

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Российский государственный гидрометеорологический университет»

На правах рукописи
УДК 551.513.11 (551.583)

Савенкова Елена Николаевна

**ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СРОКИ ВЕСЕННЕЙ
ПЕРЕСТРОЙКИ ЦИРКУЛЯЦИИ СТРАТОСФЕРЫ**

25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Погорельцев Александр Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Троицкий Борис Владимирович
старший научный сотрудник Военно-космической
академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-
Петербург

кандидат физико-математических наук
Перминов Владимир Иванович
старший научный сотрудник Института физики
атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный
университет

Защита состоится « 16 » мая 2013 г. в 15 часов 30 минут
на заседании диссертационного совета Д.212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу:
195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д.98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан «15» апреля 2013 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д.212.197.01

доктор географических наук, профессор



Л.В. Кашлева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Изучение динамических процессов, протекающих на различных высотах атмосферы Земли, и их взаимодействия является одной из важнейших фундаментальных задач метеорологии в общем и физики атмосферы в частности. В последние десятилетия, благодаря интенсивному развитию наземных и аэрокосмических систем наблюдения, накоплен огромный объем данных измерений, касающихся тепловой структуры, газового состава и динамических характеристик атмосферы. Ассимиляция этих данных в моделях общей циркуляции атмосферы (таких, как NCEP/NCAR, ECMWF, UK Met Office) позволила создать архивы глобальных распределений метеорологических параметров, которые доступны для анализа. Результаты обработки данных, ассимилированных в указанных моделях, свидетельствуют о постоянном присутствии в атмосфере Земли волновых возмущений глобального масштаба (планетарных волн). Стационарные планетарные волны (СПВ) возникают в тропосфере вследствие крупномасштабных неоднородностей рельефа и различий в нагреве поверхности суши и океана. До последнего времени считалось, что только тропосфера оказывает существенное влияние на имеющую значительно меньшую плотность стратосферу за счет распространения СПВ снизу вверх. В последние годы на основе анализа данных наблюдений и результатов модельных расчетов установлено, что изменчивость циркуляции стратосферы оказывает существенное влияние на условия распространения и отражения СПВ [Chen and Robinson, 1992; Perlwitz and Harnik, 2003]. Отраженные от стратосферы СПВ могут достигать высот тропосферы, трансформироваться в результате нелинейных взаимодействий и/или фокусировки трехмерного потока волновой активности в волны меньшего масштаба и оказывать влияние на формирование погодных условий отдельных регионов. Так, например, учет динамической ситуации в стратосфере путем ассимиляции данных ECMWF при сезонных прогнозах погоды Северного полушария позволил существенно повысить успешность прогнозов в зимние месяцы [Douville, 2009]. Таким образом, исследования стратосферно-тропосферного взаимодействия имеют также важное практическое значение.

Особо важную роль указанные исследования играют в связи с необходимостью обнаружения и контроля возможных климатических изменений, связанных с антропогенными и естественными воздействиями. Анализ климатической изменчивости температуры с использованием данных NCEP/NCAR показал, что наблюдаются заметные изменения зимней температуры нижней атмосферы, которые имеют противоположный знак в низких и высоких широтах [Канухина и др., 2007]. Эти изменения приводят к соответствующим изменениям интенсивности и расположения максимумов тропосферных струйных течений и, тем самым, к улучшению условий распространения СПВ. Анализ данных NCEP/NCAR позволил выявить также существенный рост амплитуды СПВ1 (планетарная волна с зональным числом $m=1$) в зимней стратосфере за последние десятилетия [Kanukhina et al., 2008]. Наблюдаемое в последние десятилетия возрастание амплитуды СПВ1 может вести к фундаментальному изменению

стратосферной динамики, т.е. к переходу от квазистационарного режима при малых амплитудах СПВ1 к квазипериодическим и/или даже хаотическим осцилляциям (васцилляциям) при больших амплитудах СПВ1 [Holton and Mass, 1976]. Расчеты, выполненные с использованием Модели Средней и Верхней Атмосферы (МСВА) [Погорельцев, 2007], показали, что изменения условий распространения СПВ приводят как к существенному увеличению самой амплитуды СПВ1 в стратосфере, так и к заметному усилению внутрисезонной изменчивости среднего потока и амплитуды СПВ1 в зимний сезон [Pogoreltsev et al., 2009], т.е. к увеличению амплитуды стратосферных васцилляций. Модельные расчеты климатических сценариев развития внезапных стратосферных потеплений (ВСП) для 21 столетия показали статистически значимый положительный тренд (примерно одно событие ВСП на десятилетие) в частоте появления событий ВСП [Charlton-Perez et al., 2008], что также указывает на усиление нелинейного взаимодействия планетарных волн со средним потоком.

Изучению динамических процессов и взаимодействий (в том числе стратосферно-тропосферного взаимодействия) уделяется большое внимание в международных проектах: Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES, 2004-2008 и CAWSES-2, 2009-2013), проводимых под руководством Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics (SCOSTEP); DynVar, проводимого SPARC (Stratospheric Processes and their Role in Climate, Kushner et al., 2007). Все это подтверждает, что исследование вопросов влияния динамических процессов на термический режим и циркуляцию атмосферы является важной и актуальной проблемой, имеющей большое научное и практическое значение.

Одним из наиболее интересных динамических процессов (наряду с событиями ВСП), во время которых проявляется взаимодействие стратосферы и тропосферы, являются сезонные перестройки циркуляции стратосферы. Следует отметить, что в первую очередь интерес представляет весенняя перестройка, так как она начинается и развивается на фоне динамически активной зимней стратосферы. В среднем (климатически) весенняя перестройка обусловлена радиационными процессами, т.е. сезонным изменением зенитного угла Солнца и, как следствие, усилением нагрева полярных областей за счет поглощения солнечного ультрафиолетового излучения озоном. Однако динамические процессы в стратосфере (в том числе планетарные волны) оказывают существенное влияние на начало и особенности протекания весенней перестройки. Так, например, в конце зимы (конец февраля – начало марта) возможно развитие финального стратосферного потепления, в результате которого зимний полярный вихрь разрушается и уже больше не восстанавливается, т.е. имеет место ранняя перестройка циркуляции. С другой стороны, если достаточно сильное событие ВСП происходит в конце января – начале февраля, зимний тип циркуляции успевает восстановиться, но активность планетарных волн низкая, и весенняя перестройка циркуляции происходит только в апреле (поздняя перестройка).

Несмотря на то, что изучению вопросов изменчивости сроков весенней перестройки и их влиянию на формирование погодных условий в конце зимы – начале лета уделялось в последние десятилетия большое внимание (см., например, обзор в [Махнорылова и Угрюмов, 2012]), проводимые исследования носи-

ли в основном синоптический характер. Вопросы влияния внутренних динамических процессов в стратосфере на сроки и особенности протекания весенней перестройки практически не рассматривались.

Цель и задачи. Целью диссертационной работы являлось исследование влияния различных динамических процессов (СПВ, нормальных атмосферных мод, квазидвухлетнего колебания (КДК), Северной кольцевой моды (СКМ) и др.) на весеннюю перестройку циркуляции в стратосфере Северного полушария.

Для достижения поставленной цели необходимо было сформулировать и решить следующие частные задачи исследования:

1. Разработка нового формализованного метода определения срока весенней перестройки циркуляции стратосферы.
2. Расчет дат весенней перестройки для каждого года из рассматриваемого в работе периода и изучение их климатической изменчивости.
3. Исследование на основе корреляционного анализа зависимостей сроков весенней перестройки от амплитуды СПВ1, фазы КДК, индекса Северной кольцевой моды и т.д.
4. Изучение влияния планетарных волн на сроки весенней перестройки на основе анализа данных UK Met Office.
5. Модификация модели средней и верхней атмосферы (МСВА) с целью параметризации эффектов нормальных атмосферных мод.
6. Проведение численных экспериментов с использованием модифицированной версии МСВА для различных фаз КДК и при различной активности СПВ на нижней границе.
7. Сопоставление результатов численного моделирования с наблюдениями.

Методы исследования. Основными методами, используемыми при выполнении работы, являлись спектральный, корреляционный и статистический анализ данных и численное моделирование, а также анализ и интерпретация полученных результатов.

Научная новизна. Новизна работы заключается в том, что впервые предложен и реализован формализованный метод вычисления срока весенней перестройки, который позволяет не только рассчитать дату перестройки, но и оценить достоверность ее определения. Впервые была разработана и внедрена в модель средней и верхней атмосферы параметризация эффектов нормальных атмосферных мод (собственных колебаний атмосферы), учет которой позволил реалистично воспроизводить внутрисезонную изменчивость стратосферной динамики, в том числе во время весенней перестройки циркуляции.

В ходе выполнения работы был получен ряд новых результатов, из которых основными являются следующие:

– впервые получено, что наблюдаемый в последние десятилетия сдвиг сроков весенней перестройки к более поздним датам достигает эффекта «насыщения», т.е. в последние годы даты перестройки демонстрируют только межгодовую изменчивость без значимого тренда;

– показано, что существует статистически значимая зависимость дат весенней перестройки от амплитуды СПВ1 (отрицательная корреляция), которая усиливается в последние годы;

– впервые получено, что зависимость сроков весенней перестройки от индекса Северной кольцевой моды существенно сильнее, если рассматривать только даты ранних перестроек и/или только годы с восточной фазой КДК;

– впервые выполнено моделирование общей циркуляции атмосферы с учетом эффектов нормальных атмосферных мод при различных фазах КДК, что позволило реалистично воспроизвести внутрисезонную изменчивость динамики стратосферы во время весенней перестройки;

– показано, что при восточной фазе КДК весенняя перестройка циркуляции стратосферы происходит раньше, что согласуется с результатами, полученными на основе анализа данных UK Met Office.

Достоверность результатов

Достоверность полученных в диссертации результатов и положений, выносимых на защиту, определяется применением проверенных методов обработки экспериментального материала, а также современных методов математического моделирования. Надежность результатов модельных расчетов подтверждается хорошим совпадением рассчитанных свойств и особенностей динамических процессов в стратосфере во время весенней перестройки циркуляции с результатами анализа наблюдений. Полученные результаты и сделанные на их основе выводы опубликованы в реферируемых научных журналах и получили международное признание.

Практическая и научная значимость

Практическая и научная значимость работы заключается в том, что предложен новый формализованный метод определения сроков весенней перестройки стратосферной циркуляции, который может быть использован для мониторинга динамических процессов в стратосфере с целью дальнейшего использования полученных результатов при долгосрочном прогнозировании погоды в последующие за перестройкой месяцы. Результаты численного моделирования могут быть использованы для планирования экспериментов и для интерпретации результатов наблюдений. Кроме этого, поскольку стратосферные процессы во время весенней перестройки существенно зависят от динамической ситуации в стратосфере в конце зимы, то численное моделирование позволяет давать прогнозы сроков перестройки. Следует также отметить, что разработка и внедрение новой параметризации эффектов нормальных атмосферных мод в МСВА позволили существенно лучше воспроизводить в модели внутрисезонную изменчивость динамических процессов, в том числе сроки и особенности протекания весенней перестройки циркуляции.

Научная и практическая значимость полученных результатов подтверждается также тем, что работы проводились при поддержке гранта «Леонарда Эйлера» (ДААД) в 2008-2009 гг. (исполнитель); грантов Правительства Санкт-Петербурга в 2009 г. и в 2012 г. (руководитель); грантов Министерства образования и науки Российской Федерации ГК - Р1152 (исполнитель) и ГК № 14.740.11.0742 (руководитель) в рамках федеральной целевой программы

«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. по теме: «Исследование влияния планетарных и внутренних гравитационных волн на температурный режим и циркуляцию средней и верхней атмосферы»; грантов РФФИ № 08-05-00710 (исполнитель), № 08-05-00774 (исполнитель), № 09-05-16028 (руководитель), № 10-05-09361 (руководитель), № 10-05-00198 (исполнитель); № 11-05-16079 (руководитель), № 11-05-00971 (исполнитель); № 11-05-16079 (руководитель), № 12-05-09285 (руководитель), № 12-05-90810 (руководитель); Стипендии Президента Российской Федерации для обучения за рубежом студентов и аспирантов российских вузов в 2010/2011 учебном году; стипендией Президента Российской Федерации на 2010/2011 учебный год; специальной государственной стипендией Правительства Российской Федерации для аспирантов на 2011/2012 учебный год; грантов Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы соглашения № 14.В37.21.0884 и № 14.В37.21.0788.

Положения, выносимые на защиту:

- формализованный метод определения даты весенней перестройки циркуляции стратосферы, основанный на вычислении момента времени, когда скорость сезонного изменения скорости зонального потока максимальна;
- результаты анализа климатической изменчивости сроков весенней перестройки циркуляции и их связи с активностью планетарных волн;
- результаты корреляционного анализа зависимости дат весенней перестройки циркуляции от индекса СКМ в зависимости от фазы КДК;
- параметризация эффектов нормальных атмосферных мод в модели МСВА;
- результаты моделирования общей циркуляции средней атмосферы во время весенней перестройки с учетом нормальных атмосферных мод;
- результаты анализа зависимости сроков весенней перестройки от активности планетарных волн для различных фаз КДК;
- результаты анализа взаимодействия планетарных волн со средним потоком и их нелинейного насыщения стратосфере.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии в коллективе соавторов. В опубликованных в соавторстве работах по разработке и внедрению параметризации эффектов нормальных атмосферных мод в МСВА автору принадлежит участие в постановке и реализации задачи, обработке и анализе результатов моделирования.

Апробация и публикация работы

Работа выполнялась на метеорологическом факультете РГГМУ с 2009 по 2012 гг. Тема диссертации включена в план работ кафедры метеорологических прогнозов РГГМУ. Результаты работы докладывались и обсуждались на 7-ой Международной школе молодых ученых «Физика окружающей среды» (Красноярск, Россия, 2008 г.), Международном симпозиуме стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» (Санкт-Петербург, Россия, 2009 г.), Международной

Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике (Иркутск, Россия, 2009 г.), Молодежной конференции «Физика и прогресс» (Санкт-Петербург, 2009 г.), Международной конференции 6th IAGA/ICMA/CAWSES workshop on «Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere» (Боулдер, США, 2010 г.), Международной школе молодых ученых CEDAR Workshop (Боулдер, США, 2010 г.), Конференции молодых специалистов, НПО «Тайфун», (г. Обнинск, 2010 г.), Международной конференции 4th IAGA/ICMA/CAWSES Workshop on Vertical Coupling in the Atmosphere-Ionosphere System (Прага, Чехия, 2011 г.), Международном симпозиуме стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» (Санкт-Петербург, Россия, 2011 г.), Всероссийской конференции с международным участием «Физика окружающей среды», посвященной 50-летию первого полета человека в космос и 75-летию регулярных исследований ионосферы в России (Томск, 2011 г.), Международной Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» XII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск, 2011 г.), Международном симпозиуме WCRP Open science conference “Climate research in service to society” (Денвер, США, 2011 г.), Международном симпозиуме Workshop on Stratospheric Sudden Warming and its Role in Weather and Climate Variations (Киото, Япония, 2012 г.), II Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (Санкт-Петербург, 2012 г.), 39-й научной ассамблее Коспар (Майсур, Индия, 2012 г.), Международной конференции 7th IAGA/ICMA/CAWSES workshop on «Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere» (Буэнос-Айрес, Аргентина, 2012 г.). Также результаты докладывались на семинаре в Институте метеорологии г. Лейпцига, Германия в 2011 г. и на итоговых сессиях Ученого совета РГГМУ (2009, 2010 и 2012 гг.)

Основные результаты по теме диссертации представлены в 18 статьях, из них шесть опубликованы в реферируемых журналах, три - находятся в печати.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 105 наименований. Общий объем диссертации составляет 121 страницу, в том числе 45 рисунков.

Благодарности.

Хочу выразить огромную благодарность научному руководителю, Погорельцеву Александру Ивановичу, за веру в меня и помощь на всех этапах написания диссертации, всем работникам кафедры Метеорологических прогнозов РГГМУ, Институту метеорологии Университета г. Лейпцига, Германия и лично профессору Кристофу Якоби и доктору Питеру Хофману.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи исследования, излага-

ются научная новизна, практическая и научная значимость диссертации, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава является обзорной и содержит сведения о динамике стратосферы в целом. Обсуждаются особенности динамических процессов зимней стратосферы, взаимодействие стратосферы и тропосферы и их взаимное влияние друг на друга.

Зимняя стратосфера характеризуется присутствием полярного вихря над полюсом, который в целом изолирован от средних широт. Этот глубокий «планетарный циклон» обуславливает движение воздуха над полушарием с запада на восток. Летом, когда возрастает поглощение солнечного излучения над полюсом, циклон сменяется антициклоном, и направление зонального потока меняется с западного (дующего с запада) на восточное. Причем, смена циркуляции с зимней на летнюю начинается с более высоких слоев атмосферы и постепенно распространяется вниз в тропосферу.

Одним из ярких динамических процессов зимней стратосферы, во время которых проявляется динамическое взаимодействие тропосферы и стратосферы, являются события внезапных стратосферных потеплений (ВСП). В тоже время ВСП является важнейшим фактором, определяющим характер зимней циркуляции стратосферы средних и высоких широт в Северном полушарии. Количество и интенсивность ВСП в течение зимы влияет на интенсивность и срок финального стратосферного потепления, а также на перестройку циркуляции атмосферы с зимнего режима на летний.

Особенностью динамики стратосферы, которую стоит учитывать при исследованиях атмосферы, являются квазидвухлетние колебания (КДК) зонального потока в низких широтах. Известно, что КДК влияют на условия распространения планетарных волн, на интенсивность нелинейного взаимодействия этих волн со средним потоком в стратосфере и, как следствие, на разрушение полярного вихря в зимней стратосфере.

Еще одним интересным динамическим процессом (наряду с событиями ВСП), в ходе которого проявляется взаимодействие стратосферы и тропосферы, являются сезонные перестройки циркуляции стратосферы. Следует отметить, что в первую очередь интерес представляет весенняя перестройка, так как она начинается и развивается на фоне динамически активной зимней стратосферы.

В среднем весенняя перестройка обусловлена радиационными процессами, т.е. сезонным изменением зенитного угла Солнца и, как следствие, усилением нагрева полярных областей за счет поглощения солнечного ультрафиолетового излучения озоном. Однако динамические процессы в стратосфере (в том числе планетарные волны) оказывают существенное влияние на начало и особенности протекания весенней перестройки. Так, например, в конце зимы (конец февраля – начало марта) возможно развитие финального стратосферного потепления (ФСП), в результате которого зимний полярный вихрь разрушается и уже больше не восстанавливается, т.е. имеет место ранняя перестройка циркуляции. С другой стороны, если достаточно сильное событие ВСП происходит в конце января – начале февраля, зимний тип циркуляции успевает восстано-

виться, но активность планетарных волн низкая и весенняя перестройка циркуляции происходит только в апреле (поздняя перестройка).

Атмосфера Земли представляет собой единую динамическую систему. Процессы, развивающиеся в различных атмосферных слоях, взаимосвязаны, поэтому динамические процессы, протекающие в стратосфере, в частности перестройка циркуляции с зимней на летнюю, события ФСП и ВСП оказывают влияние на процессы в тропосфере и погоду у поверхности Земли. Результаты исследований стратосферно-тропосферных взаимодействий могут быть использованы при долгосрочном прогнозировании погоды.

Для понимания динамических процессов, ответственных за стратосферно-тропосферное взаимодействие в конце зимы – начале весны, необходимы как анализ данных наблюдений, так и разработка моделей, описывающих формирование общей циркуляции средней атмосферы с учетом крупномасштабных возмущений, распространяющихся из тропосферы, а также обратное влияние стратосферных процессов на формирование аномалий состояния тропосферы.

Во **второй главе** выполнен анализ динамического режима стратосферы во время весенней перестройки циркуляции.

В опубликованных работах по изучению процессов весенней перестройки ее дата определяется различными методами, основанными на определении срока перестройки как момента смены знака зонального потока или, когда значение скорости ветра становится меньше определенного значения. Такое определение не всегда однозначно, за счет того, что в отдельные годы скорость среднего зонального потока продолжительное время испытывает нерегулярные колебания около некоторого близкого к нулю значения, и определить, когда точно происходит перестройка циркуляции достаточно сложно. Поэтому, в работе предложен новый формализованный метод однозначного определения срока весенней перестройки и рассчитаны даты перестройки, наблюдаемой в последние десятилетия.

При разработке метода и анализе сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы были использованы данные, ассимилированные в модели UK Met Office. В качестве характеристики среднего зонального потока использовалась зональная компонента скорости геострофического ветра, рассчитанная с использованием данных о геопотенциале по формуле:

$$\bar{U}_g = -\frac{1}{2\Omega a \sin \phi} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \phi}, \quad (1)$$

где Ω и a – модуль скорости вращения и средний радиус Земли соответственно; ϕ – географическая широта; $\bar{\Phi}$ – геопотенциал. Подчеркивание сверху означает зонально-осредненную величину. В качестве климатического значения даты перестройки был выбран день, когда абсолютная величина скорости изменения (уменьшения) зональной компоненты скорости геострофического ветра (1) достигает максимального значения. Так как существуют сильные осцилляции скорости зонального потока, чтобы однозначно определить дату перестройки, значения производной по времени рассчитывались с использованием данных, сглаженных по 31 дню. Климатическое (среднее за 1992-2012 гг.) поведе-

ние зональной компоненты скорости геострофического ветра и скорость ее изменения в январе-июне показаны на рисунке 1 (сплошная и штриховая линии, соответственно). Таким образом, мы получили среднюю за 21 год дату перестройки – 6 апреля. Далее была рассчитана невязка между наблюдаемым изменением скорости зонального потока для каждого года и ее климатическим ходом. Для расчета невязки использовался временной интервал в 60 дней, центрированный на климатической дате перестройки, и временной сдвиг между наблюдаемым и климатическим изменениями скорости зонального потока варьировался в пределах ± 30 дней. Указанные значения были выбраны из тех соображений, что временной интервал между ранними и поздними перестройками циркуляции составляет примерно два месяца. Дата весенней перестройки для каждого отдельного года определялась по климатическому значению, с учетом временного сдвига, при котором невязка имела минимальное значение.

Анализ климатической изменчивости сроков весенней перестройки циркуляции был выполнен с использованием данных NCEP/NCAR ре-анализа. Для расчета дат перестроек за период с 1971 по 2011 годы, были использованы данные о геопотенциальной высоте уровня 10 гПа, 67.5°N с января по июнь.

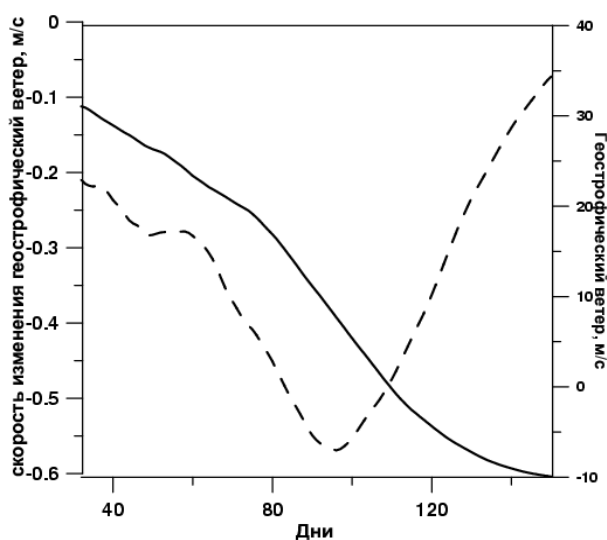


Рисунок 1 – Климатическое изменение зональной компоненты скорости геострофического ветра (сплошная линия) и сглаженная скорость ее изменения в феврале-мае (штриховая линия), рассчитанные по данным UK Met Office, на уровне 10 гПа, 67.5°N

На рисунке 2 показаны временные ряды сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы, рассчитанных по данным NCEP/NCAR ре-анализа за период с 1971 по 2011 годы и UK Met Office за период с 1992 по 2012 годы. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что дата перестройки изменяется в диапазоне порядка двух месяцев (с середины марта до середины мая). Существует заметный тренд смещения сроков в сторону более поздних перестроек. Временной ряд дат перестроек за 1971-2011 гг. был разбит на две части (1971-1991 и 1992-2011 гг.). Если сравнивать между собой эти два временных интервала, то можно заметить, что в последние десятилетия изменчи-

вость снизилась, а тренд смещения в сторону более поздних перестроек уменьшился.

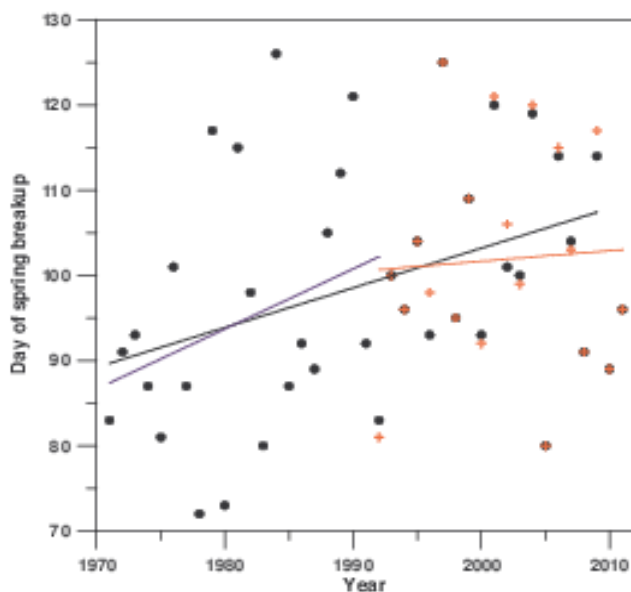


Рисунок 2 – Временной ряд сроков весенних перестроек, рассчитанных по данным NCEP/NCAR ре-анализа с 1971 по 2011 гг. (черные точки) и по данным UK Met Office, с 1992 по 2011 гг. (красные точки)

Разброс в датах перестройки циркуляции стратосферы достаточно велик. В работе были проанализированы отдельные зимы и сделан вывод, что иногда, в принципе, трудно говорить о весенней перестройке, как таковой. В отдельные годы полярный вихрь разрушается еще зимой вследствие мощного ВСП и уже не восстанавливается. Скорость ветра в таком случае в течение нескольких месяцев колеблется около нулевых значений, а его направление становится восточным, когда над полюсом образуется антициклон. В такие годы достаточно трудно оценить, какой именно момент считать датой перестройки циркуляции с зимнего режима на летний. Поэтому для таких лет необходимо проводить синоптический анализ. В последние годы разрушение полярного вихря в течение зимних месяцев без последующего его восстановления происходит довольно часто. Стоит отметить, что в 90-е годы прошлого века этого не наблюдалось.

Чтобы проанализировать особенности процессов, протекающих в средней атмосфере в течение ранних и поздних перестроек, из наблюдаемого временного ряда были выбраны и проанализированы зимы за 2008-2011 годы, когда имели место ранние и поздние перестройки. Для того чтобы оценить, какие динамические процессы оказывают влияние на срок перестройки, были рассмотрены волновая активность и поведение зонального ветра в выбранные годы. Для оценивания вклада бегущих планетарных волн для рассматриваемых лет были построены вейвлет спектры распространяющихся на запад волн.

Для более детального анализа активности планетарных волн, а также анализа проникновения волн из тропосферы в стратосферу и обратно, были рассчитаны и проанализированы распределения вертикального потока волновой

активности (так называемого, потока Элиассена-Пальма). Поток Элиассена-Пальма рассчитывался как усредненный по долготе трехмерный поток волновой активности, таким образом вертикальная компонента этого потока представляет собой суммарный вклад всех планетарных волн (зональных гармоник). Перед ранней перестройкой в средних и высоких широтах Северного полушария наблюдается усиление направленных вверх, из тропосферы в стратосферу, потоков волновой активности, которые приводят к развитию ФСП. Происходит обращение циркуляции, после которого зимний полярный вихрь уже не восстанавливается. После перестройки стратосферной циркуляции на летний режим, вертикальные потоки волновой активности практически отсутствуют. По-видимому, происходит запираание волн на высотах стратосферы восточным потоком, и поэтому способность волн проникать из тропосферы в стратосферу и обратно ослабевает. В годы, когда наблюдалась поздняя перестройка, потоки волновой активности очень слабые по величине на протяжении всех весенних месяцев. Присутствие сильного зонального потока не позволяет амплитудам волн достичь больших значений, и обмена между тропосферой и стратосферой практически не происходит. Наблюдаемая поздняя перестройка общей циркуляции стратосферы происходит из-за изменения зенитного угла Солнца и нагрева полярной области.

Проанализировав отдельно годы с ранней и поздней перестройкой, можно сделать вывод, что изменчивость сроков перестройки стратосферной циркуляции с зимней на летнюю определяется главным образом (по крайней мере, в случае ранних перестроек) усилением волнового торможения. В случае поздних перестроек (низкая активность планетарных волн) – нагревом средней атмосферы над полярной областью за счет усиления поглощения ультрафиолетового излучения при сезонном изменении зенитного угла Солнца.

Анализ амплитуды стационарной планетарной волны с зональным волновым числом 1 (СПВ1), рассчитанной в поле геопотенциальной высоты на уровне 30 гПа и широте 62.5°N по данным NCEP/NCAR за март свидетельствует о том, что существует сильная межгодовая изменчивость амплитуды и значимый отрицательный тренд в течение последних десятилетий. Диаграмма рассеяния (рисунок 3) демонстрирует зависимость сроков весенней перестройки на уровне 10 гПа от амплитуды СПВ1 на уровне 30 гПа. Наблюдается значимая отрицательная корреляция (коэффициент корреляции $r = -0.58$) между этими величинами. Полученная отрицательная корреляция может, по крайней мере, частично объяснить наблюдаемый тренд смещения сроков весенней перестройки в сторону более поздних дат. Снижение активности СПВ1, наблюдаемое в последние десятилетия, приводит к тому, что роль динамических процессов снижается, а сроки весенней перестройки смещаются к датам, которые определяются только сезонным изменением зенитного угла Солнца.

Зависимость между амплитудами СПВ1 и датами весенней перестройки циркуляции стратосферы меняется в течение рассматриваемого временного интервала 1971-2011 гг. Это можно обнаружить при вычислении бегущей корреляции (рисунок 4). После 1993 года наблюдается резкое увеличение значения коэффициента корреляции по модулю. Можно заключить, что корреляция меж-

ду амплитудами СПВ1 и датами весенней перестройки является достаточно высокой с конца 1980-х годов, а до этого времени имела низкие значения.

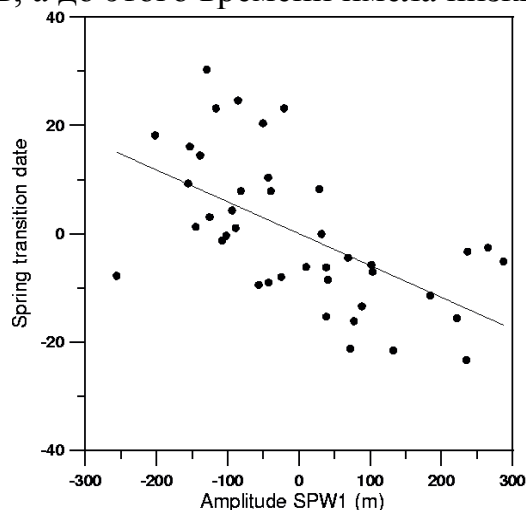


Рисунок 3 – Диаграмма рассеяния между амплитудами СПВ1 на уровне 30 гПа и датами весенней перестройки на уровне 10 гПа, рассчитанными по данным NCEP/NCAR

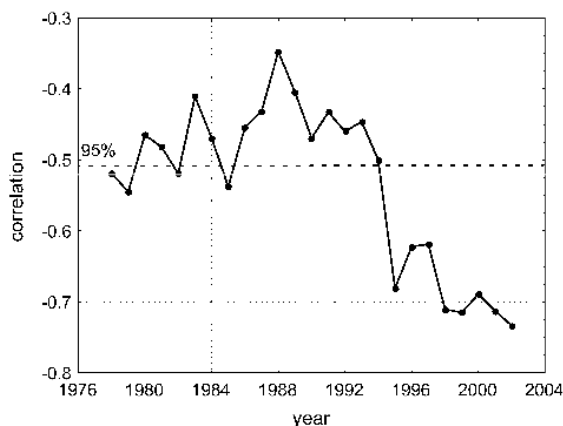
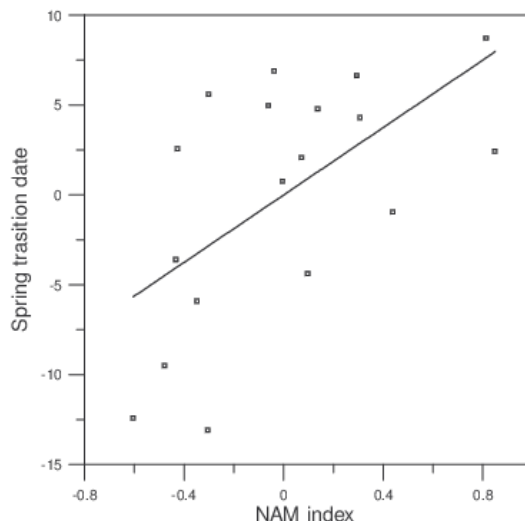
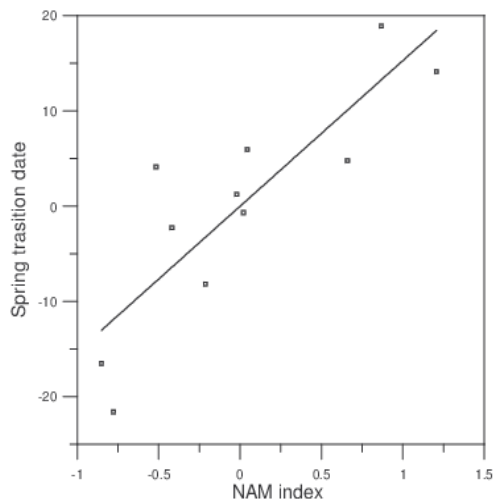


Рисунок 4 – Скользящая по 15 годам корреляция между сроками весенней перестройки циркуляции стратосферы и амплитудами СПВ1

В работе был выполнен анализ зависимости даты весенней перестройки циркуляции стратосферы от индекса северной кольцевой моды (СКМ-индекса) и КДК. Простое сравнение временного ряда дат весенней перестройки и среднемесячных значений скорости зонального ветра над экватором в марте не дало значимых результатов, но, тем не менее, КДК может оказывать влияние на срок перестройки опосредовано. Сигнал КДК хорошо просматривается в данных о северной кольцевой моде. Была проанализирована связь между СКМ-индексами на уровне 10 гПа, осредненными за март - апрель и датами весенней перестройки циркуляции стратосферы. Коэффициент корреляции между датами весенней перестройки и СКМ-индексами относительно невелик ($r = 0.49$). Однако, для случая восточной фазы КДК, корреляция очень высокая ($r = 0.85$) — рисунок 5(a). В случае западной фазы КДК высокой корреляции обнаружено не было ($r = 0.47$). Таким образом, можно сделать вывод, что КДК влияет на дату весенней перестройки циркуляции стратосферы через динамические процессы, т.е. путем изменения характеристик СКМ, что в свою очередь является главной

(первой) естественной ортогональной компонентой глобальных атмосферных колебаний. Необходимо отметить еще один интересный результат: зависимость дат ранних перестроек циркуляции стратосферы от СКМ-индекса, осредненно-го за март-апрель, также статистически значима, независимо от фазы КДК ($r = 0.59$), показано на рисунке 5(б). В случае поздних дат весенних перестроек эта зависимость намного слабее ($r = 0.35$).



а

б

а

б

Рисунок 5 – Диаграмма рассеяния для ряда СКМ-индексов на уровне 10 гПа, осредненных за март – апрель, и временного ряда ранних дат весенней перестройки в случае восточной фазы КДК в марте (а) и временного ряда дат ранней весенней перестройки (б)

В **третьей главе** приведено описание модели средней и верхней атмосферы. Описана постановка начальных и граничных условий, параметризация эффектов нормальных атмосферных мод.

Модель средней и верхней атмосферы (МСВА) – это трехмерная нелинейная модель общей циркуляции атмосферы, разработанная на основе модели COMMA-LIM (Cologne Model of the Middle Atmosphere-Leipzig Institute for Me-

teorology). Она охватывает область от поверхности 1000 гПа до высот F2-слоя ионосферы. Разрешение модели по горизонтали составляет 5 / 5.625 градусов (широта/долгота). В качестве вертикальной координаты в МСВА используется лог-изобарическая безразмерная высота $x = -\ln p/1000$ с шагом сетки 0.406. Расчеты проводились с равномерным шагом по высоте, и использовалась 48-уровневая версия модели, т.е. область интегрирования по высоте составляла 0 – 135 км. Исходными в модели являются прогностические уравнения для горизонтальных составляющих скорости движения воздуха и температуры воздуха, дополненные уравнениями неразрывности и гидростатики. Прогностические уравнения для горизонтальных составляющих скорости движения воздуха – это уравнения Навье-Стокса, прогностическое уравнение для температуры получено при использовании I закона термодинамики. Геопотенциал и вертикальная компонента скорости движения вычисляются из диагностических уравнений гидростатики и неразрывности соответственно. Для решения прогностических уравнений используется схема Мацуно в сочетании с расщеплением исходных уравнений по физическим факторам по Марчуку-Странгу.

В качестве граничных условий использовались поля температуры воздуха и геопотенциальной высоты, полученные в результате усреднения данных UK Met Office за 20 лет (1992-2011 гг.) на уровне 1000 гПа. Нижние граничные условия были рассчитаны для двух модельных экспериментов: в первом случае они усреднялись за март, во втором – брались средние за 20 лет значения на 1 марта. В качестве среднезонального фона использовались климатические распределения температуры воздуха до высот нижней стратосферы и скорости среднего зонального потока в экваториальной области на высотах 0-50 км, рассчитанные на основе данных UK Met Office. Чтобы получить фоновые значения, из имеющегося массива данных были выбраны годы с ярко-выраженными западными и восточными фазами КДК в марте. Для определения фазы за каждый отдельный год рассматривалось отклонение скорости среднего зонального потока в экваториальной области от ее климатического значения на высоте 30 км. Такая высота для определения фазы КДК в марте была выбрана не случайно, анализ данных показывает, что максимальная изменчивость скорости среднего зонального потока наблюдается на высоте 30-35 км. Фаза КДК считалась западной, если отклонение скорости ветра в марте было положительным, при отрицательных значениях полагалось, что фаза КДК восточная.

Таким образом, было выбрано по семь лет с ярко-выраженной фазой КДК в марте. Годы с западной фазой — 1993, 1995, 1997, 2002, 2004, 2006, 2008 гг., с восточной фазой — 1994, 1996, 2003, 2005, 2007, 2009, 2012 гг. Фоновые распределения были получены путем осреднения скорости зонального потока и температуры воздуха в течение марта за каждые семь лет.

В модель МСВА была включена параметризация нормальных атмосферных мод (НАМ). В прогностическое уравнение для температуры вводился локализованный на высотах тропосферы дополнительный источник нагрева, который включал набор временных гармоник с периодами, соответствующими основным модам собственных колебаний с зональными волновыми числами

$m=1$ и 2. Каждая гармоника имела широтную структуру соответствующей функции Хафа.

В модели были учтены следующие моды:

(1,1) – первая симметричная мода (5-дневная волна);

(1,2) – вторая асимметричная мода (10-дневная волна);

(1,3) – вторая симметричная мода (16-дневная волна);

(2,1) – первая симметричная мода (4 дневная волна);

(2,2) – вторая асимметричная мода (7 дневная волна).

Величина дополнительного нагрева для всех мод полагалась одинаково равной 2×10^{-5} К/с. Следует отметить, что выбранная величина нагрева обеспечивает амплитуды НАМ в стратосфере, примерно соответствующие наблюдаемым.

Модельные эксперименты проводились с учетом НАМ и без учета, для разных фаз КДК.

В **четвертой** главе приведено обсуждение результатов модельных экспериментов, выполненных с помощью МСВА для исследования влияния динамических процессов (СПВ, НАМ, КДК) на процесс весенней перестройки циркуляции стратосферы. Представлены результаты моделирования весенней перестройки циркуляции при различных нижних граничных условиях, отражающих изменчивость СПВ, с учетом и без учета НАМ и для различных фаз КДК.

На рисунке 6 представлены результаты моделирования с помощью МСВА без включения параметризации эффектов НАМ для случая западной и восточной фазы КДК. Показаны изменения скорости среднего зонального потока на 62.5°N и температуры над полюсом в марте-апреле. Из рисунка видно, что, если не учитывать собственные колебания атмосферы, модель при любой фазе КДК в марте воспроизводит перестройку циркуляции стратосферы в основном за счет радиационных процессов. Происходит постепенная смена направления ветра с западного на восточный без заметных колебаний среднего зонального потока, которые наблюдаются в природе.

При включении параметризации эффектов НАМ в модель, воспроизводятся квазирегулярные колебания среднего зонального потока и изменения в поле температуры воздуха, т.е. включается влияние динамических факторов (рисунок 7). Перестройка циркуляции происходит раньше в случае восточной фазы КДК, чем в случае западной фазы.

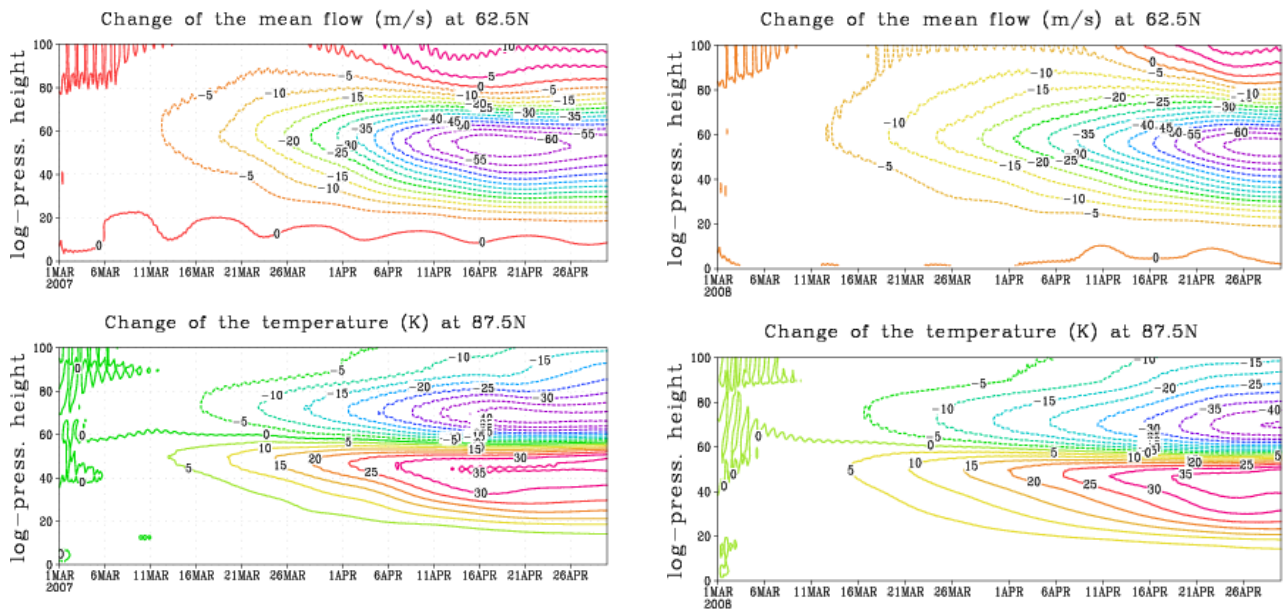


Рисунок 6 – Результаты моделирования с помощью МСВА без учета эффектов НАМ в случае западной (левый рисунок) и восточной (правый рисунок) фазы КДК в марте

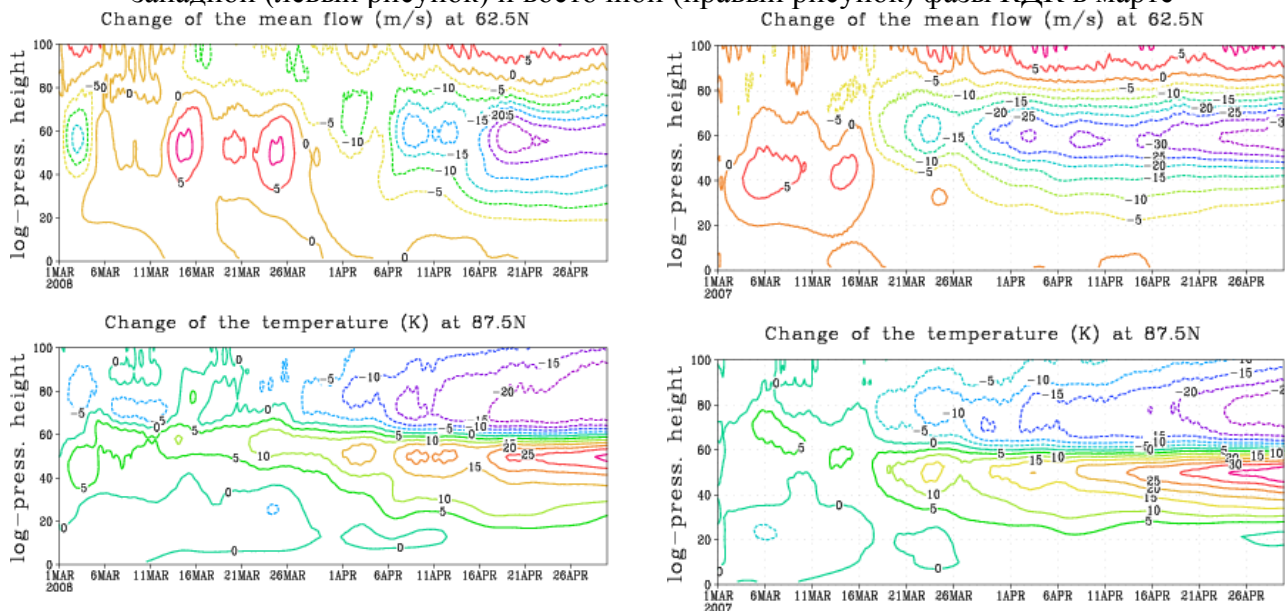


Рисунок 7 – Результаты моделирования с помощью МСВА с учетом НАМ в случае западной (левый рисунок) и восточной (правый рисунок) фазы КДК в марте

С помощью модели МСВА было выполнено два эксперимента, когда на нижней границе модели задавались климатические поля температуры воздуха и геопотенциальной высоты, усредненные за март и средние значения на 1 марта. Это было сделано для того, чтобы оценить, как усиление волн на нижнем уровне повлияет на распространение волн в стратосфере. Амплитуды волн, осредненных за март, значительно меньше амплитуд, средних за 1 марта, в средних и высоких широтах Северного полушария. Был выполнен анализ высотно-широтных распределений амплитуды СПВ1 и среднего зонального потока в марте. Полученные результаты показывают, что, в случае западной фазы КДК в марте усиление волн на нижней границе не только не приводит к усилению амплитуды СПВ1 на высотах стратосферы, но приводит даже к небольшому ослаблению амплитуды в стратосфере и изменению структуры волны. В случае восточ-

ной фазы КДК, усиление волн на нижней границе приводит к ослаблению амплитуды СПВ1 в стратосфере. Это можно объяснить эффектом нелинейного насыщения волн, причем это насыщение быстрее наступает при восточной фазе КДК. Эффект насыщения волн возникает за счет нелинейного взаимодействия волны с зональным потоком – усиленная волна, влияя на зональный западный поток, тормозит его, тем самым ухудшая условия для распространения волн из тропосферы в стратосферу – волновод становится уже, причем более эффективно это происходит при восточной фазе КДК. Дальнейшее усиление волны в тропосфере приведет к запираанию волн на нижних уровнях стратосферы. В этом случае волновое взаимодействие между тропосферой и стратосферой будет ослаблено.

Стоит отметить, что включение параметризации эффектов НАМ в модель позволяет лучше воспроизводить природную изменчивость температуры и среднего зонального потока в весенние месяцы. Результаты расчетов показывают, что фаза КДК влияет на условия распространения волн из тропосферы в стратосферу, и при условии восточной фазы КДК эффект насыщения наступает быстрее, а перестройка происходит раньше. Оценка средних дат весенних перестроек, полученная для выбранных лет с западной и восточной фазами КДК по данным UK Met Office согласуется с результатами модельных расчетов, т.е. при восточной фазе КДК перестройка происходит существенно раньше.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы, полученные при работе над диссертацией.

К **основным результатам** проведенных диссертационных исследований относятся следующие.

1. Предложен и реализован новый формализованный метод определения даты весенней перестройки циркуляции стратосферы, на основе данных, ассимилированных в моделях NCEP/NCAR и UK Met Office, рассчитаны значения сроков весенней перестройки и изучена их климатическая изменчивость. Показано, что наблюдаемый в последние десятилетия тренд смещения сроков весенней перестройки к более поздним датам достигает эффекта «насыщения», т.е. в последние годы даты перестройки демонстрируют только межгодовую изменчивость без значимого тренда.
2. Выполнен анализ зависимости сроков весенней перестройки циркуляции от активности планетарных волн. Получено, что существует статистически значимая зависимость дат весенней перестройки от амплитуды СПВ1 (отрицательная корреляция), которая усиливается в последние годы.
3. Изучена зависимость сроков весенней перестройки от индекса Северной кольцевой моды. Установлено, что эта зависимость существенно сильнее, если рассматривать только даты ранних перестроек и/или только годы с восточной фазой КДК.
4. Разработана и внедрена в МСВА параметризация эффектов НАМ (собственных колебаний атмосферы). Выполнено моделирование общей циркуляции атмосферы и показано, что учет НАМ позволяет более правильно воспроизводить внутрисезонную изменчивость стратосферной динамики, в том числе и во время весенней перестройки циркуляции.

5. Выполнено моделирование весенней перестройки циркуляции при различных нижних граничных условиях, отражающих изменчивость СПВ, и для различных фаз КДК. Получено, что из-за эффекта нелинейного насыщения СПВ изменение нижних граничных условий сказывается в стратосфере незначительно, тогда как при восточной фазе КДК перестройка происходит существенно раньше, чем при западной фазе. Данный результат в среднем согласуется с результатами анализа данных UK Met Office.

По результатам, полученным в ходе выполнения диссертационной работы, можно сделать следующие **выводы**, объясняющие особенности протекания весенней перестройки циркуляции стратосферы:

- в связи с тем, что имеется отрицательная корреляция дат весенней перестройки циркуляции с амплитудой СПВ1, а в последние десятилетия активность СПВ1 в стратосфере уменьшается, наблюдается смещение сроков весенней перестройки к более поздним датам. В последние годы, однако, это смещение заметно уменьшилось, что, по-видимому, объясняется тем, что из-за ослабления влияния планетарных волн дата перестройки определяется в большей мере радиационными процессами.

- в среднем в годы, когда наблюдается восточная фаза КДК, весенняя перестройка происходит раньше, чем в годы с западной фазой, что может быть объяснено более сильной зависимостью дат перестройки от динамических процессов при восточной фазе КДК. Этот результат подтверждается также тем, что корреляция дат весенней перестройки циркуляции с СКМ-индексом статистически значима только при восточной фазе КДК.

Обозначения и сокращения

ВСП	внезапное стратосферное потепление
КДК	квазидвухлетнее колебание
МСВА	Модель Средней и Верхней Атмосферы
НАМ	нормальная атмосферная мода
СКМ	северная кольцевая мода
СПВ	стационарная планетарная волна
СПВ1	стационарная планетарная волна с зональным волновым числом $m=1$
ECMWF	European Center for Medium-Range Weather Forecasts
NCEP/NCAR	National Center for Environmental Prediction - National Center for Atmospheric Research
UK Met Office	United Kingdom's national weather service

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Savenkova E.N., Kanukhina A.Yu., Pogoreltsev A.I., Merzlyakov E.G. Variability of the springtime transition date and planetary waves in the stratosphere//Journal of

Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2012. – V. 90-91. – P. 1–8, doi:10.1016/j.jastp.2011.11.001.

2. Мордвинов В.И., Девятова Е.В., Кочеткова О.С., Ульянец Е.К., Савенкова Е.Н., Погорельцев А.И. Генерация и распространение низкочастотных атмосферных возмущений зимой в северном полушарии // Ученые записки РГГМУ №19, 2011. – С. 90-102.
3. Karpova N., Shved G., Ermolenko S., Ammosov P., Gavriilyeva G., Savenkova E. Short-period global atmospheric waves as revealed by nightglow observations // International Journal of Remote Sensing, Volume 32, Issue 11, June 2011, pages 3055-3064.
4. Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Межгодовая и климатическая изменчивость сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы // Ученые записки РГГМУ № 11, 2010. – С. 53-62.
5. Портнягин Ю.И., Соловьева Т.В., Мерзляков Е.Г., Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Высотно-широтная структура вертикального ветра в области верхней мезосферы и нижней термосферы (70-110 км) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 46. – № 1. – С. 95-104.
6. Pogoreltsev A.I., Kanukhina A.Yu., Suvorova E.V., Savenkova E.N. Variability of planetary waves as a signature of possible climatic changes // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2009. – V. 71. – P. 1529-1539, doi:10.1016/j.jastp.2009.05.011.

Другие публикации за период подготовки диссертации:

1. Зарубин А.С., Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Планетарные волны в полях геопотенциальной высоты, восстановленных по данным о температуре эксперимента COSMIC // Труды XVI Международной школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты» / Рос. акад. наук, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова [и др.] – Москва: Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. 2012. – С. 103-106.
2. Зарубин А.С., Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Планетарные волны в стратосфере на основе анализа радиозатменных наблюдений эксперимента COSMIC // Труды II Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2012. – Т.2. – С. 193-197.
3. Савенкова Е.Н., Анискина О.Г., Погорельцев А.И. Нелинейное насыщение стационарных планетарных волн в стратосфере // Труды II Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2012. – Т.1. – С. 226-232.
4. Канухина А.Ю., Мерзляков Е.Г., Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Влияние КДК и солнечной активности на межгодовую изменчивость дат весенней перестройки стратосферной циркуляции // Труды XII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», БШФФ-2011, Изд-во ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 2011. – С. 324-326.

5. Савенкова Е.Н. Стратосферно-тропосферное взаимодействие во время весенней перестройки циркуляции // Труды XII Конференции молодых ученых "Взаимодействие полей и излучения с веществом", БШФФ-2011, Изд-во ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 2011. – С. 343-346.
6. Коваль А.В., Гаврилов Н.М., Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Численное моделирование реакции общей циркуляции атмосферы на пространственные неоднородности орографических волн // Труды 11-й междунар. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности», изд. Политех. ун-та, Санкт-Петербург, 2011, Т. 2. – С. 131-135.
7. Коваль А.В., Гаврилов Н.М., Савенкова Е.Н. Влияние орографических волн на глобальный перенос озона // Труды 11-й междунар. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности», изд. Политех. ун-та, Санкт-Петербург, 2011, Т. 1. – С. 179-180.
8. Савенкова Е.Н., Погорельцев А.И. Диагностика волновых процессов в средней и верхней атмосфере во время весенней перестройки циркуляции // Труды XI Конференции молодых ученых «Гелио- и геофизические исследования. – Изд-во ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 2009. – С. 186-188
9. Савенкова Е.Н., Канухина А.Ю., Ульянов Е.К. Климатическая изменчивость планетарных волн в зимней стратосфере северного полушария по данным NCEP/NCAR ре-анализа // Физика окружающей среды: Материалы VII Международной школы молодых ученых. – Томск: Томский государственный университет. – 2008. – С. 85-88.

Статьи, представленные к печати:

1. Гаврилов Н. М., Коваль А.В., Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Численное моделирование реакции общей циркуляции средней атмосферы на пространственные неоднородности орографических волн // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2012, в печати.
2. Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н., Перцев Н.Н. Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод // Геомагнетизм и аэронавигация, 2012, в печати.
3. Gavrilo N.M., Koval A.V., Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N. Numerical modeling influence of inhomogeneous orographic waves on planetary waves in the middle atmosphere // Adv. Space Res., 2012, in press.

Список использованных источников

Канухина А.Ю., Нечаева Л.А., Суворова Е.В., Погорельцев А. И. Климатические тренды температуры, зонального потока и стационарных планетарных волн по данным NCEP/NCAR реанализа // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 43. – № 6. – С. 754-763.

Махнорылова С.В., Угрюмов А.И. Формирование длительных аномалий температурного режима весенне-летнего периода на Европейской терри-

тории России под влиянием особенностей стратосферной циркуляции // Ученые записки РГГМУ № 24, 2012. – С. 38-53.

Погорельцев А.И. Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными вассилляциями// Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 43. – № 4. – С. 463-475.

Charlton-Perez A.J., Polvani L.M., Austin J., Li F., 2008: The frequency and dynamics of sudden stratospheric warmings in the 21st century // J. Geophys. Res., 113, D16116, doi:10.1029/2007JD009571.

Chen, P., and W. A. Robinson Propagation of planetary waves between the troposphere and stratosphere. // J. Atmos. Sci. – 1992. – Vol. 49. – P. 2533 – 2545.

Douville H. Stratospheric polar vortex influence on Northern Hemisphere winter climate variability//Geophys. Res. Lett. - 2009.- V. 36.- L18703.- doi:10.1029/2009GL039334.

Holton J.R., Mass C. Stratospheric vacillation cycles//J. Atmos. Sci.- 1976.- V. 33.- P. 2218-2225.

Kanukhina A.Y., Suvorova E.V., Nechaeva L.A., Skrygina E.K., and Pogoreltsev A.I. Climatic variability of the mean flow and stationary planetary waves in the NCEP/NCAR reanalysis data//Ann. Geophys. – 2008. –26. – P. 1233-1241.

Kushner P.J., et al. 2007: The SPARC DynVar Project: A SPARC Project on the Dynamics and Variability of the Coupled Stratosphere-Troposphere System. SPARC Newsletter, № 29, 9-14.

Perlwitz J., Harnik N. Observational evidence of a stratospheric influence on the troposphere by planetary wave reflection. // J. Clim. – 2003. – Vol. 16. – P. 3011 – 3026.