

**Российская академия наук**  
Сибирское отделение  
Учреждение Российской академии наук  
Институт солнечно-земной физики СО РАН

На правах рукописи

УДК 551.513

Девятова Елена Викторовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ АКТИВНОСТИ КАК ФАКТОРА ИЗМЕНЕНИЙ  
ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АТМОСФЕРЫ**

Специальность 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Иркутск – 2009**

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Научные руководители:

Доктор физико-математических наук  
Коваadlo Павел Гаврилович

Кандидат физико-математических наук  
Мордвинов Владимир Иванович

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук  
Семенов Анатолий Иванович

Кандидат физико-математических наук  
Перевалова Наталья Петровна

Ведущая организация:

Российский государственный гидрометеорологический университет

Защита диссертации состоится «17» ноября 2009 г. в \_\_ часов \_\_ минут на заседании диссертационного совета Д. 003.034.01 при Учреждении Российской академии наук Институте солнечно-земной физики СО РАН (664033, г. Иркутск, ул.Лермонтова, 126а, ИСЗФ СО РАН).  
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЗФ СО РАН

Автореферат разослан “\_\_” \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

Поляков В.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Глобальные климатические изменения вносят существенные коррективы во многие сферы человеческой деятельности, в том числе и в практику астрономических наблюдений. Эффективность наземной наблюдательной базы, весьма дорогой и громоздкой, сильно зависит от состояния астроклимата в пунктах наблюдений. Поиск мест для размещения крупных телескопов продолжает занимать центральное место в ряду астроклиматических проблем. Однако, как стало очевидно в последние годы, оценки фактических астроклиматических условий предполагаемого места установки недостаточно, все большее значение приобретает проблема прогноза возможных изменений условий наблюдения. В качестве примера можно привести высокогорные обсерватории вдоль западного побережья Южной Америки, на которых в последнее десятилетие появилась тенденция ухудшения астроклиматических характеристик. Являются ли эти изменения локальными и непродолжительными или связаны с общей глобальной тенденцией изменения общей циркуляции атмосферы не ясно, и это существенно осложняет планирование будущих астрономических наблюдений и проектирование новых обсерваторий. Поэтому представляет большой интерес попытаться связать характеристики астроклимата с метеорологическими и климатическими параметрами и оценить возможность использования последних для астроклиматического районирования и прогноза возможных изменений условий наблюдений в будущем.

Специфика задачи в том, что прогнозировать необходимо не столько средние значения метеопараметров, сколько их изменчивость, влияющую на степень неоднородности атмосферы и качество оптических наблюдений. Астроклиматическим параметром, характеризующим качество наблюдений, является оптическая нестабильность земной атмосферы (ОНЗА). Под ОНЗА здесь понимается интегральное значение неоднородностей показателя преломления атмосферы. Как показывают исследования, ОНЗА коррелирует с одной из фундаментальных метеорологических характеристик – вихревой активностью атмосферы. Действительно, в нижней тропосфере изменения вихревой активности в районах больших термических контрастов трансформируются в изменения спектров колебаний температуры и плотности атмосферного воздуха, порождая колебания оптических свойств атмосферы в пунктах астрономических наблюдений.

Прогноз вихревой активности имеет не только прикладное, но и фундаментальное значение. Важная роль вихревой активности в динамике атмосферы обусловлена сопоставимостью вихревых переносов тепла, влаги, количества движения с переносами этих субстанций крупномасштабными течениями. Быстрые изменения характера циркуляции атмосферы в последние годы сопровождаются сильными и не всегда понятными изменениями вихревой активности. Это определяет актуальность исследований вихревой активности не только в прикладном, но и в фундаментальном отношении.

К сожалению, расчеты, основанные на моделях общей циркуляции атмосферы (ОЦА), являющиеся сейчас основным инструментом исследований динамики атмосферы, имеют пространственное разрешение, недостаточное для адекватного воспроизведения вихревой активности и вихревых переносов. Для диагноза и прогноза при-

ходится использовать эмпирические методы. Такой подход был использован и в диссертационной работе. Мы попытались связать вихревую активность с крупномасштабными характеристиками циркуляции в надежде, что методы прогноза крупномасштабных элементов циркуляции окажутся более удачными, чем методы прогноза вихревой активности. На этом пути были получены важные результаты, касающиеся не только связей между вихревой активностью и общей циркуляцией атмосферы, но и механизма формирования колебаний ОЦА.

Другим возможным фактором влияния на вихревую активность является космическая погода. На это указывают серии работ Мустеля, Уилкокса, Лабицке и др. Механизмы влияния пока неизвестны, исследований в этой области немного и они находятся большей частью на стадии накопления фактов. Не претендуя на решение фундаментальных задач, в рамках диссертационной работы сделана попытка оценить количественно степень связи вихревого индекса с некоторыми из гелиогеофизических параметров. При решении прикладных задач прогноза это позволило бы более реалистично ранжировать факторы, влияющие на вихревую активность и астроклиматические характеристики.

### **Цель работы.**

Выполненная работа преследовала две цели. Во-первых, исследование возможности использования фундаментальных метеорологических характеристик, в частности, вихревой активности атмосферы, для диагностики оптической неустойчивости земной атмосферы. Во-вторых, изучение особенностей динамики вихревой активности и ее связи с общей циркуляцией атмосферы и внешними факторами для постановки задачи прогноза вихревой активности и оптической неустойчивости земной атмосферы. Для достижения поставленных целей с помощью архива данных NCEP/NCAR Reanalysis решались следующие задачи

1. Исследование особенностей пространственного распределения оптической неустойчивости и вихревой активности атмосферы на различных уровнях тропосферы и в нижней стратосфере.
2. Изучение общих тенденций в изменениях ОНЗА и вихревой активности.
3. Исследование связи вихревой активности атмосферы с основными модами циркуляции ОЦА - Арктической осцилляцией и летним Азиатским колебанием.
4. Изучение свойств Арктической осцилляции и летнего Азиатского колебания и механизмов их формирований.
5. Анализ корреляций между вихревой активностью и гелиогеофизическими характеристиками.

### **Научная новизна.**

В диссертации впервые ставится и решается задача исследования связи одной из астроклиматических характеристик – ОНЗА – с характеристиками циркуляции атмосферы. Для этой цели впервые использован архив ассимилированных данных NCEP/NCAR Reanalysis. Наибольшее влияние на вариации ОНЗА оказывают вариации вихревой активности атмосферы. Новыми являются результаты исследования связи вихревой активности с основными модами циркуляции атмосферы и квазидвухлетним колебанием (QBO), результаты изучения самих мод - Арктической осцилляции и лет-

него Азиатского колебания, а также оценки статистической связи вихревой активности с гелиогеофизическими характеристиками.

### **Достоверность.**

Достоверность научных положений и полученных результатов подтверждается большим объемом экспериментального материала, на основе которого сделаны главные выводы работы, а также применением общепринятых методик обработки данных и оценки статистической значимости результатов исследования. Сделанные научные выводы согласуются с результатами работ отечественных и зарубежных исследователей.

### **Научная и практическая значимость работы.**

Диссертационная работа, в целом, ориентирована на изучение возможности районирования и прогноза некоторых астроклиматических характеристик. За основу астроклиматического прогноза предлагается использовать прогноз основных климатических характеристик и характеристик циркуляции атмосферы. В той мере, в которой окажется возможным решение задачи климатического прогноза, можно надеяться получить и астроклиматический прогноз, если воспользоваться установленными статистическими и функциональными связями между астроклиматическими и климатическими характеристиками.

Промежуточным звеном между циркуляционными и астроклиматическими характеристиками атмосферы, рассмотренным в диссертации, является вихревая активность атмосферы. Эта важная характеристика циркуляции изучена еще совершенно недостаточно, поэтому научную ценность имеют оценки связи между вихревой активностью и колебаниями общей циркуляции атмосферы, исследование факторов, влияющих на вихревую активность атмосферы. Имеют научное значение и результаты анализа некоторых основных колебаний циркуляции атмосферы – Арктической осцилляции и летнего Азиатского колебания. В частности, приводятся доказательства ошибочности механизма самовозбуждения кольцевых мод вследствие положительной обратной связи между средним потоком и вихревой активностью в низкочастотном диапазоне.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Предложен метод диагностики оптической нестабильности земной атмосферы (ОНЗА) посредством расчета индекса вихревой активности по данным архивов ассимилированных стандартных наблюдений на сети метеорологических станций. Выполнены расчеты пространственного распределения ОНЗА и индекса вихревой активности по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis. Установлено, что вариации вихревой активности являются одной из основных причин колебаний ОНЗА в тропиках и субтропиках нижней тропосферы и в умеренных широтах на более высоких уровнях атмосферы.

2. Установлено существование значимых связей между вихревым индексом и интенсивностью субтропических антициклонов. Это указывает либо на эффект «накопления» барических аномалий вихрей, либо на активное влияние субтропических антициклонов на вихревую активность в тропиках и субтропиках.

3. Показано, что вихревая активность не является частью механизма раскачки кольцевых мод (Арктической и Антарктической осцилляций) в низкочастотном диапазоне. На это указывает отсутствие значимых корреляций между индексом вихревой активности в полярнофронтальной зоне и колебаниями Арктической и Антарктической осцилляций. Установлена тесная связь между раскачкой летнего Азиатского колебания и вариациями метеорологических характеристик в области Циркумантарктической депрессии.

4. Проведена оценка влияния на вихревую активность атмосферы геомагнитной возмущенности и 11-летнего солнечного цикла с учетом фазы квазидвухлетнего колебания (Quasi Biennial Oscillation - QBO) зонального ветра в экваториальной стратосфере. Учет QBO позволяет получить более четкий солнечный сигнал, однако этот сигнал значим лишь в низкоширотной стратосфере в переходные сезоны года. Гипотеза о том, что влияние QBO на уровень волновой/вихревой активности и интенсивность Полярного вихря происходит благодаря сдвигу поверхности нулевого зонального ветра, получила подтверждение для периода установления зимней циркуляции. Во второй половине зимы действие данного механизма не подтверждается.

#### **Апробация работы.**

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на международных симпозиумах «Atmospheric and ocean opt. Atmospheric physics» в г. Томске в 2004, 2006 и 2008 гг., а также на Международном Симпозиуме стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» в г. Санкт – Петербурге в 2009 г.

#### **Публикации.**

Основное содержание диссертации опубликовано в восьми работах, три из которых - в журнале «Оптика атмосферы и океана» и одна - в журнале «Метеорология и гидрология».

#### **Личный вклад автора.**

Основные результаты являются оригинальными и получены либо лично автором, либо при непосредственном его участии. При выполнении работ, опубликованных в соавторстве, автор участвовал в постановке задачи, обработке и интерпретации результатов расчетов.

#### **Структура диссертации.**

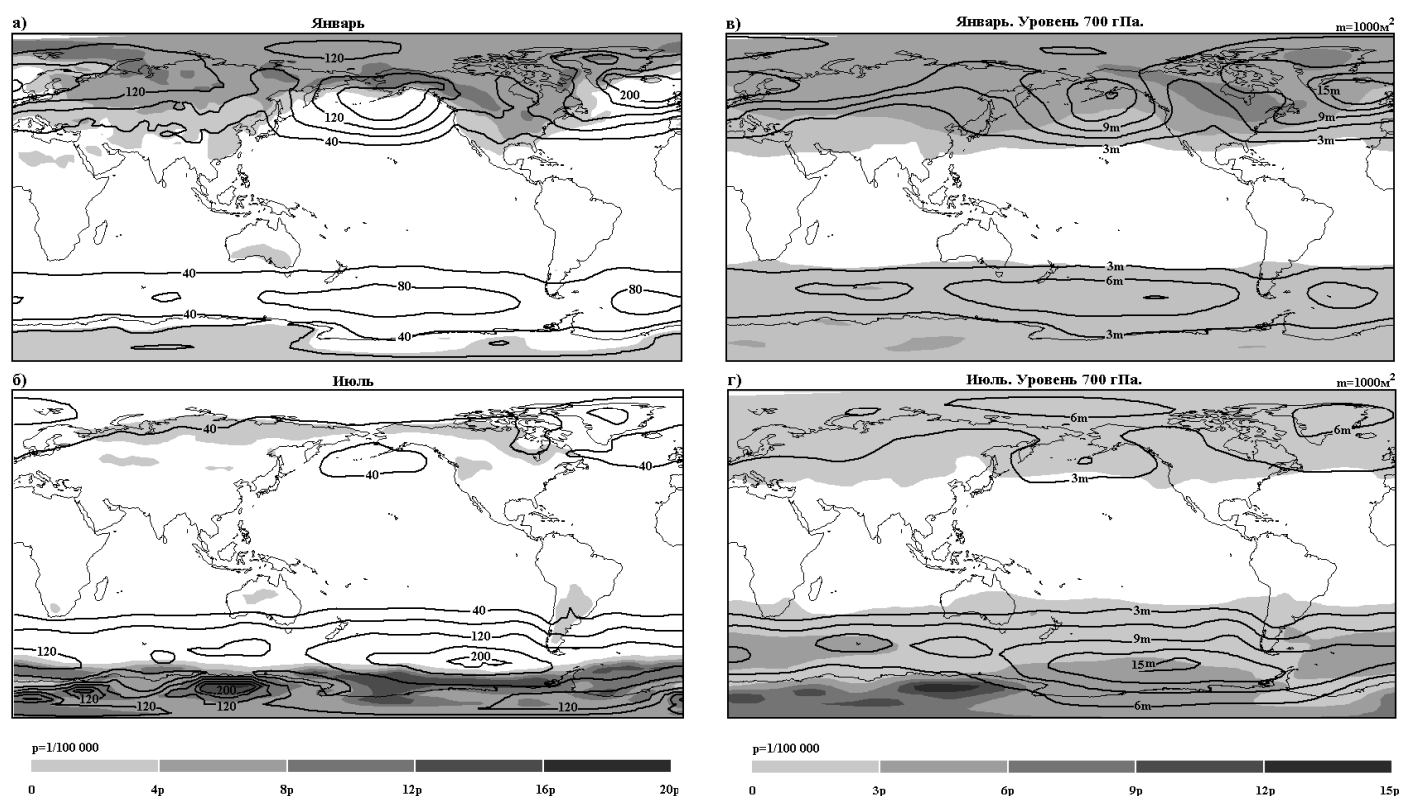
Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 144 страницы печатного текста, включая 50 рисунков и список литературы из 72 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, поставлены основные задачи и, в общих чертах, сформулированы положения, выносимые на защиту.

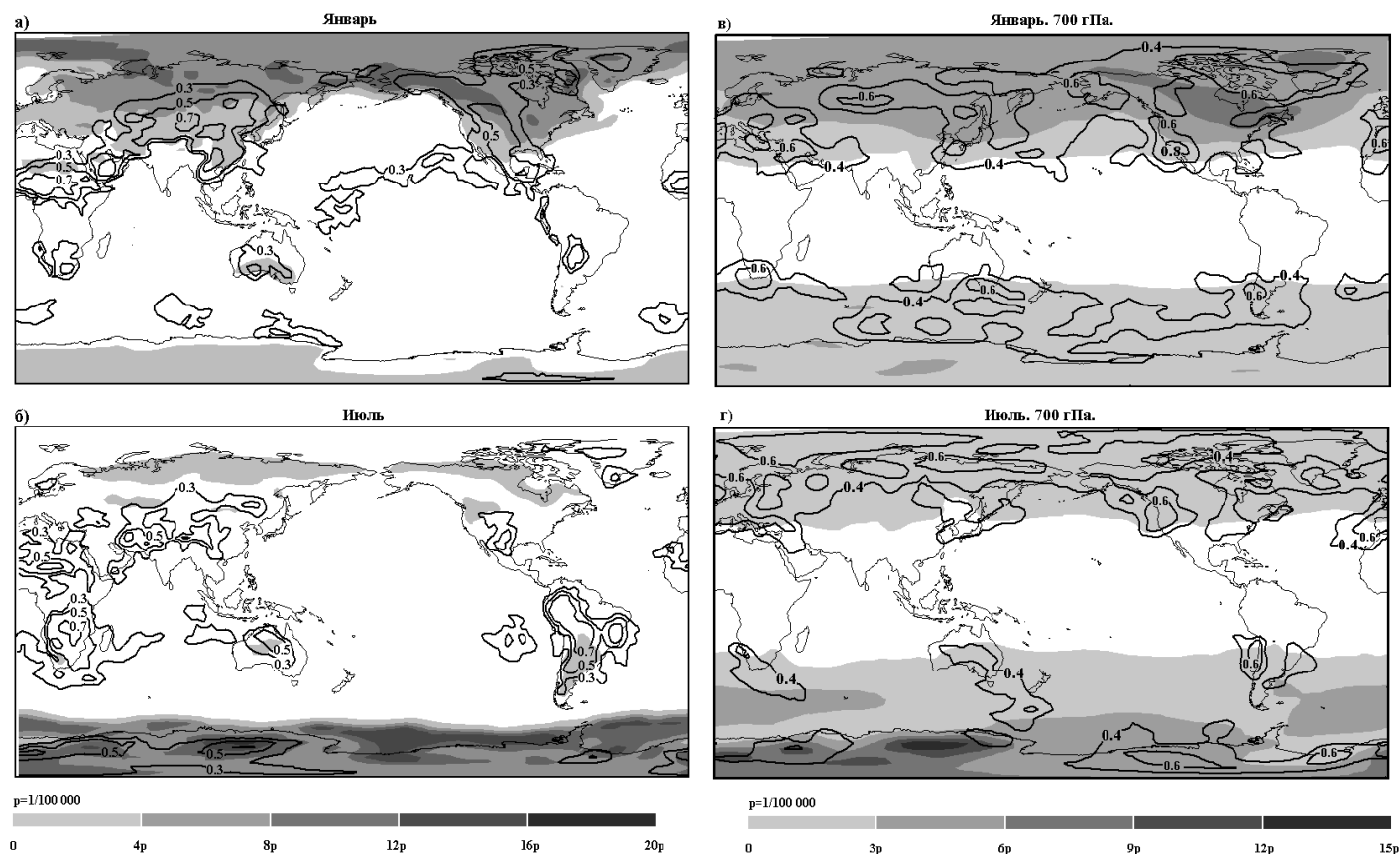
**В первой главе** обсуждается постановка задачи исследования колебаний оптической неустойчивости, методика и результаты расчетов оптической неустойчивости и вихревой активности атмосферы. В §1.1 рассматриваются особенности пространственной структуры изучаемых характеристик, необходимые для астроклиматического

районирования территорий. На рис.1 приведен пример расчета пространственных распределений ОНЗА и индекса вихревой активности атмосферы на уровне земли (а, б) и на уровне 700 гПа (в, г) в январе и июле. Обращается внимание на различие распределений над континентами и океанами, а также на разных уровнях тропосферы и стратосферы. В нижней тропосфере различия можно объяснить свойствами подстилающей поверхности, а на верхних уровнях - разными механизмами формирования вихревой активности.



**Рис. 1.** Распределения параметра ОНЗА и вихревой активности на уровнях 1000 гПа (а, б) и 700 гПа (в, г) в январе и июле. Изолинии - распределение вихревого индекса с дискретностью  $40 \text{ м}^2$  (40, 80, 120...) на уровне 1000 гПа, и с дискретностью  $3 \text{ м}$  (3m, 6m, 9m...) на уровне 700 гПа,  $m = 1000 \text{ м}^2$ . Сплошная заливка отражает распределение ОНЗА в условных единицах.

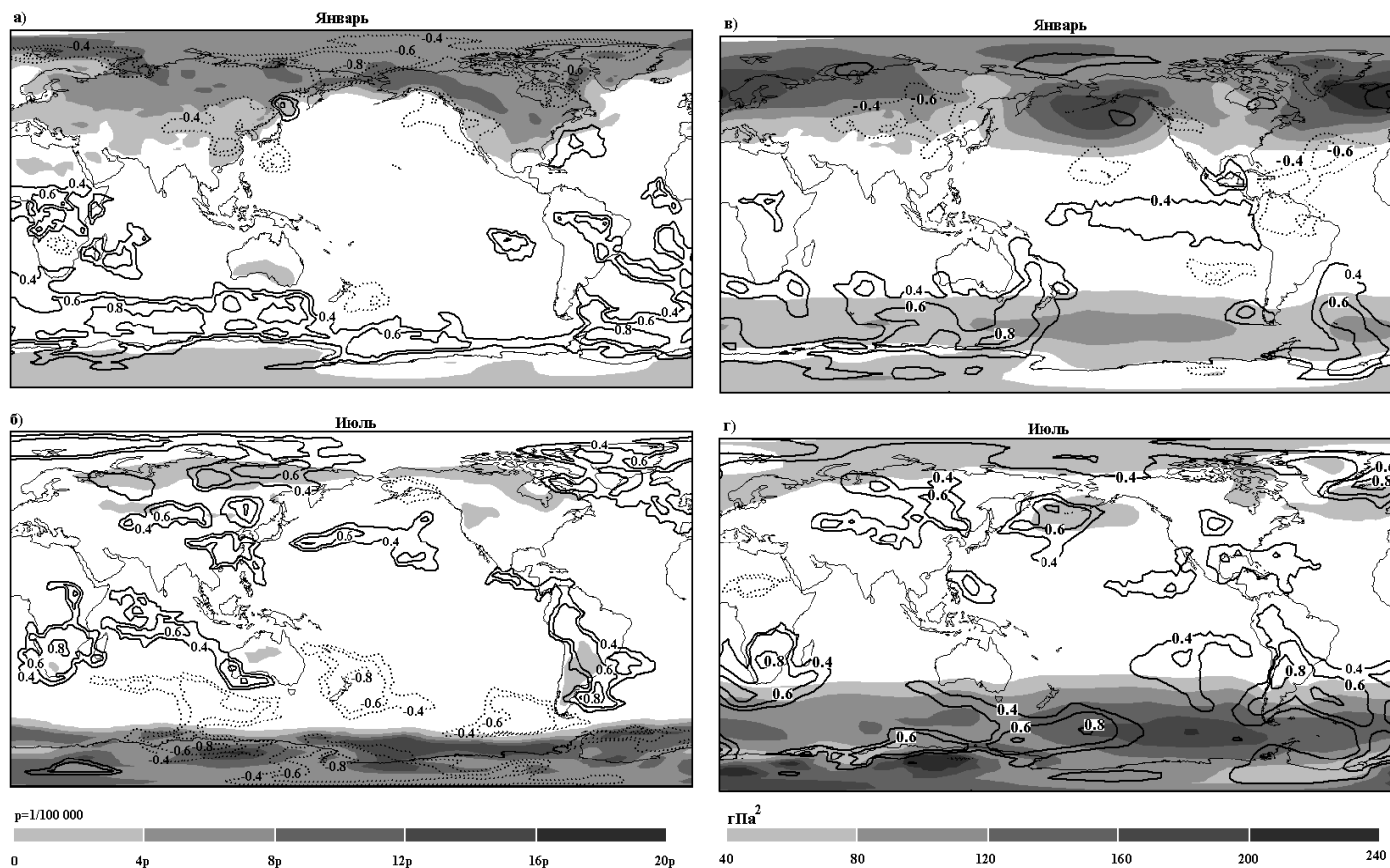
В §1.2 приводятся результаты исследований связи между вариациями ОНЗА и вихревой активности на межгодовых интервалах времени. Эти исследования важны для постановки задачи прогноза долговременных изменений ОНЗА. Оказалось, что отнюдь не везде одинаковые аномалии ОНЗА и вихревой активности совпадают с аномалиями в распределении коэффициентов корреляции. В нижней тропосфере (рис.2 а,б) корреляции выше в низких широтах, имеющих низкую вихревую активность. В средней тропосфере (рис.2 в,г), а также в верхней тропосфере и стратосфере области повышенной корреляции смещаются в высокие широты. Полученные особенности можно объяснить формированием температурных аномалий адиабатическими и неадиабатическими источниками.



**Рис. 2.** Распределения коэффициентов корреляции межгодовых вариаций среднемесячных значений ОНЗА с изменениями вихревой активности на уровнях 1000гПа (а, б) и 700гПа (в, г) в январе и июле за период с 1950 по 2006 гг. Заливка отражает приземное распределение параметра ОНЗА.

В § 1.3 оцениваются тенденции долговременных изменений оптической неустойчивости и вихревой активности. Используется простой, но достаточно эффективный метод расчета коэффициентов корреляции этих величин с линейно возрастающей функцией. Пример расчета пространственного распределения коэффициентов корреляции для приземного слоя приведен на рис.3. Такой способ оценки приближителен, однако нагляден и позволяет оценивать общие тенденции в динамике величин на всем земном шаре. Полученные распределения отражают сложный характер долговременных изменений ОНЗА и вихревой активности в нижних слоях атмосферы. Сильное возрастание и вихревой активности, и оптической неустойчивости атмосферы происходит в умеренных и высоких широтах Южного полушария. Вероятно, это связано со значительными изменениями в этих районах общей циркуляции атмосферы.





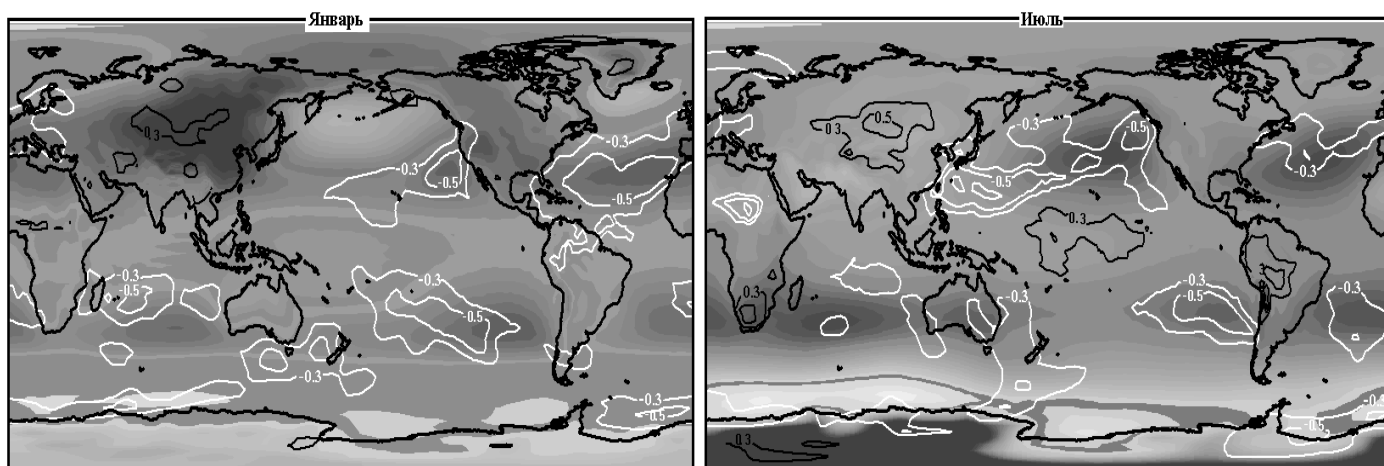
**Рис. 3.** Распределения коэффициентов корреляции межгодовых вариаций среднемесячных значений ОНЗА (а, б) и вихревой активности (в, г) с линейно возрастающей функцией в январе и июле в приземном слое за период с 1950 по 2006 гг. Нанесены изолинии коэффициентов корреляции в диапазонах абсолютных значений от 0.4 до 0.8. Заливка отражает приземное распределение параметра ОНЗА (а, б) и вихревой активности (в, г).

**Вторая глава** диссертации посвящена поискам связи вихревой активности с характеристиками общей циркуляции атмосферы. Это необходимо для прогноза вихревой активности, так как низкое пространственное разрешение современных климатических моделей не позволяет напрямую моделировать и прогнозировать изменчивость циркуляции атмосферы.

В § 2.1 содержится краткий обзор общей циркуляции атмосферы и тех ее характеристик, которые могут иметь отношение к генерации вихревой активности. Для анализа выбраны характеристики собственных колебаний ОЦА и центров действия атмосферы. Собственные колебания ОЦА чаще всего ассоциируются с раскачкой струйных течений и генерацией вихрей. Центры действия атмосферы могут быть связаны с долговременными изменениями вихревой активности. Для расчета их характеристик не требуется применение каких-либо специальных методов, достаточно измерений приземного давления вблизи центров аномалий.

Параграф 2.2 посвящен количественным оценкам связи между вариациями вихревой активности и центрами действия атмосферы. Приводятся результаты расчета полей коэффициентов корреляции между вариациями индекса вихревой активности и изменениями приземных барических полей в январе (рис.4, слева) и июле (рис.4, справа). Эти распределения сопоставлялись затем с центрами действия атмосферы, которые хорошо видны в климатических аномалиях приземного барического поля. Не под-

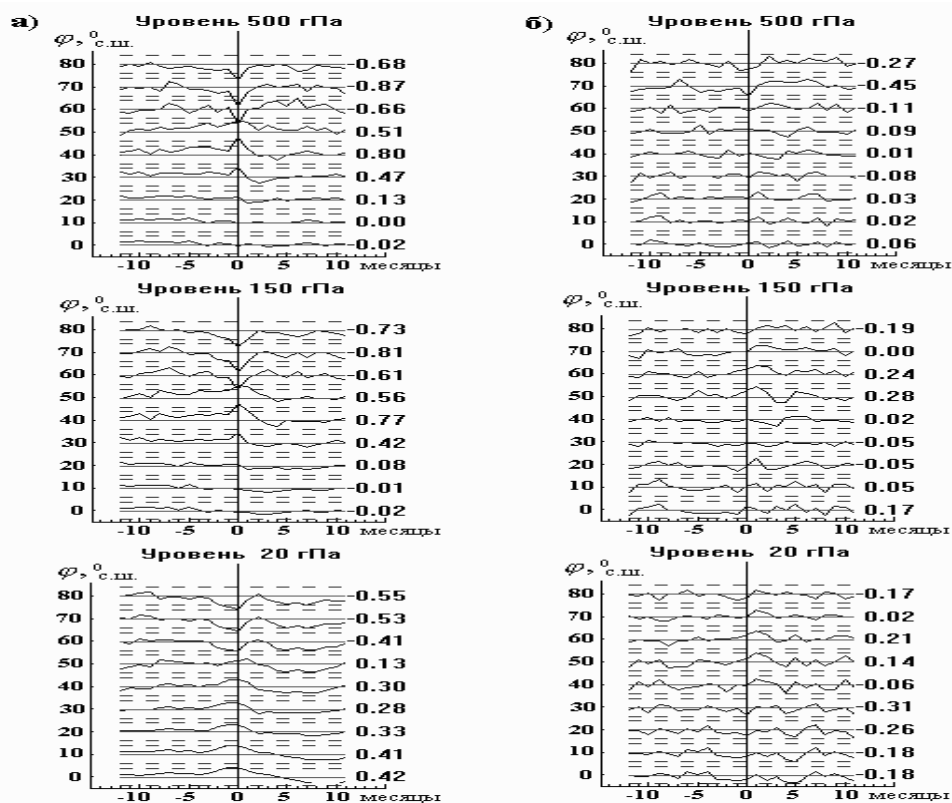
твердилась гипотеза тесной связи долговременных вариаций вихревой активности с изменениями океанических центров действия низкого давления. С другой стороны, значимыми являются корреляции между вихревым индексом и интенсивностью субтропических антициклонов. Это указывает либо на эффект «накопления» барических аномалий вихрей, либо на активное влияние субтропических антициклонов на вихревую активность в тропиках и субтропиках.



**Рис. 4.** Поля коэффициентов корреляции между вариациями вихревой активности и средними приземными барическими полями (изолинии). Изолинии коэффициентов корреляции нанесены в диапазонах абсолютных значений от 0.3 до 0.9. Черный цвет – положительные изокорреляты. Белый цвет – отрицательные изокорреляты. Заливкой выделены распределения приземного барического поля, усредненные за период с 1950 по 2006 гг. Аномалии приземного барического поля определяют положения океанических и континентальных центров действия атмосферы.

Интересными оказались результаты сопоставления вихревой активности с основными собственными колебаниями ОЦА - кольцевыми модами и летним Азиатским колебанием, рассмотренные в § 2.3. В данном параграфе обсуждается методика обработки данных. Этот аспект важен, так как получаемые корреляции чаще всего невелики, а временные ряды не являются выборками из генеральных совокупностей. Поэтому статистические оценки необходимо дополнять физическими сопоставлениями.

В параграфе 2.3.1. вихревая активность сопоставляется с кольцевыми модами. Учитывая приблизительную зональную симметрию кольцевых мод, в этом параграфе сравниваются вариации индексов Арктической осцилляции (АО) и Антарктической осцилляции (ААО) с вариациями зонально усредненных характеристик вихревой активности и средними полями давления, температуры и зональной скорости. На рис.5 приведены распределения коэффициентов корреляции индекса АО с вариациями средней высоты изобарических поверхностей (а) и вариациями индекса вихревой активности (б) со сдвигом во времени. При нулевом сдвиге между величинами средние поля достаточно хорошо отражают структуру кольцевых мод на разных уровнях атмосферы и в разных широтных зонах. Связь с вихревой активностью гораздо слабее и отражает, по нашему мнению, не механизм раскачки кольцевых мод, а вторичные эффекты влияния колебаний на структуру и интенсивность бароклинных зон. Это предположение подтверждает сопоставление вихревой активности с вариациями Антарктической осцилляции и пространственная структура корреляций. Видимо, в пространственную структуру корреляций дает вклад и изменение со временем структуры кольцевых мод.



**Рис. 5.** Коэффициенты корреляции межгодовых вариаций индекса АО в январе за период с 1950 по 2005 гг. со среднезональной высотой изобарических поверхностей (а) и интенсивностью вихревой (б) активности на уровнях 500, 150, 20 гПа со смещением между величинами от  $-12$  до  $+12$  месяцев. Числа справа – коэффициенты корреляции между индексом АО и соответствующими величинами при нулевом сдвиге.

В § 2.3.2 вихревая активность сопоставляется с летним Азиатским колебанием (АК). В отличие от других собственных атмосферных колебаний это колебание глобально и включает аномалии циркуляции в Северном и Южном полушариях. Механизм раскачки, видимо, не связан со струйными течениями и может влиять на вихревую активность лишь опосредованно, через изменение структуры бароклинных зон полушарий. Связь колебаний АК с вихревой активностью действительно оказалась низкой, однако, учитывая важность летнего Азиатского колебания в долговременных изменениях не только в Южном полушарии, но и во внутриконтинентальных районах Азии, мы предприняли исследование самого колебания, попытавшись оценить причины его возникновения. Сопоставлялись варианты возбуждения АК Южной Осцилляцией или аномалиями циркуляции в районе Циркумантарктической депрессии, где находится один из полюсов АК. Выполненные оценки величины и характера корреляционной связи отдают предпочтение возбуждению колебаний в области Циркумантарктической депрессии. Этот результат может быть полезен при выяснении причин долговременных изменений общей циркуляции атмосферы.

В третьей главе диссертации выполнены сопоставления вихревой активности с вариациями гелиогеофизических факторов и квазидвухлетним колебанием. Механизмы влияния космической погоды на вихревую активность пока достоверно не установлены, скорее всего, промежуточным звеном является ОЦА, однако работы Уилкокса и Мустеля позволяют предположить, что связь между этими явлениями может быть

не опосредованной, а прямой. В качестве индексов, характеризующих гелиогеофизическую активность, были использованы числа Вольфа  $R_z$ , являющиеся индикатором активных процессов на Солнце, и Ар-индекс, представляющий собой эквивалентную среднесуточную планетарную амплитуду геомагнитных возмущений.

В § 3.1 исследовано влияние гелиогеофизической активности на вихревую активность атмосферы. Параграф 3.1.1 посвящен анализу влияния 11-летнего солнечного цикла. В работах Лабицке с соавторами показано, что влияние солнечной активности на характеристики атмосферы модулируется квазидвухлетними колебаниями (QBO) зонального ветра в экваториальной стратосфере. Однако Лабицке исследовала влияние солнечной активности только на средние характеристики атмосферы. Мы дополнили анализ средних полей анализом распределений индекса вихревой активности, рассчитав разности уровня вихревой активности между солнечными максимумами и минимумами для каждой из фаз QBO. Как и для разностей геопотенциальных высот, различия в уровне вихревой активности в целом имеют противоположный знак в разных фазах QBO, что наиболее четко проявляется во вторую половину зимы в средней и верхней тропосфере и нижней стратосфере. Следует отметить, что достоверность полученных выводов не очень высока из-за относительно небольшой длины временных рядов с разным уровнем солнечной активности.

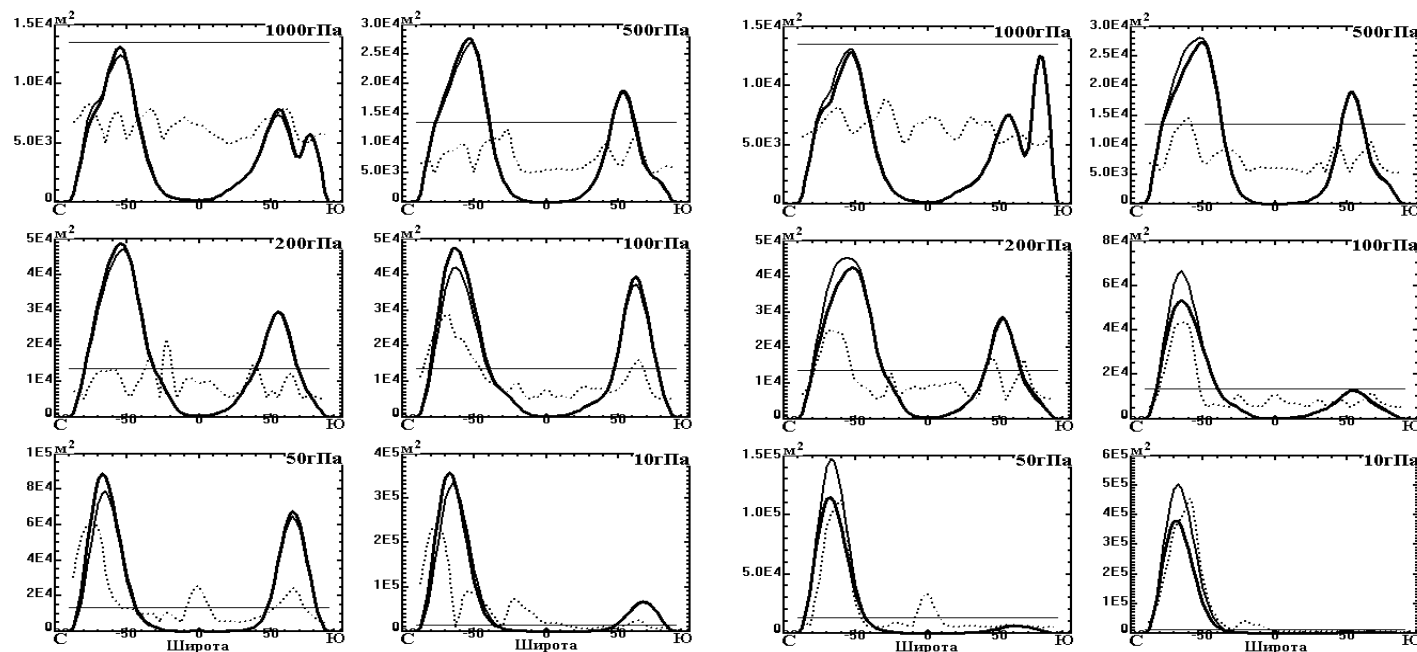
В § 3.1.2 по методике, применявшейся в предыдущем разделе, рассчитаны разности геопотенциальных высот и уровня вихревой/волновой активности между периодами максимальной и минимальной геомагнитной возмущенности в зимний сезон. Ранней зимой в тропосфере в максимуме геомагнитной активности давление понижается практически во всей полярной области и на северо-востоке Евразии, и растет в Центральной Атлантике и умеренных широтах Тихого океана. В стратосфере аномалии давления имеют противоположный знак.

Вихревая активность в максимуме геомагнитной возмущенности ранней зимой повышается вдоль побережий материков, и понижается над Атлантикой и умеренными широтами Тихого океана. Во второй половине зимы в тропосфере повышение уровня вихревой активности в геомагнитном максимуме происходит на севере Тихого океана и вдоль северных побережий материков, понижение – над Атлантикой и умеренными широтами Евразии. Полученные приземные распределения разностей вихревой активности в общих чертах совпадают с результатами Мустеля.

В § 3.2 проведено отдельное исследование влияния QBO на вихревую активность атмосферы. Наиболее разработанным механизмом влияния экваториальной QBO на внетропическую циркуляцию является гипотеза широтного сдвига поверхности нулевого зонального ветра в зависимости от фазы цикла. При восточных экваториальных ветрах линия нулевого зонального ветра смещается в сторону высоких широт, и меридиональное распространение планетарных волн ограничивается более узкой широтной зоной, вследствие чего вихревая/волновая активность в средних и высоких широтах при Восточной фазе QBO должна быть выше. Как показали результаты нашего исследования, в ноябре-декабре в период установления зимней циркуляции вихревая/волновая активность при Восточной фазе действительно имела более высокий уровень, чем при Западной фазе. Однако во второй половине зимы более высокий уровень вихревой/волновой активности был характерен не для Восточной, а для Западной фазы, причем это не привело к более сильному воздействию волн на средний поток. Наоборот, в Западной фазе QBO Полярный вихрь усиливался. Рис.6 иллюстрирует

найденные различия в амплитуде стационарных волн в начале и конце зимы. На рисунки нанесены широтные зависимости характеристики амплитуд стационарных волн для Западной и Восточной фазы QBO. Для амплитуд бегущих волн характерны аналогичные различия в зависимости от фазы QBO и от времени, что и для амплитуд стационарных волн.

С прикладной точки зрения воздействие на вихревую активность гелиогеофизических факторов имеет второй порядок значимости. Различия в уровне вихревой активности между максимумами и минимумами солнечной и геомагнитной активности, в целом, имеют низкую статистическую достоверность и не могут представлять особого интереса для прогноза долговременных астроклиматических изменений



**Рис. 6.** Характеристики амплитуды стационарных волн в первой половине зимы (слева) и второй половине зимы (справа). Тонкая линия – Западная фаза QBO. Толстая линия – Восточная фаза QBO. Линия, параллельная оси X – уровень значимости 95%. Пунктирная кривая – статистические значимости разностей амплитуд стационарных волн.

**В Заключение** подведены итоги диссертации. Обсуждены различные аспекты постановки задачи прогноза долговременных изменений ОНЗА и вихревой активности. Прогноз долговременных изменений вихревой активности пока невозможен без использования эмпирических соотношений, связывающих вихревую активность с характеристиками общей циркуляции атмосферы. Выполненные статистические оценки дают нижний порог связи вихревой активности с некоторыми из выбранных характеристик. Безусловно, с учетом дополнительных факторов этот уровень связи может быть повышен.

Особое внимание в диссертации было уделено исследованию связи между вихревой активностью и важнейшими собственными колебаниями ОЦА – кольцевыми модами и летним Азиатским колебанием. Кольцевые моды представляли наибольший интерес, поскольку связь с вихревой активностью традиционно считается основой механизма раскачки колебаний. Корреляция между вариациями индекса Арктической осцилляции и вихревым индексом действительно была установлена, но она не является результатом механизма раскачки, а, скорее, следствием влияния Арктической ос-

цилляции на общую циркуляцию атмосферы. Этот результат стимулировал поиски других возможных механизмов раскачки кольцевых мод. Было показано, что в низкочастотном диапазоне таким механизмом может быть воздействие на полярнофронтальные струйные течения крутильных колебаний. В отличие от корреляций с вихревой активностью этот механизм одинаково проявляется и в Северном и в Южном полушарии.

В отличие от кольцевых мод, летнее Азиатское колебание привлекло наше внимание по другим причинам. Это колебание имеет глобальную структуру, совпадающую со структурой наиболее сильных трендов в приземном барическом поле Северного и Южного полушарий. Близкую структуру, кстати, имеют отклики ОЦА на колебания ЭНЮК (Эль-Ниньо - Южное колебание). Учитывая то, что в Южном полушарии наблюдаются значительные тренды вихревой активности, представляло интерес оценить связь между ними. Дополнительное исследование показало, что источником глобальных колебаний ОЦА, имеющих структуру летнего Азиатского колебания, скорее всего, являются процессы в Циркумантарктической депрессии.

Были получены важные результаты, касающиеся механизма воздействия экваториальной QBO на возмущенность атмосферы внетропических широт. Увеличение уровня вихревой активности при Восточной фазе вследствие сдвига к северу линии нулевого зонального ветра, ограничивающей меридиональное распространение планетарных волн, имеет место в период установления зимней циркуляции. Во второй половине зимы наоборот, более высокий уровень вихревой/волновой активности отмечается в Западной фазе и сопровождается не ослаблением, а углублением Полярного вихря. Этот результат заставляет усомниться в возможности влияния экваториальной QBO посредством сдвига критической линии на установившуюся зимнюю циркуляцию и на внезапные стратосферные потепления.

В прикладном отношении к наиболее важным результатам относится выявление областей высокой корреляции вариаций вихревой активности и оптической неустойчивости в тропиках и субтропиках нижней тропосферы и в умеренных широтах на более высоких уровнях на межгодовых масштабах времени, а также долговременных тенденций в изменении обеих характеристик. Оценки показали сильное возрастание за последние 20 лет оптической неустойчивости и вихревой активности в умеренных и высоких широтах Южного полушария, что указывает на изменение характера циркуляции атмосферы в этом районе.

Обнаружены значимые корреляции между вихревой активностью и субтропическими антициклонами. Это указывает либо на эффект «накопления» барических аномалий вихрей, либо на активное влияние субтропических антициклонов на вихревую активность в тропиках и субтропиках – районах с благоприятным астроклиматом. Гипотеза тесной связи долговременных вариаций вихревой активности с океаническими центрами действия низкого давления не подтвердилась.

### **Основные результаты работы.**

Построены и исследованы пространственные распределения оптической неустойчивости земной атмосферы на различных уровнях тропосферы и в нижней стратосфере по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis. В нижней тропосфере ОНЗА оказалась значительной в областях повышенной циклонической активности вблизи береговых линий и фронтальных зон. Это можно было ожидать, учитывая адвективный ха-

рактер вариаций температуры в нижних слоях атмосферы. В верхней тропосфере и стратосфере более высокие значения ОНЗА отмечались в районах с неустойчивой циркуляцией вблизи струйных течений и в области Полярного вихря. Это указывает на повышенную роль вихревой активности в формировании ОНЗА.

Изучены пространственные распределения вихревой активности в тропосфере и стратосфере. Для оценки вихревой активности использован вихревой индекс, предложенный Wallace и Hsu. Распределения вихревой активности сопоставлены с распределениями ОНЗА. В нижней тропосфере различия существенны и обусловлены тем, что кроме вихревой активности для возникновения оптической неустойчивости атмосферы необходимы горизонтальные градиенты температуры. На более высоких уровнях вариации температуры носят конвективный характер, и роль вихревой активности выше.

Учитывая большое значение вихревой активности в формировании температурных вариаций, исследованы распределения коэффициентов корреляции межгодовых вариаций ОНЗА и вихревой активности. В нижней тропосфере более высокий уровень связи отмечен в тропиках и субтропиках, т.е. там, где абсолютные значения ОНЗА не очень высоки и условия для астрономических наблюдений лучше, чем в умеренных широтах. В этих районах прогноз долговременных изменений ОНЗА можно строить на основе прогноза вихревой активности. В верхней тропосфере и стратосфере коэффициенты корреляции выше в умеренных широтах, там, где вихревая активность является основной причиной колебаний температуры.

Выполнена оценка долговременных тенденций изменений ОНЗА и вихревой активности. Наибольшие темпы возрастания обеих характеристик отмечены в Южном полушарии. Там же наиболее сильными являются и изменения общей циркуляции атмосферы. В Южном полушарии размещена сеть оптических инструментов, поэтому прогноз изменений астроклимата особенно важен.

Прогноз изменений вихревой активности представляет более сложную задачу, чем прогноз средних полей, и выполняется статистическими методами. Для их применения необходимо выявление объектов ОЦА, с которыми вихревая активность имела бы более тесную связь. В диссертации вариации вихревой активности были сопоставлены с вариациями среднего приземного барического поля, центрами действия атмосферы и основными модами колебаний циркуляции атмосферы – Арктической и Антарктической осцилляциями, летним Азиатским колебанием. Рассчитанные коэффициенты корреляции менялись в зависимости от сезона и географического положения региона. Необходимы дальнейшие исследования для выделения наиболее устойчивых и физически обоснованных связей.

Более детально были изучены связи между вихревой активностью и кольцевыми модами – Арктической и Антарктической осцилляциями. Эта задача имеет не только прикладное, но и фундаментальное значение, поскольку вихревая активность считается основным элементом раскачки колебаний. Полученные оценки поставили под сомнение эффективность данного механизма. Была найдена еще одна возможная причина раскачки кольцевых мод в низкочастотном диапазоне – крутильные колебания.

Важное значение имело исследование летнего Азиатского колебания. Корреляция этой моды с вихревой активностью оказалась невысокой, однако сделанные оценки позволили пролить свет на источник колебаний. Рассматривались два варианта – влияние ЭНЮК и раскачка в районе Циркумантарктической депрессии. Второй вариант оказался предпочтительнее, так как обладал более высокой теснотой связи с лет-

ним Азиатским колебанием и долговременными тенденциями изменения давления в восточном полушарии.

В рамках диссертации выполнено сопоставление вихревой активности в периоды высокой и низкой солнечной активности, при разных фазах QBO и в периоды с высоким и низким уровнем геомагнитной возмущенности. Из-за небольшой длины рядов надежность этих сравнений не очень высока. Можно говорить о том, что данные эффекты играют второстепенную роль в изменениях вихревой активности и не представляют интереса для прогноза долговременных астроклиматических изменений.

Исследования воздействия экваториальной QBO на возмущенность атмосферы показали, что во внетропических широтах увеличение уровня вихревой активности при Восточной фазе вследствие сдвига к северу линии нулевого зонального ветра имеет место в начале зимы. В конце зимы более высокий уровень вихревой/волновой активности отмечается в Западной фазе. Это позволяет усомниться в возможности влияния экваториальной QBO посредством данного механизма на установившуюся внетропическую зимнюю циркуляцию, а также на внезапные стратосферные потепления.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

1. Е.В. Девятова, В.И. Мордвинов, А.С. Иванова, И.В. Латышева. Связь межгодовых вариаций приземного давления в Азии с явлением Эль-Ниньо и изменениями циркуляции в Южном полушарии. *Оптика атмосферы и океана*. - 2005. - 18. - №8. - с.688-693.

2. A.A.Fomenko, V.I.Mordvinov, S.I.Molodykh, E.V.Devyatova, A.S.Ivanova, I.V.Latysheva, Comparison of the atmospheric response to sea surface temperature anomalies according to observations and model simulations, *Bull. NCC. Ser. Num. Model. Atmosph., Ocean and Environment Studies* – 2005. - Iss. 10 - P. 1-10.

3. В.И. Мордвинов, А.С. Иванова, Е.В. Девятова. Геомагнитная активность и общая циркуляция атмосферы. «Солнечно-земная физика». Вып.10 (2007), с.16-24.

4. В.И. Мордвинов, А.С. Иванова, Е.В. Девятова. Связь межгодовых вариаций арктического и антарктического колебаний с характеристиками вихревой и волновой активности. «Метеорология и гидрология», №8 (2008), с.20-36.

5. Е.В. Девятова, П.Г. Ковадло, В.И. Мордвинов. Пространственная структура и долговременные изменения оптической неустойчивости атмосферы по данным NCEP/NCAR Reanalysis. «Оптика атмосферы и океана», 21, № 12 (2008), с.1043-1049.

6. В.И. Мордвинов, А.С. Иванова, Е.В. Девятова. Возбуждение Арктической осцилляции крутильными колебаниями. «Оптика атмосферы и океана», 22, №2 (2009), с.193-200.

7. Е.В.Девятова, В.И.Мордвинов, А.С.Иванова, И.В.Латышева, Долговременные изменения вариаций приземного барического поля в Северном полушарии по данным NCEP/NCAR Reanalysis, *Современные проблемы экологии, природопользования и ресурсосбережения. Сб. научных статей*. Иркутск, 2004. с. 101-108.

8. В.И.Мордвинов, А.С.Иванова, Е.В.Девятова. Арктическая осцилляция и тропосферно-стратосферные взаимодействия. «Солнечно-земная физика». Вып.10 (2007), с.106-112.