над Сибирью можно ожидать увеличения значений скорости ветра. Именно это и было отмечено в

работах других авторов, выполнявших исследования для Атлантического и Тихоокеанского секторов (Гущина, 2008), а так же для всего Северного полушария (Paciorek, 2002).

Все выделенные типы барических образований имеют существенные различия хотя бы по одному из анализируемых признаков и, зачастую, выходят на исследуемую территорию в разные месяцы года. Следовательно, их воздействие на территорию Сибири различно и наличие существенных изменений в динамике хотя бы одного типа может вызвать изменение в климатических характеристиках исследуемой территории. Например, циклоны первого типа чаще выходят на территорию Сибири в марте (табл. 3), второго – в апреле, третьего – в мае, четвертого – в декабре, пятого – в августе, шестого – в феврале, а седьмого – в ноябре. Антициклоны восьмого типа чаще выходят на исследуемую территорию в январе, девятого – в июне, десятого – в сентябре, одиннадцатого – в мае, а двенадцатого – в октябре.

Таблица 3

Среднее число циклонов и антициклонов в разные месяцы года

Типы барических образований	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Zn I типа	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,2
Zn II типа	0,4	0,6	0,5	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,5	0,5	0,6
Zn III типа	0,4	0,3	0,3	0,7	0,8	0,4	0,4	0,7	0,4	0,4	0,3	0,5
Zn IV типа	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,9
Zn V типа	0,1	0,3	0,4	0,4	0,6	0,6	0,9	0,9	0,4	0,4	0,5	0,2
Zn VI типа	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,4	0,3	0,5	0,4	0,2	0,3	0,4
Zn VII типа	1,4	1,1	1,3	0,8	1,0	0,7	0,3	0,6	0,8	1,2	1,5	1,1
Azn VIII типа	1,3	1,0	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2	0,8	1,0	0,9	1,2
Azn IX типа	0,4	0,4	0,6	1,0	1,1	1,2	1,0	0,6	0,6	0,3	0,5	0,3
Azn X типа	0,1	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,7	0,6	0,2	0,2	0,1
Azn XI типа	0,6	0,6	0,9	0,9	1,1	0,7	0,7	0,5	0,9	1,0	0,8	0,6
Azn XII типа	0,5	0,6	0,6	0,8	0,6	0,6	0,3	0,9	0,6	0,8	0,6	0,4

Примечание: Zn – циклоны; Azn – антициклоны

Практически на протяжении всего года над исследуемой территорией господствуют циклоны, приходящие из района Кольского полуострова (VII тип), исключение составляет лето, когда преобладают южные циклоны (V тип). Для антициклонов картина более разнообразная. Так зимой и осенью господствует Азиатский антициклон (VIII тип), антициклоны выходящие с ЕТР преобладают в переходные сезоны года (XI тип), а летом наибольшее число антициклонов приходит из району Арктики (IX тип) (табл. 4).

Таблица 4

Число барических образований наблюдавшихся в различные сезоны года

Типы Zn	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Zn I типа	20	32	15	26	93
Zn II типа	47	58	57	49	211
Zn III типа	37	58	45	34	174
Zn IV типа	71	72	47	69	259
Zn V типа	20	42	75	41	178
Zn VI типа	39	37	36	26	138
Zn VII типа	113	96	50	108	367
Сумма	347	395	325	353	1420
Типы Azn	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Azn VIII типа	107	70	45	86	308
Azn IX типа	34	83	96	40	253
Azn X типа	13	36	35	32	116
Azn XI типа	51	93	79	86	309
Azn XII типа	44	61	44	60	209
Сумма	249	343	299	304	1195

Примечание: Zn – циклон, Azn – антициклон.

Для циклонов и антициклонов были проанализированы шесть основных траекторий движения на исследуемую территорию: с юго-запада, запада, северо-запада, юга, севера и с юго-востока (табл. 5).

Таблица 5

Среднее число барических образований, приходивших на территорию Сибири по различным траекториям (1976-2006 гг.)

Сезон	С-Ю		ЮВ-СЗ		Ю-С		ЮЗ-СВ		З-В		СЗ-ЮВ	
	Zn	Azn	Zn	Azn	Zn	Azn	Zn	Azn	Zn	Azn	Zn	Azn
Зима	2,3	1,1	-	3,5	0,6	-	1,2	1,4	2,1	1,6	3,6	0,4
Весна	2,3	2,7	-	2,3	1,4	-	1,9	2,0	2,9	3,0	3,1	1,2
Лето	1,5	3,1	-	1,5	2,4	-	1,5	1,4	2,3	2,5	1,6	1,1
Осень	2,2	1,3	-	2,8	1,3	-	1,1	1,9	2,4	2,8	3,5	1,0

Из таблицы 4 следует, что в рассматриваемый период исследований преобладали циклоны, перемещающиеся на Сибирь по северным траекториям движения (44% от общего числа), а антициклоны – по южной (43%). Наименьшее число циклонов и антициклонов характеризовалось западной траекторией движения (21% и 26% соответственно). Наибольшее количество, как циклонов, так и антициклонов, наблюдалось в весенний период, наименьшее в зимний.

Четвёртая глава посвящена сравнению характеристик циклонов и антициклонов, определявших климатические условия Сибири в 1976-2006 гг. по данным анализа синоптических карт и карт, полученных с помощью реанализа. Результаты сравнения представлены на рисунке 5.

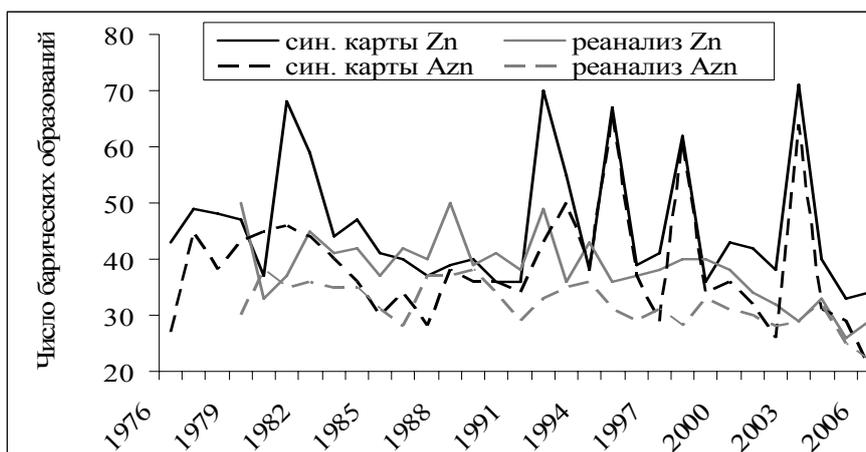


Рис. 5. Число циклонов и антициклонов над Сибирью по данным синоптических карт и карт полученных с помощью реанализа

Очевидно, что число, как циклонов, так и антициклонов по материалам синоптических карт превышает в среднем в 1,3 раза число барических образований по данным реанализа. Среднее годовое число циклонов за исследуемый период по синоптическим картам равно 46 (стандартное отклонение $\sigma = 11$), по данным реанализа 38 ($\sigma = 6$); а для антициклонов 39 ($\sigma = 11$) и 32 ($\sigma = 4$) соответственно. При наличии несовпадений числа циклонов и антициклонов, полученных в результате двух видов анализа, их изменчивость на всем интервале имеет однонаправленные тенденции.

Во внутригодовом ходе повторяемости циклонов, проходивших над территорией Сибири, максимум наблюдался весной (май) как по данным реанализа, так и по данным синоптических карт; минимум - зимой (февраль) по данным реанализа и летом (июль) по данным синоптических карт. Максимум антициклонов отмечается весной (май) по данным реанализа, (апрель) по данным синоптических карт; минимум - зимой (декабрь) как по данным реанализа, так и по данным приземных синоптических карт (рис. 6).

Коэффициенты корреляции между числом циклонов и антициклонов по данным реанализа и приземных синоптических карт составляют 0,7 и 0,9 соответственно и значимы с вероятностью не менее 95%.

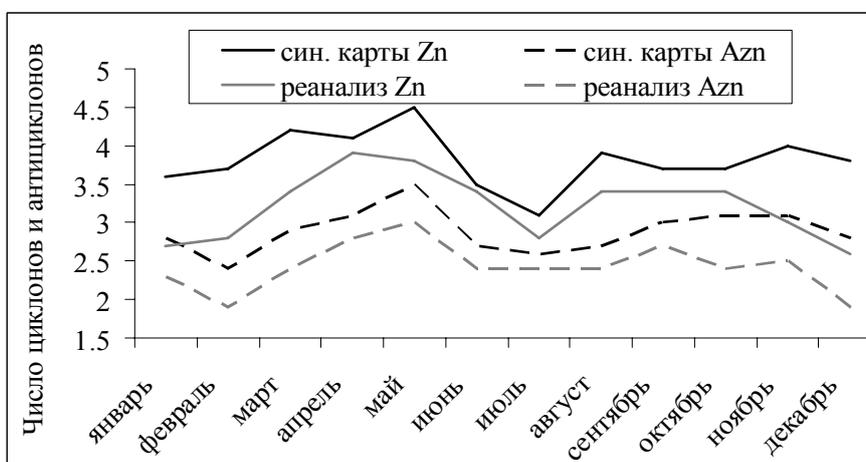


Рис. 6. Средняя месячная повторяемость циклонов и антициклонов над Сибирью за период 1976-2006 гг. по данным синоптических карт и реанализа

В сезонном распределении числа циклонов просматривается отчетливый годовой ход с ярко выраженным максимумом в весенний период и минимумом в летний период, у антициклонов максимум – в весенний период, а минимум – в зимний.

Сравнение градиентов давления в радиусе 1000 км от центра циклонов и антициклонов представлено на рис. 7.

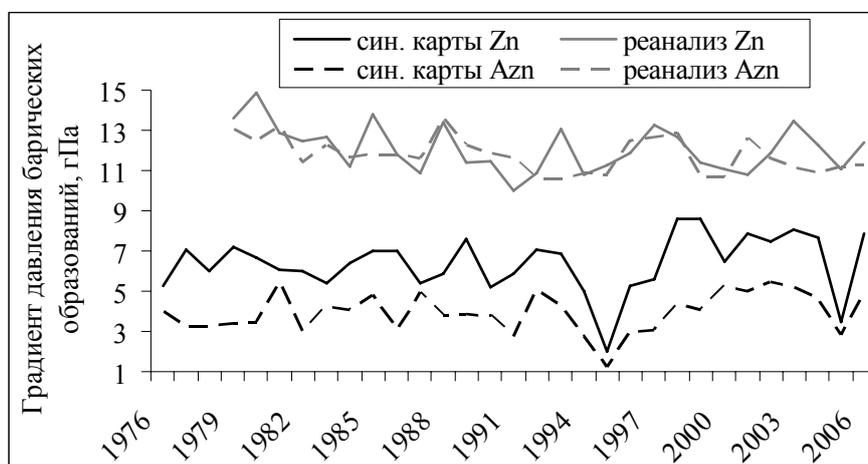


Рис. 7. Градиент давления циклонов и антициклонов над Сибирью по данным синоптических карт и реанализа

Получено, что средняя величина градиента давления циклонов по материалам синоптических карт равна 6,4 гПа ($\sigma = 1,4$), антициклонов - 3,9 гПа ($\sigma = 1,0$); а по данным реанализа он равен 12,1 гПа ($\sigma = 1,2$) для циклонов, и 11,8 гПа ($\sigma = 0,9$) для антициклонов. Данный факт ещё раз подтверждает вывод о том, что в реанализе лучше воспроизводятся более крупные барические образования с большим градиентом давления, а так как местные барические образования, как правило, имеют меньшую интенсивность и геометрические размеры, они плохо учитываются реанализом.

Среднее многолетнее число дней с циклонами по данным синоптических карт составляет 7,4 суток ($\sigma = 1,9$), а по данным реанализа 6,9 суток ($\sigma = 1,8$). Число дней с антициклонами 11,3 суток ($\sigma = 3,5$) и 9,2 суток ($\sigma = 1,6$) соответственно.

Среднее годовое число дней с циклонами меньше, чем с антициклонами. В то же время определена отчетливая тенденция к увеличению числа дней с антициклонами над Сибирью к концу исследуемого периода (рис. 3). Тренд увеличения числа дней с антициклонами на территории Сибири обнаруживается как по данным синоптических карт региона, так и по результатам реанализа.

В пятой главе проводится сопоставление характеристик циклонов и антициклонов с температурой воздуха, т.е. анализируются связи средних по территории приземной температуры воздуха с характеристиками вихревых циркуляционных процессов, определявших климатические условия Сибири.

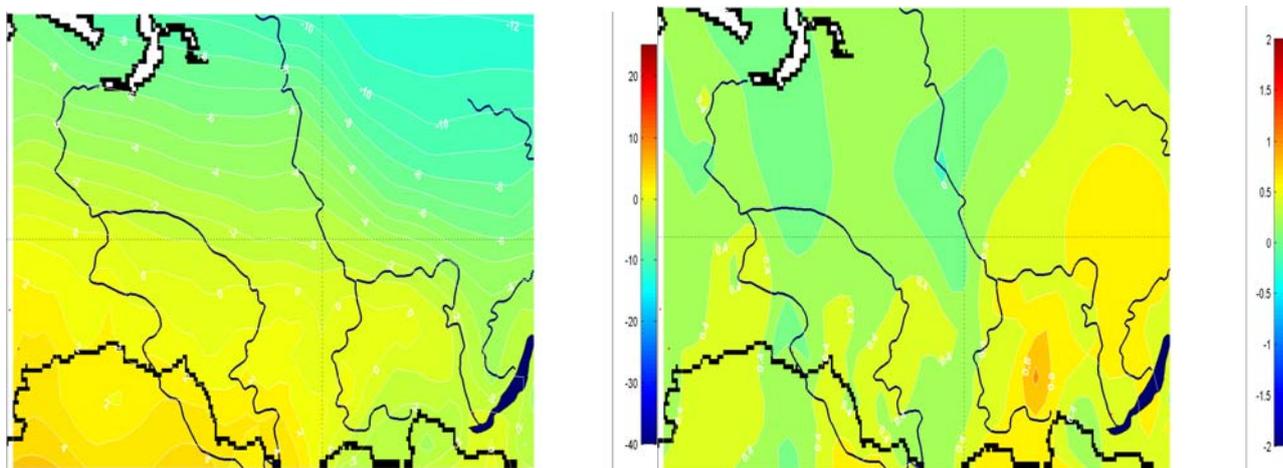


Рис. 8. Среднее годовое распределение температуры воздуха (слева) и её трендов (справа) на территории Сибири за 1976-2006 гг.

Положительные тренды средних годовых температур (рис. 8) присущи практически всей рассматриваемой территории, значение среднего по территории тренда составляет $0,36^{\circ}\text{C}/10$ лет, следовательно, в среднем, за 1976-2006 гг. температура приземного воздуха повысилась на $1,1^{\circ}\text{C}$. Давление воздуха при этом снижалось со средней скоростью $0,18$ гПа/10 лет (табл. 5). Это говорит о том, что потепление над территорией Сибири обусловлено либо ослаблением антициклонической активности, либо усилением циклонической, либо оба фактора действуют одновременно. Истину можно установить с помощью детального исследования трендов температуры воздуха и давления за отдельные месяцы года.

Внутригодовые характеристики полей температуры воздуха и давления представлены в таблице 5. В таблице приведены усреднённые по площади и по временному интервалу значения температуры каждого месяца года, их дисперсии и значения линейных трендов температуры и их дисперсий. Те же параметры представлены и для давления воздуха у поверхности Земли. Как видно из таблицы 5 наибольшие значимые тренды потепления имеют место в феврале, марте, мае и октябре. При этом в феврале и марте наблюдаются наибольшие отрицательные тренды давления воздуха. Таким образом, повышение температуры воздуха в феврале и марте месяцах над Сибирью может быть обусловлено усилением циклонической деятельности, либо ослаблением антициклонической. Рост температуры воздуха в другие месяцы связан не столь очевидно с общим фоном давления воздуха и требует более подробных исследований.

В главе подробно рассмотрены особенности циркуляционного режима атмосферы Сибири в месяцы с наиболее выраженными (и значимыми) трендами повышения средней месячной температуры воздуха.

Таблица 5

Внутригодовые характеристики полей температуры воздуха (°С) и давления (гПа) над Сибирью в 1976-2006 гг.

Месяцы	характеристики температуры воздуха				характеристики давления воздуха			
	\bar{T}	σ	\bar{T}_{tr}	σ_{tr}	\bar{P}	σ	\bar{P}_{tr}	σ_{tr}
Январь	-22,23	5,86	0,19	0,53	1024,6	7,00	-0,46	0,29
Февраль	-19,71	5,30	0,83	0,50	1024,1	5,61	-0,82	0,42
Март	-10,79	4,94	0,77	0,34	1021,2	3,97	-0,88	0,73
Апрель	-1,83	5,28	-0,01	0,41	1016,3	2,50	-0,34	0,47
Май	6,64	4,66	0,73	0,27	1012,9	1,94	-0,01	0,56
Июнь	14,23	3,13	0,30	0,25	1008,9	1,22	-0,53	0,19
Июль	17,52	1,99	0,29	0,30	1007,6	1,57	0,12	0,24
Август	14,09	0,91	0,21	0,28	1009,8	1,54	0,17	0,26
Сентябрь	6,94	2,17	0,01	0,16	1014,3	2,68	-0,11	0,44
Октябрь	-1,68	3,64	0,60	0,30	1016,5	4,83	0,02	0,76
Ноябрь	-12,47	5,40	-0,26	0,51	1020,9	5,29	0,80	0,94
Декабрь	-19,38	5,64	0,04	0,32	1022,2	7,15	0,80	0,73
Год	-2,70	4,07	0,36	0,18	1016,7	3,40	-0,18	0,16

Климатические условия в феврале и марте вообще и температуру воздуха в частности, чаще всего, определяют антициклоны VIII типа, выходящие из районов Алтая, Тувы, Монголии (т. н. Сибирский или Азиатский антициклон) - 36% от общего числа антициклонов в феврале и 28% от общего числа антициклонов в марте. А так же циклоны, приходящие на исследуемую территорию из районов Кольского полуострова (VII тип) которые составляют 30% от их общего числа и в феврале и в марте. Получено, что температура февраля и марта повысилась к концу исследуемого периода как за счет ослабления антициклонической активности (понижения давления в центре антициклона), так и участвовавших на исследуемую территорию вторжений циклонов.

На повышение температуры воздуха в мае оказывают влияние следующие факторы: увеличивается общее число дней с антициклонами, а, следовательно, увеличивается продолжительность безоблачной погоды, и воздух успевает прогреваться. Наличие этой тенденции усугубляет увеличивающееся число дней с влиянием отрогов Азорского антициклона (XI тип и XII тип), обеспечивающих, наряду с радиационным фактором, адвективный, а именно, выход на территорию Сибири теплых воздушных масс с Казахстана и более южных территорий (рис. 9).

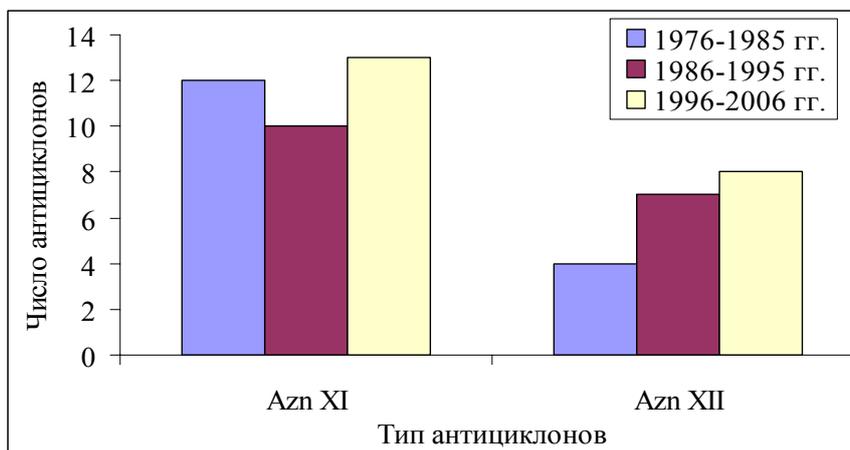


Рис. 9 – Межгодовое распределение среднего числа дней с антициклонами различных типов над Сибирью в мае в разные десятилетия

В октябре климатические условия Сибири определяют циклоны, которые приходят на исследуемую территорию чаще всего из районов Кольского полуострова (VII тип – 33% от общего числа) и циклоны, продвигающиеся вдоль побережья Северного Ледовитого океана (IV тип – 20%). Антициклоны выходят, преимущественно, с Европейской территории России (XI тип – 31%), и Причерноморья (XII тип – 31%). В октябре к концу исследуемого периода сформировался устойчивый и значимый положительный тренд на увеличение числа дней с антициклонами (рис. 10). Особенно сильно увеличилась продолжительность влияния антициклонов VIII, IX и X типов, с центрами над Алтаем, Арктикой и Уралом.

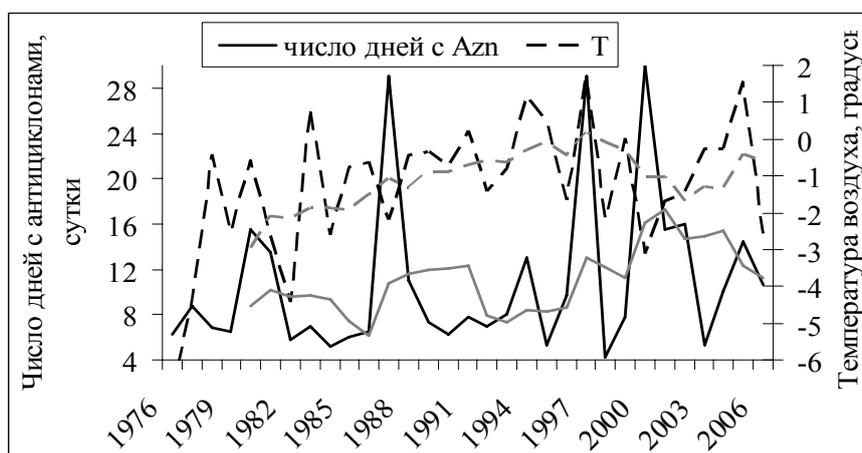


Рис. 10 – Приземная температура воздуха (Т) и число дней с антициклонами в октябре над Сибирью и их скользящие средние значения

Что касается циклонов, то заметно уменьшилось число дней с западными и северными циклонами II и IV типов, но при этом (с конца 80-х годов) увеличилось число дней с юго-западными циклонами III типа, приносящими на исследуемую территорию тепло. Активация этих процессов увеличила долю адвективного фактора в повышении средних значений температуры воздуха. Следовательно,

температура воздуха в октябре повышается как за счет радиационного, так и адвективного факторов.

Получено, что повышение средних значений температуры воздуха над Сибирью в мае и в октябре, происходит в результате усиления как радиационного фактора (увеличения продолжительности влияния на территорию антициклонической погоды), так и адвективного (затока воздуха из южных широт).

Таким образом, повышение температуры над территорией Сибири связано с выбросами в атмосферу парниковых газов, а так же с местными циркуляционными условиями, рассмотренными выше.

Опираясь на собственные исследования и на результаты работы других авторов (Бышев В.И., Кононова Н.К., и др., 2002), было проведено сравнение общего числа циклонов, приходивших на территорию Сибири в разные годы, с числом тропических циклонов, образовавшихся в Северном полушарии. Особый интерес для Сибири представляют северные и южные циклоны, так как они оказывают наибольшее охлаждающее или обогревающее действие на исследуемую территорию.

В результате сравнения получено, число циклонов, приходящих на Сибирь по северным траекториям, находится в противофазе с числом тропических циклонов, образующихся над Северным полушарием, а число циклонов, приходящих по южным траекториям, имеет согласованный ход. Активный тропический циклогенез оказывает существенное влияние на циркуляционные процессы умеренных широт и является звеном общей циркуляции атмосферы. Полученный результат позволяет предполагать, что и повышенная циклоническая активность северной группы циклонов, наблюдавшаяся в зимние месяцы исследуемого периода, и повышенная активность барических образований южных групп в переходные сезоны года, были звеньями в цепи колебаний общей планетарной атмосферной циркуляции.

В заключении по результатам работы были сделаны следующие выводы.

1. Всё разнообразие барических образований, оказывавших влияние на климатические условия Сибири, по месту их образования и траектории движения делится на семь типов циклонов и пять типов антициклонов.
2. Ежегодное число барических образований, определяющих климатические условия Сибири, варьирует в широких пределах. Число циклонов изменяется в пределах 33-71, антициклонов 21-66. В отдельные годы их число различается в 1,5 раза.

Характерное число дней с циклонами составляет 2,9 суток, а число дней с антициклонами 2,4 суток. К концу исследуемого периода барические образования стали более продолжительные. Наибольшее число, как циклонов, так и антициклонов, наблюдалось в весенний период, наименьшее в зимний период.

К концу исследуемого периода циклоны стали более глубокими, а антициклоны менее интенсивными. Наибольший градиент давления, из выделенных нами типов, имеют циклоны северных типов и антициклоны южных. Наименьший градиент давления имеют местные циклоны и северные антициклоны. Наибольший градиент давления циклоны имеют в октябре $8,0 \pm 2,8$ гПа, а наименьший в июле $4,2 \pm 1,6$ гПа, а антициклоны в феврале $7,3 \pm 3,8$ гПа и августе $2,3 \pm 1,2$ гПа соответственно.

На протяжении всего периода исследований преобладали циклоны, перемещающиеся на Сибирь по северным траекториям движения (44% от общего числа), а антициклоны по южным (43%). Наименьшим числом циклонов и

антициклонов характеризовались западные траектории движения (21% и 26% соответственно).

3. Реанализ достаточно хорошо отражает качественную картину временной изменчивости в повторяемости барических образований, но обнаружены некоторые количественные различия:

- число циклонов и антициклонов, выявленное по приземным синоптическим картам, превышает их число по данным реанализа в 1,3 раза;
- средняя величина градиента давления барических образований по приземным синоптическим картам в два раза меньше, чем по данным реанализа;
- отмечено увеличение числа дней с антициклонами над Сибирью к концу исследуемого периода по данным обоих анализов.

4. Наибольшее повышение средней температуры воздуха над Сибирью происходит в основном за счёт февраля, марта, мая и октября месяцев:

- в феврале и марте данная тенденция обусловлена увеличением числа дней с циклонами;
- в мае и в октябре - усилением радиационного (увеличением числа дней с антициклонической погодой), и адвективного (затоком воздуха из южных широт) факторов.

5. Процессы активизации меридиональной южной группы циркуляции, обнаруженные во второй половине XX века в Северном полушарии, над территорией Сибири наиболее заметное влияние оказали в переходные сезоны года, а именно в мае и октябре месяцах. В исследуемом нами регионе именно они определили наличие положительных трендов в рядах температуры воздуха в эти месяцы и тем самым усилили среднегодовой положительный тренд температуры воздуха, обеспеченный снижением активности Сибирского антициклона зимой.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Поднебесных Н.В. Циркуляция атмосферы над Западной Сибирью в 1976-2004 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. № 5. С. 28-36.
2. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Логинов С.В., Поднебесных Н.В. Исследование циклонической и антициклонической активности на территории Западной Сибири по данным реанализа NCEP/DOE AMIP-II и синоптических карт // Оптика атмосферы и океана. 2009. № 1. С. 38-41.
3. Поднебесных Н.В., Рыбина Н.П. Изменение агроклиматических условий на фоне особенностей циркуляционных процессов юго-востока Западной Сибири // XLIII Международная научная студенческая конференция “Студент и научно-технический прогресс”. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2005. С. 126-128.
4. Поднебесных Н.В. Динамика повторяемости барических образований различного генезиса над территорией Западной Сибири // III Всероссийская научная молодёжная конференция “Под знаком Σ ”. Омск: Изд. СО РАН, 2005. С. 198-199.
5. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Дюкарев Е.А., Поднебесных Н.В. Интегральные характеристики ветра в тропосфере над Западной Сибирью //

Шестое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Томск: Изд. СО РАН, 2005. С. 12-16.

6. Горбатенко В.П., Поднебесных Н.В. Динамика повторяемости антициклонических вихрей над Западной Сибирью // Шестое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Томск: Изд. СО РАН, 2005. С. 16-19.

7. Горбатенко В.П., Поднебесных Н.В. Динамика повторяемости циклонических вихрей над Западной Сибирью // Шестое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Томск: Изд. СО РАН, 2005. С. 19-23.

8. Поднебесных Н.В., Рыбина Н.П. Изменение агроклиматических ресурсов юго-востока Западной Сибири как следствие общего изменения климата // VII Всероссийский студенческий научно-технический семинар “Энергетика: экология, надёжность, безопасность”. Томск: Изд. ТПУ, 2005. С. 301-303.

9. Поднебесных Н.В. Характеристика барических образований, определявших погоду над Западной Сибирью в период 1991-2000 гг. // IV Всероссийская молодёжная школа-семинар “Теоретические и прикладные вопросы современной географии”. Томск: Изд. ТГУ, 2005. С. 149-150.

10. Поднебесных Н.В. Повторяемость циклонов и антициклонов над Западной Сибирью за период 1991-2000 гг. // IX Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых учёных “Наука и образование”. Томск: Изд. Томского государственного педагогического университета, 2005. С. 184-189.

11. Поднебесных Н.В. Повторяемость барических образований различного генезиса над Западной Сибирью // Шестая Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых учёных “Энергия молодых – экономике России”. Томск: Изд. Томского политехнического университета, 2005. С. 392-393.

12. Поднебесных Н.В., Седляр М.И., Горбатенко В.П. Сравнение интенсивности барических образований, определяющих погоду Западной Сибири // V Международный симпозиум “Контроль и реабилитация окружающей среды”. Томск. 2006. С. 91-93.

13. Podnebesnyh N.V., Ippolitov I.I., Gorbatenko V.P. Large-scale atmosphere circulation over Western Siberia // International conference on environmental observations, modeling and informational systems “Enviromis”. Tomsk: Izd-vo FGU. 2006, pp. 146.

14. Поднебесных Н.В., Ипполитов И.И., Горбатенко В.П. Крупномасштабная циркуляция атмосферы над Западной Сибирью / Под общей редакцией проф. Е.П. Гордова. – Томск: Издательство Томского ТНЦИ, 2006. С. 76-79.

15. Поднебесных Н.В., Седляр М.И. Интенсивность барических образований над Западной Сибирью // X Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых учёных “Наука и образование”. Томск: Изд. Томского государственного педагогического университета, 2006. С. 183-187.

16. Podnebesnyh N.V., Ippolitov I.I., Gorbatenko V.P. Dynamic characteristics of cyclonic and anticyclonic activity above the Western Siberia // International conference and young scientists school on computational information technologies for environmental sciences “Cites”. Tomsk: Izd-vo FGU. 2007. P. 77.

17. Поднебесных Н.В., Горбатенко В.П., Ипполитов И.И. Циркуляционный режим атмосферы над территорией Западной Сибири // Седьмое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Томск: Изд. СО РАН, 2007. С. 40-42.
18. Поднебесных Н.В., Алексеева Н.С. Внутригодовая изменчивость повторяемости барических образований над территорией Западной Сибири // XI Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых учёных “Наука и образование”. Томск: Изд. Томского государственного педагогического университета, 2007. С. 64-68.
19. Podnebesnykh N.V., Ippolitov I.I., Loginov S.V. The comparative analysis of baric formations dynamics above Western Siberia: observations and reanalysis data // International conference on environmental observations, modeling and informational systems “Enviromis”. Tomsk: Izd-vo FGU. 2008. P. 88-89.
20. Поднебесных Н.В., Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Логинов С.В. Исследование циклонической и антициклонической активности на территории Западной Сибири по данным наблюдений и реанализа NCEP/DOE AMIP-II // VI Международный симпозиум “Контроль и реабилитация окружающей среды”. Томск. 2008. С. 225-227.
21. Поднебесных Н.В. Крупномасштабная циркуляция над Западной Сибирью по данным реанализа NCEP/DOE AMIP-II и данным приземных синоптических карт // Всероссийская конференция “Теоретические и прикладные вопросы современной географии”. Томск: Изд. ТГУ, 2009. С. 325-326.
22. Поднебесных Н.В. Исследование динамики крупномасштабной циркуляции над территорией Западной Сибири по данным приземных синоптических карт и данным реанализа NCEP/DOE AMIP II // Всероссийская научная конференция с международным участием “Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследования”. Казань. 2009. С. 182-185.
23. Поднебесных Н.В. Связь изменений крупномасштабной атмосферной циркуляции с изменениями климата над Западной Сибирью // Международная конференция “Ресурсная экономика, изменение климата и рациональное природопользование – 2009”. Красноярск. 2009. С. 861-870.
24. Podnebesnyh N.V., Ippolitov I.I., Gorbatenko V.P. Climatology of vortex activity at Western Siberia in 1976-2006 // International conference and young scientists school on computational information technologies for environmental sciences “Cites”. Krasnoyarsk. 2009. P. 76.
25. Поднебесных Н.В. О связи приземной температуры воздуха с вихревой деятельностью над Западной Сибирью в 1976-2006 гг. // IV Всероссийская конференция молодых учёных “Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии”. Томск: Изд. Института оптики атмосферы СО РАН, 2009. С. 469-472.
26. Ippolitov I.I., Gorbatenko V.P., Kabanov M.V., Loginov S.V., Podnebesnyh N.V. Influence of atmospheric circulation on the temperature regime of Siberia at the time of current global warming // International conference on environmental observations, modeling and informational systems “Enviromis”. Tomsk: Izd-vo FGU. 2010, pp. 21-22.