

**Министерство образования и науки РФ  
Федеральное агентство по образованию**

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (РГГМУ)**

**На правах рукописи  
УДК 551.513.3+523.31**

**Вершовский Михаил Георгиевич**

**МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРОВ ДЕЙСТВИЯ  
АТМОСФЕРЫ И ВАРИАЦИИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ**

**25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук**

**Санкт-Петербург 2008**

Диссертация выполнена в Российском Государственном  
Гидрометеорологическом университете (РГГМУ)

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор  
К.В. Кондратович

Официальные оппоненты: доктор географических наук, профессор  
А.И. Угрюмов,  
доктор географических наук  
А.Е. Антонов

Ведущая организация: Арктический и Антарктический научно-  
исследовательский институт (ААНИИ)

Защита состоится 15 мая 2008 г. в 15 часов 30 минут на заседании  
Диссертационного совета Д212.197.01 при Российском Государственном  
Гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург,  
Малоохтинский пр. 98 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского  
Государственного Гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_апреля 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук  
проф. А.Д. Кузнецов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Проблема изменений режима общей циркуляции атмосферы (ОЦА) является ключевой в современных исследованиях в гидрометеорологии и климатологии. Накопленные архивы уточненных и структурированных данных гидрометеорологических и геофизических величин, ставшие доступными для исследователей благодаря усилиям ряда международных и национальных служб и организаций, позволили провести детальный и многосторонний анализ многолетних изменений состояния центров действия атмосферы, определяющих режим ОЦА.

Работы, начатые в 1940-1950-х гг. в Массачусетском институте технологии (Кембридж, США) по инициативе профессора В. Старра, выявили и обосновали взаимосвязь между состоянием общей циркуляции атмосферы и флуктуациями скорости вращения Земли. Эти исследования были продолжены учениками и последователями Старра. Комплексный подход к проблеме взаимосвязи орбитальных характеристик вращения Земли (неравномерности скорости вращения, нутаций, чандлеровского движения полюсов, а также астродинамических характеристик системы Земля-Луна) с состоянием атмосферы и гидросферы был предложен российским ученым Н.С. Сидоренковым.

Существование взаимосвязи состояния атмосферы и орбитальных характеристик вращения планеты (в т.ч. колебаний скорости ее вращения) на данный момент является практически общепризнанным в структуре наук о Земле. Работы в этой области успешно ведутся уже несколько десятилетий. При всем разнообразии подходов в подобных исследованиях обнаруживается общая доминанта.

Проведенные работы в подавляющем большинстве сосредоточены на оценке вклада суммарного движения планетарной атмосферы в колебания скорости вращения Земли. Данные глобальных наблюдений используются в численных моделях, позволяющих рассчитывать угловой момент атмосферы в целом.

В результате была установлена тесная связь между изменениями углового момента глобальной атмосферной массы и колебаниями скорости вращения Земли ( $r > 0,90$ ). Отсюда вытекает возможность использования данных об изменении скорости вращения планеты (выражаемых через изменение длительности суток  $\Delta LOD$ ) в качестве индикатора глобальных процессов в атмосфере.

С другой стороны, глобальный подход к проблеме, сосредоточенный на расчете динамики всей массы атмосферы, исключает из общей модели региональные циркуляционные процессы. Известно, однако, что режим и

состояние общей циркуляции атмосферы зависят от состояния (интенсивности и локализации) центров действия атмосферы – квазистационарных барических образований, определяющих ход не только региональных, но и глобальных макропогодных и климатических процессов. Но состояния отдельно взятых ЦДА оказываются вынесенными за рамки существующих моделей. Кроме того, подобный подход демонстрирует высокую степень надежности при анализе сезонных (и отчасти межгодовых) изменений  $\Delta LOD$  в увязке с глобальной атмосферной динамикой, однако многолетние (декадные и вековые) вариации скорости вращения Земли упомянутыми моделями не рассматриваются и не объясняются.

**Цель работы.** В соответствии с отмеченными выше моментами была определена цель настоящего исследования: выявление закономерностей многолетних изменений интенсивности и локализации ЦДА в их взаимосвязи друг с другом и с вариациями скорости вращения Земли.

**Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:**

- расчет среднемесячных значений экстремального давления и локализации экстремумов давления в ЦДА по многолетним (1900-2004 гг.) данным барических полей и статистическая обработка полученных результатов;
- расчет среднегодовых индексов интенсивности (статистических показателей динамического состояния ЦДА);
- анализ хода индекса интенсивности и географического положения ЦДА;
- оценки статистической взаимосвязи хода интенсивности различных ЦДА;
- выявление и анализ статистических связей многолетнего хода интенсивности ЦДА и хода среднегодовых значений  $\Delta LOD$ ;
- выявление связи  $\Delta LOD$  и локализации экстремумов давления в ЦДА.

**Методы исследования.** Компьютерная обработка массивов данных барических полей с выделением экстремумов давления и их географического положения; первичная статистическая обработка (разбиение полученных данных на равновероятностные градации); перевод качественных статистических оценок в количественный индекс интенсивности  $I_{INT}$ ; корреляционный анализ (включающий в себя расчет корреляционных функций и определение временных лагов для максимальных коэффициентов корреляции).

**Научная новизна.** В ходе работы были рассчитаны среднемесячные и среднегодовые динамические характеристики (интенсивность и локализация

экстремумов) океанических центров действия атмосферы обоих полушарий по значительному временному ряду в 105 лет (1900-2004 гг.).

Предложен новый показатель динамики ЦДА – индекс интенсивности  $I_{INT}$ , характеризующий статистическую аномалию динамического состояния центров действия атмосферы.

Впервые проведено исследование зависимости между интенсивностью всех рассматривавшихся ЦДА и географической локализацией экстремумов давления в них.

Рассчитаны корреляционные функции индексов интенсивности попарно взятых ЦДА, что позволило выявить значимую статистическую связь между динамическим состоянием большинства ЦДА.

Впервые исследованы статистические связи многолетнего хода динамического состояния ЦДА и вариаций скорости вращения Земли.

Впервые исследована статистическая связь между географической локализацией экстремумов давления ЦДА и вариациями скорости вращения Земли.

**Практическая значимость работы.** Проведенное исследование показало, что изучение проблемы взаимосвязи вариаций скорости вращения Земли и состояния ЦДА основывается на значимых результатах и представляет большой интерес как в плане более глубокого понимания процессов общей и региональной циркуляции атмосферы, выявления и исследования дальних корреляционных связей, так и в плане практического применения результатов настоящих и будущих исследований. Выявленные множественные статистические связи в сочетании со значительными временными лагами позволяют рассматривать многолетние изменения как динамики ЦДА, так и скорости вращения Земли в качестве значимых компонентов в моделях сверхдолгосрочного и климатического прогнозирования.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов базируется на большом объеме исходных данных, корректном применении современных методов их обработки, а также непротиворечивости результатов современным взглядам на циркуляционные процессы в атмосфере и, в частности, на их связь с космогеофизическими процессами.

**Апробация результатов.** Основные результаты работы докладывались на заседании кафедры динамики атмосферы и космического земледования РГГМУ, на итоговой сессии Ученого совета РГГМУ и были опубликованы в девяти статьях автора.

### **На защиту выносятся:**

1. результаты статистической обработки расчетов значений экстремумов давления и их локализации в ЦДА на основе многолетних (1900-2004 гг.) данных барических полей;
2. результаты расчета среднегодовых индексов интенсивности  $I_{INT}$ ;
3. анализ связи индекса интенсивности и географического положения ЦДА;
4. оценки статистической взаимосвязи между ходом интенсивности различных ЦДА;
5. анализ статистических связей многолетнего хода индекса интенсивности ЦДА и среднегодовых значений  $\Delta LOD$ ;
6. анализ связи многолетних изменений  $\Delta LOD$  и изменений локализации экстремумов давления в ЦДА.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (62 использованных источника). Работа содержит 125 страниц основного текста, включая 37 рисунков и 14 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**В первой главе** рассматривается концепция В. Старра, суть которой заключается в следующем. Рассматривая Землю как целостную изолированную систему, в соответствии с законом сохранения углового момента можно утверждать, что глобальный баланс углового момента вращения Земли должен оставаться величиной постоянной. При этом принимается, что вращательный момент внешних сил, т.е. Луны и Солнца, во-первых, носит четко периодический характер и, во-вторых, в масштабах месяцев, лет и декад оказывается несущественным, а следовательно, может быть исключен из общего уравнения баланса.

При оговоренных таким образом граничных условиях следует полагать, что при наличии изменений в одном из компонентов глобального момента импульса должны происходить компенсаторные изменения в других компонентах с тем, чтобы обеспечивалось сохранение суммарного углового момента:

$$dM/dt = 0 \quad (1)$$

где  $M = M_{\text{атмосферы}} + M_{\text{океана}} + M_{\text{льда}} + M_{\text{коры}} + M_{\text{мантии}} + M_{\text{ядра}}$

В соответствии с приведенным выше уравнением баланса, изменения углового момента глобальной атмосферы должны компенсироваться изменениями углового момента остальных компонентов уравнения – и, в первую очередь, твердой земли. Фактическое подтверждение этому было получено во 2-й половине XX века. С введением атомных часов и созданием международной атомной шкалы времени (TAI) в 1955 г. стало возможным вести астрономические наблюдения за вращением Земли со значительно большей точностью, чем прежде. Проводившиеся с 1955 г. наблюдения показали, что длительность суток (LOD – Length Of Day) колеблется с амплитудой от десятых долей миллисекунды до единиц миллисекунд в масштабе от нескольких дней до нескольких лет и декад.

Далее в главе дается краткий обзор астрономических основ исследуемых процессов, включая общие характеристики орбитальных параметров вращения Земли. Приводится описание современных методов наблюдений над колебаниями скорости вращения Земли – таких, как интерферометрия со сверхдальней базой, GPS, лазерная локация Луны и других. Дана информация о Международной службе вращения Земли (IERS). Службой IERS были предоставлены среднегодовые данные изменения длительности суток ( $\Delta$  LOD), использованные в диссертационной работе.

В ходе наблюдений над колебаниями скорости вращения Земли, проводившихся с 1950-х гг., были выявлены амплитуды колебаний  $\Delta$  LOD для периодов различного временного масштаба. Было установлено, что типичные внутригодовые (сезонные) колебания  $\Delta$  LOD имеют амплитуду порядка 1–1,5 мс, в то время как многолетние значения  $\Delta$  LOD (по среднегодовым данным) достигают нескольких миллисекунд. (Согласно IERS, ошибка в измерении в настоящее время составляет 0,01 мс).

Наблюдения также показали, что сезонные колебания  $\Delta$  LOD имеют четко выраженный периодический характер с максимумами весной и осенью Северного полушария (замедление скорости вращения Земли) и минимумами, приходящимися на декабрь-январь и июль-август (наиболее глубокий минимум, соответствующий максимальной скорости вращения Земли).

Отфильтровывая периодические сезонные колебания  $\Delta$  LOD, а также нерегулярные вариации разного знака, оказывается возможным выделить многолетний (декадный) тренд  $\Delta$  LOD:

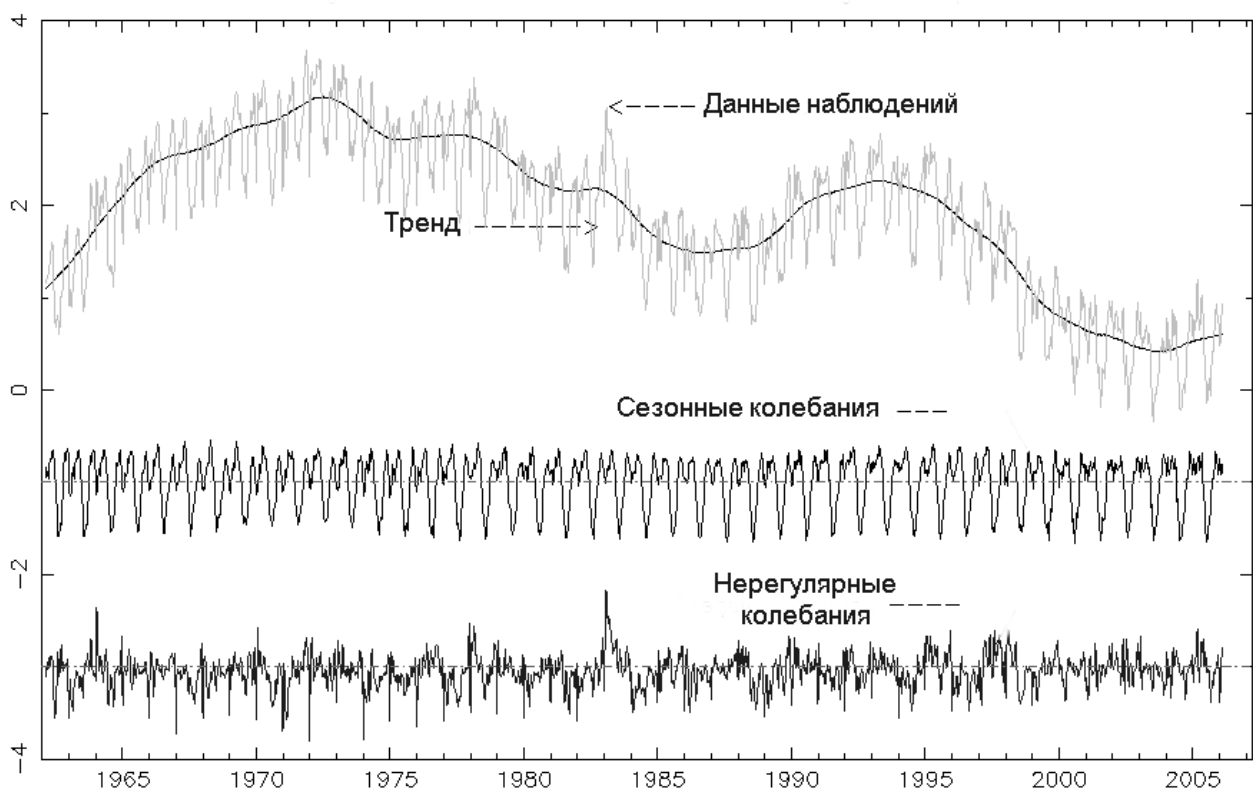


Рис. 1. Отфильтровка колебаний  $\Delta$  LOD (мс) за 1962-2006 гг.: тренд, сезонные и нерегулярные компоненты (по данным IERS)

Для изучения природы многолетних трендовых колебаний  $\Delta$  LOD представлялось чрезвычайно полезным определить ход искомой величины в годы, предшествовавшие появлению атомных часов и введению шкалы времени TAI. Такая работа астрономами была проделана. Ретроанализ, проведенный Моррисоном и Стивенсоном и уточненный впоследствии другими учеными, позволяет считать достаточно надежными среднегодовые значения  $\Delta$  LOD, начиная с 1860 г.

Предположения о том, что обнаруженные после 1955 г. внутригодовые (и в определенной степени межгодовые) колебания скорости земли вызываются изменениями углового момента глобальной атмосферы, были подтверждены рядом исследований, проведенных в 1980-х годах учеными MIT совместно с NOAA. Ежедневные данные  $\Delta$  LOD за период 1980-1983 гг. сопоставлялись с ходом ежедневных величин относительного углового момента атмосферы (M). Значения M рассчитывались на основе данных глобального поля ветра для уровней от 1000 гПа до 1 гПа.

Угловой момент атмосферы ААМ (Atmospheric Angular Momentum), т.е. зональная составляющая общей циркуляции атмосферы, интегрировался по объему следующим образом:



$$M = R^3/g \iiint u \cos^2 \varphi d\varphi d\lambda dp \quad (2)$$

где  $R$  – радиус Земли,  $g$  – ускорение свободного падения,  $u$  – зональная составляющая поля ветра,  $\varphi$  – широта,  $\lambda$  – долгота,  $p$  – давление.

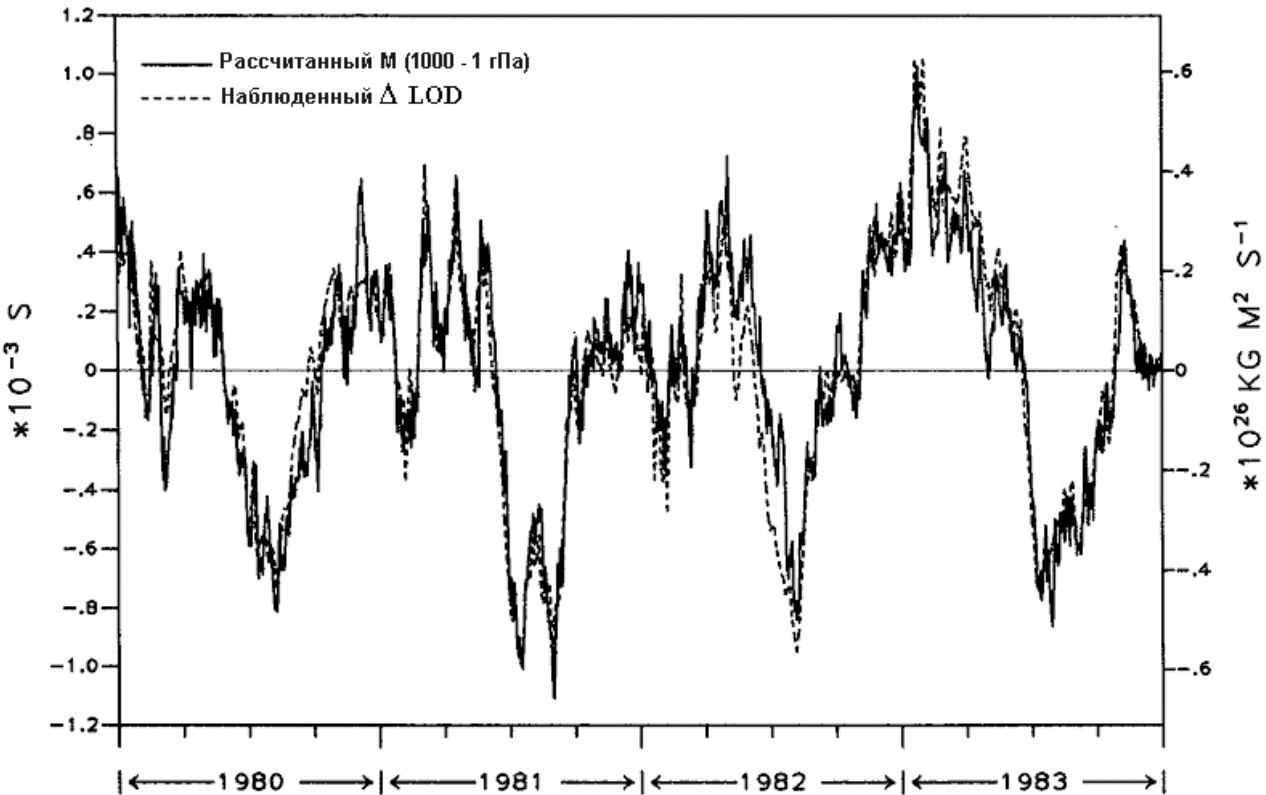


Рис.2. Временные ряды значений углового момента глобальной атмосферы в слое от 1000 до 1 гПа и наблюдаемые изменения длительности суток LOD (трехдневное осреднение) за период 1980-1983 гг.

Этот эксперимент (как и ряд последующих) показал, что изменения углового момента глобальной атмосферы сопровождаются равными, но противоположными по знаку изменениями углового момента твердой Земли (литосферы). Высказывавшиеся сомнения в том, что атмосфера, масса которой составляет  $10^{-6}$  общей массы планеты, вносит основной вклад в обеспечение баланса глобального углового момента, убедительно опровергались рядом обоснованных аргументов. Полученная в ходе расчетов картина в первую очередь могла быть объяснена высокой подвижностью воздушных масс, значительно превосходящей подвижность остальных оболочек и структур планеты. Оценки потенциального энергетического вклада различных оболочек планеты также подтвердили сделанный выше вывод.

Исследования проблемы взаимосвязи колебаний скорости вращения Земли и динамики атмосферных (и океанических) масс, проводящиеся уже

около полувека, позволили прояснить многие спорные и недостаточно изученные моменты. Однако остается открытой проблема природы длительных (многолетних) трендов LOD с большой амплитудой. Вне поля зрения большинства исследователей до сих пор оставался и вопрос о взаимосвязи колебаний LOD с региональными атмосферными процессами.

**Вторая глава** посвящена описанию ЦДА и их роли в региональной и общей циркуляции атмосферы. Кратко рассмотрены постоянные (несезонные) океанические ЦДА Северного и Южного полушария, а также их роль в соответствующих мировых колебаниях, открытых Г. Уокером – Северо-Атлантическом (NAO), Северо-Тихоокеанском (NPO) и Южном (SO). Отдельно и более подробно рассмотрен комплекс Эль-Ниньо – Южное колебание (ENSO): фазы, механизмы, сопутствующие гидрометеорологические явления, а также влияние Эль-Ниньо – Ла-Нинья на глобальную погодно-климатическую обстановку.

**В третьей главе** приводятся результаты статистической обработки данных, позволившей определить положения экстремумов исследованных ЦДА, а также проанализировать многолетние изменения их состояния. В качестве исходного материала для расчетов использовались среднемесячные данные приземных барических полей за период 1900-2004 гг., полученные при содействии Национального центра атмосферных исследований США (NCAR). Для Северного полушария шаг сетки по широте и долготе составлял  $5^\circ$ , при этом грид покрывал площадь, ограниченную  $15^\circ - 85^\circ$  с.ш. и  $0^\circ - 360^\circ$  долготы (в абсолютных градусах). Для Южного полушария использовались данные по гриду с шагом  $2^\circ$ , при этом охваченная гридом площадь располагалась между  $15^\circ - 60^\circ$  ю.ш. и  $0^\circ - 360^\circ$  долготы (в абсолютных градусах).

Эти исходные данные были сформированы в отдельные массивы с гридами, полностью покрывающими следующие регионы Мирового океана: Северная Атлантика, Северная Пацифика, Южная Атлантика, южная (субтропическая) зона Индийского океана, Южная Пацифика. Каждый массив затем подвергался компьютерной обработке, в ходе которой рассчитывались:

- минимальные и максимальные среднемесячные значения давления (на территории океанов Северного полушария);
- максимальные среднемесячные значения давления (на территории океанов Южного полушария);
- координаты (широта и долгота) рассчитанных экстремумов давления для каждого месяца (оба полушария).

Таким образом, были получены первичные (промежуточные) помесечные календари для всех лет за период 1900-2004 гг., включавшие в себя значения

экстремумов давления и их географическое положение. Подобные календари были составлены для всех 7 рассматривавшихся ЦДА: Азорского, Гавайского, Южно-Атлантического, Индийского, Южно-Тихоокеанского антициклонов, а также Исландской и Алеутской депрессий. Затем помесечные таблицы были объединены в календари, для каждого ЦДА включавшие в себя данные за все месяцы по всем годам рассматриваемого периода.

Многолетний ряд среднемесячных значений экстремумов давления был разбит на пять равновероятностных градаций с тем, чтобы каждая градация включала равное количество лет. (Рассматриваемый нами период 1900-2004 гг. был разбит на пять 21-летних групп.) Разбиение проводилось отдельно для каждого месяца всего периода. Иначе говоря, производился расчет статистической качественной оценки динамического состояния ЦДА в один и тот же месяц для различных лет.

В зависимости от того, в какую из пяти градаций попадало то или иное значение давления в отдельно взятый месяц, ему присваивалась качественная оценка интенсивности: значительно выше нормы (A), выше нормы (a), нормальная (N), ниже нормы (b) и значительно ниже нормы (B). Эти расчеты стали основой построения многолетних календарей для отдельно взятых ЦДА, где значения максимального (минимального) давления были заменены соответствующими градациями.

Такие календари использовались для сопоставления групп лет с относительно «быстрым» и относительно «медленным» вращением Земли (в многолетнем ряду среднегодовых значений изменения длительности суток  $\Delta LOD$ ) и числа месяцев за тот же период с ослабленным (bB) и усиленным (aA) состоянием каждого ЦДА. Это позволило сделать ряд предварительных заключений, относящихся к статистической взаимосвязи состояния ЦДА и многолетних трендов в изменениях скорости вращения Земли.

Однако подобный подход имел и свои недостатки. Самым существенным из них было то, что такие периоды зачастую включали в себя отрезки времени, в течение которых знак тренда изменения скорости вращения Земли менял свое направление с роста на спад (или же наоборот). Представлялось более плодотворным рассмотреть многолетний ряд  $\Delta LOD$  в сопоставлении с рядами величины, количественно выражающей статистические аномалии экстремумов давления в ЦДА, что позволило бы проделать корреляционный анализ.

Для решения данной задачи автором был предложен индекс интенсивности  $I_{INT}$ , методика расчета которого предельно проста. В качестве исходного материала использовались среднемесячные оценки аномалий интенсивности, полученные по изложенной выше методике. Эти качественные оценки были заменены количественными «баллами интенсивности» по следующей схеме: B = -2, b = -1, N = 0, a = 1, A = 2. Полученные

среднемесячные баллы суммировались за год, давая в результате среднегодовой индекс интенсивности  $I_{INT}$ . Предложенный индекс, таким образом, представляет собой безразмерную величину, принимающую значения от  $-24$  до  $+24$  и выражающую среднегодовую статистическую аномалию экстремумов давления (минимумов для циклонов и максимумов для антициклонов) в центрах действия атмосферы.

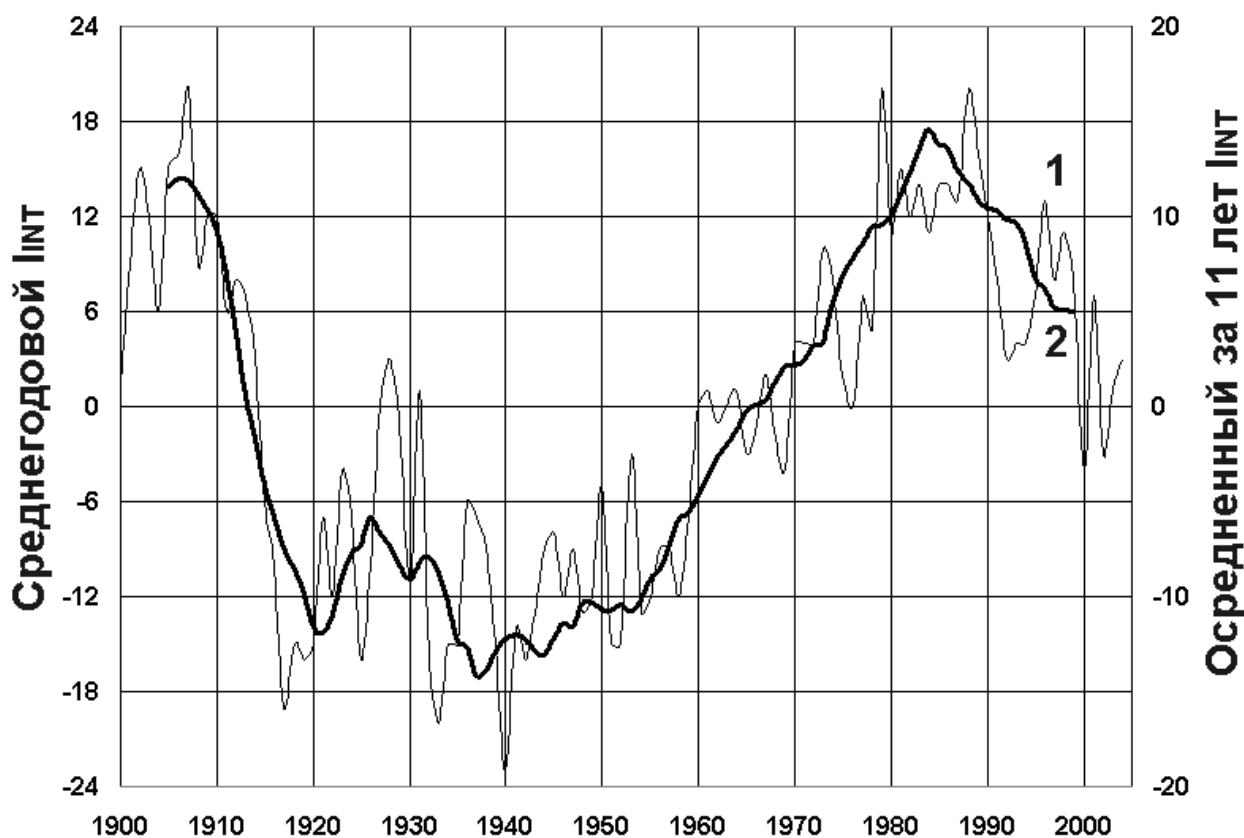


Рис. 3. Многолетний ход индекса интенсивности ( $I_{INT}$ ) Южно-Тихоокеанского антициклона: среднегодовой (1) и осредненный за 11 лет (2)

Уже на этом этапе исследования проблемы можно было отметить, что в многолетних изменениях динамического состояния рассмотренных ЦДА выделяются длительные периоды трендового роста и падения интенсивности.

Далее для каждого ЦДА был проведен корреляционный анализ связей между ходом широтных и долготных аномалий экстремумов давления в ЦДА и ходом индекса интенсивности  $I_{INT}$ . Для этих (и последующих) расчетов статистическая надежность обнаруженной связи определялась исходя из уровня значимости (p-level), равного 0,01. Корреляция с  $p\text{-level} \leq 0,001$  определялась как высокозначимая.

При расчете корреляции между среднегодовыми значениями  $I_{INT}$  и аномалией положения экстремума ЦДА по долготе в большинстве центров действия не удалось обнаружить значимых связей. Примечательным

исключением стал Южно-Тихоокеанский антициклон. В данном случае между двумя рядами исследуемых величин была обнаружена по сути достоверная статистическая связь ( $p\text{-level} \ll 0,001$ ) с коэффициентами корреляции от 0,58 до 0,62 для временного лага ( $\tau$ ) от 0 до 2 лет для среднегодовых значений  $I_{\text{INT}}$  и аномалии по долготе. В сглаженных способом 11-летнего скользящего среднего рядах коэффициенты корреляции составили от 0,71 до 0,77 для  $\tau$  от 0 до 6-7 лет.

Поиск связей между среднегодовыми значениями  $I_{\text{INT}}$  и аномалией положения экстремума ЦДА по широте в отличие от долготной аномалии дал результаты для большего числа ЦДА. Наиболее убедительные с точки зрения статистики результаты были получены для ЦДА Южного полушария.

Для несглаженных рядов индекса интенсивности и широтной аномалии Южно-Атлантического ЦДА коэффициент корреляции составил 0,69 (для  $\tau = 0$ ) при равномерной, с максимумом при  $\tau = 0$ , корреляционной функции. Для 11-летнего сглаживания были получены следующие результаты:  $r = 0,92$  для  $\tau = 0$  и  $r = 0,95$  для  $\tau = 3-4$  года.

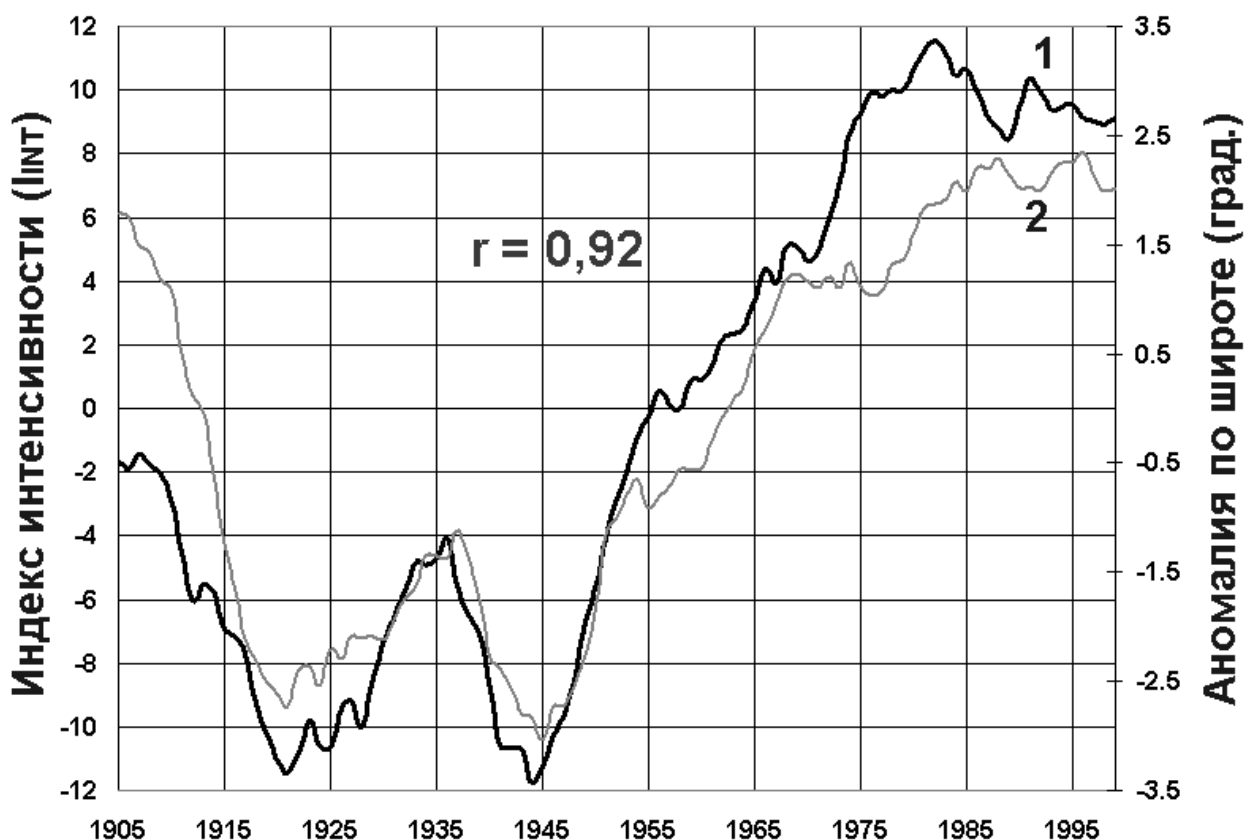


Рис. 4. Осредненный за 11 лет многолетний ход индекса интенсивности  $I_{\text{INT}}$  (1) Южно-Атлантического антициклона и широтной аномалии максимума давления (2) для  $\tau = 0$

С еще большей отчетливостью искомая связь проявилась в случае Южно-Тихоокеанского антициклонического ЦДА (коэффициент корреляции составил 0,81 для несглаженных рядов обеих величин).

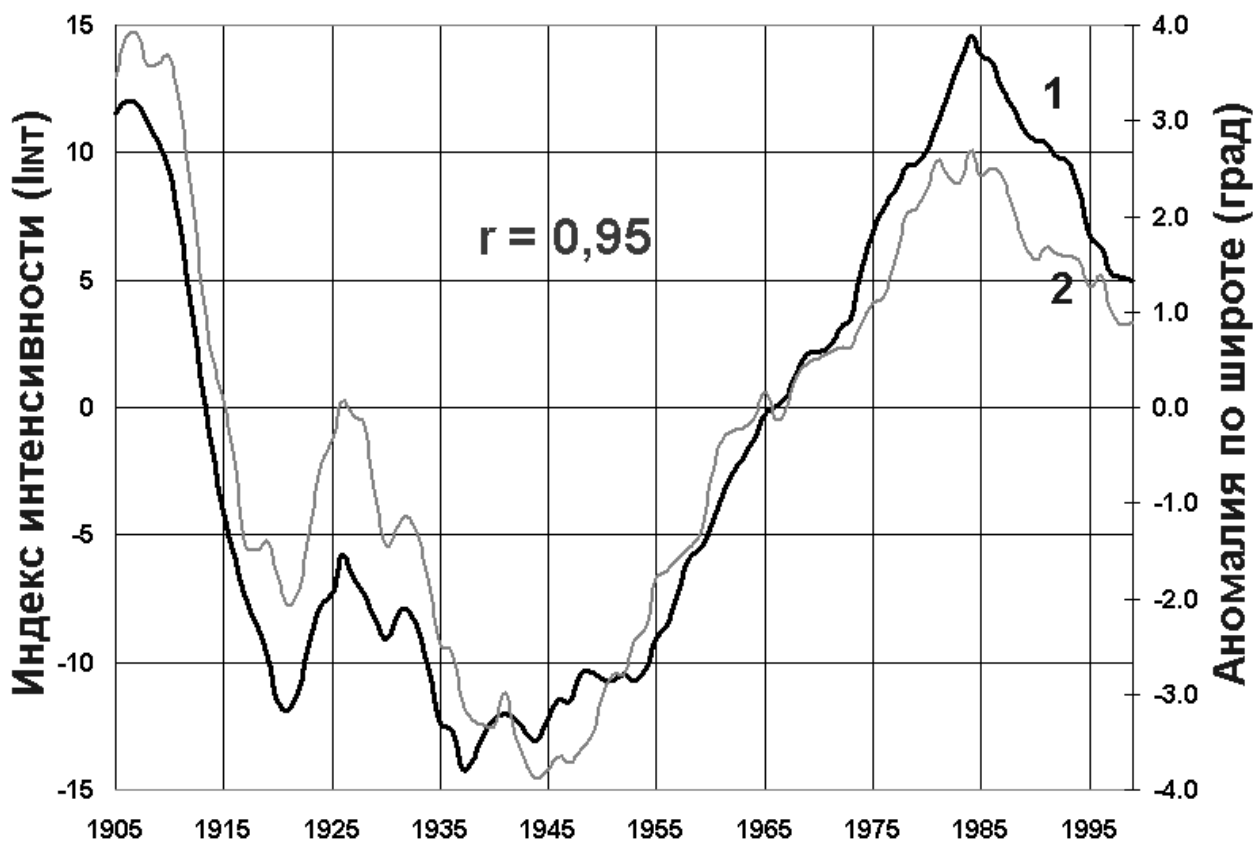


Рис. 5. Осредненный за 11 лет многолетний ход индекса интенсивности  $I_{INT}$  (1) Южно-Тихоокеанского антициклона и широтной аномалии максимума давления (2) для  $\tau = 0$

Таким образом, было установлено, что интенсивность антициклонов Южного полушария возрастает по мере перемещения центра антициклона в более высокие широты, причем зависимость эта оказывается близкой к линейной. Выявленная сопряженность находит рациональное объяснение с позиций теоретического анализа эволюции атмосферных вихрей, выполненного Л.Т. Матвеевым. Из этого анализа следует, что циклонические вихри в средней тропосфере усиливаются при адвекции холода и смещении вихря в более низкие широты. Развитию антициклонических вихрей способствует адвекция тепла и смещение в более высокие широты.

Следующий раздел третьей главы посвящен исследованию многолетних тенденций динамического состояния океанических ЦДА обоих полушарий и поиску возможных статистических связей между ходом интенсивности различных ЦДА.

Для каждой пары ЦДА были проведены статистические расчеты, в которых рассчитывалась корреляционная функция как для несглаженных рядов (среднегодовых значений  $I_{INT}$ ), так и сглаженных значений индекса с

использованием 11-летнего скользящего среднего. Результаты расчетов были сведены в соответствующие таблицы.

Высокосignificant статистическая связь ( $p\text{-level} \leq 0,001$ ) была обнаружена для всех пар ЦДА за исключением сопоставления хода  $I_{\text{INT}}$  Алеутской депрессии с ходом  $I_{\text{INT}}$  Южно-Атлантического и Южно-Индийского антициклонов. Весьма тесная связь была выявлена в сопоставлении Исландского и Азорского ЦДА. По двум этим центрам действия имелся наиболее длительный ряд наблюдений, что позволило использовать в расчетах данные за период 1874-2004 гг.

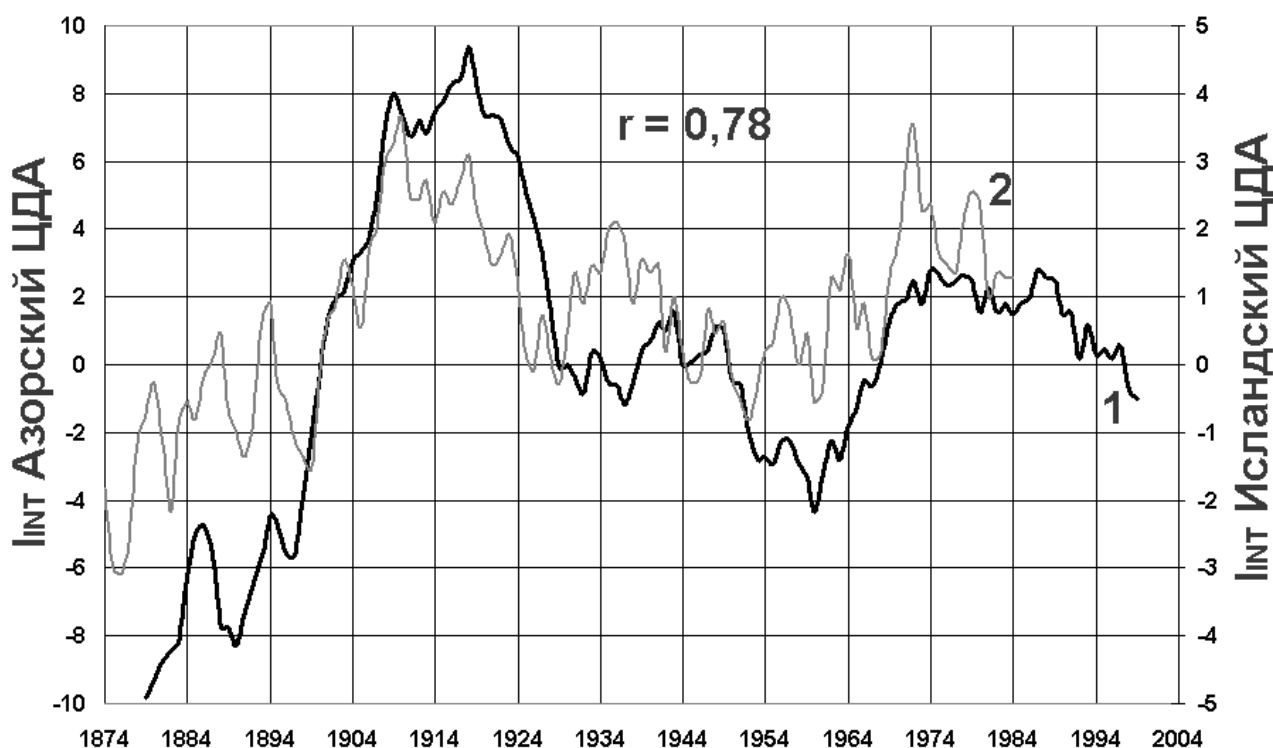


Рис. 6. Многолетний ход сглаженного (11-летнее скользящее среднее) индекса интенсивности ( $I_{\text{INT}}$ ) Азорского антициклона (1) и Исландской депрессии (2) за период 1874-2004 гг. ( $\tau = 15$  лет)

В этом случае коэффициент детерминации  $R^2$  оказывается равным 0,60, т.е. 60% величины «зависимой» переменной ( $I_{\text{INT}}$  Исландского ЦДА) определяется линейным уравнением регрессии. При сглаживании с помощью 11-летнего скользящего среднего заблаговременности в 15 лет получить не удастся, т.к. первые и последние 5 лет каждого ряда будут «отрезаны», войдя в осредненные значения. Однако остающееся 10-летнее опережение позволяет получить определенное представление о суммарных тенденциях состояния «зависимого» ЦДА на указанный выше срок. Следует подчеркнуть, что слово «зависимый» не случайно берется здесь в кавычки. Речь, естественно, может идти лишь о статистической взаимозависимости, которая никоим

образом не определяет характер возможной физической зависимости двух сопоставляемых параметров.

Интересными для возможного прогностического использования оказались и результаты статистического анализа хода индекса интенсивности двух ЦДА Южного полушария – Атлантического и Тихоокеанского. Максимальный коэффициент корреляции был получен для лага 7-8 лет ( $r = 0,93$ ). Поскольку и в этом случае речь идет об 11-летнем скользящем осреднении (т.е. об исключении первых и последних 5 лет из каждого ряда), для возможного прогноза суммарной тенденции интенсивности ЦДА Южной Пацифики остается опережение в 2-3 года. В данном случае, однако, мы имеем дело с еще более значительным коэффициентом детерминации ( $R^2 = 0,86$ ), что позволяет надеяться на некоторое уравнивание неизбежных межгодовых изменений общей тенденции (что при опережении в 2-3 года не может не сказаться) высоким уровнем детерминации полученной модели.

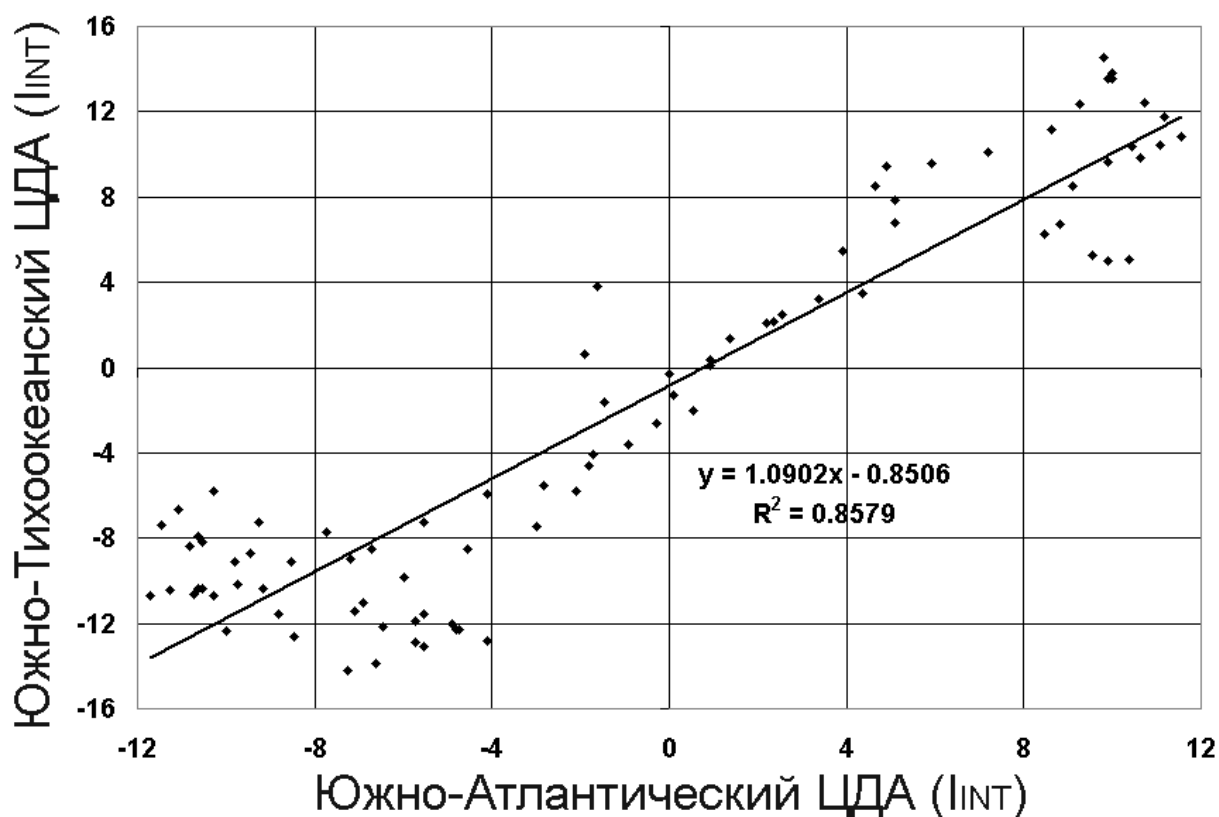


Рис. 7. Диаграмма рассеяния значений  $I_{INT}$  Южно-Атлантического/Южно-Тихоокеанского ЦДА (по сглаженным методом 11-летнего скользящего среднего рядам) и регрессионная модель

**Четвертая глава** посвящена анализу статистической связи многолетнего хода  $\Delta LOD$  с ходом индекса интенсивности центров действия атмосферы и географической локализацией экстремумов давления в них.



В первом разделе, где оценивалась связь хода  $\Delta LOD$  и индекса интенсивности  $I_{INT}$ , приводятся статистические расчеты корреляционной функции как для несглаженных рядов индекса (среднегодовых значений  $I_{INT}$ ), так и сглаженных значений с использованием 11-летнего скользящего среднего. И в том, и в другом случае для сопоставления использовались среднегодовые (несглаженные) значения  $\Delta LOD$ .

Обозначения центров действия атмосферы в приводимой ниже таблице даются следующим образом: AZO – Азорский антициклон; ICE – Исландская депрессия; HAW – Гавайский антициклон; ALE – Алеутская депрессия; S-ATL – Южно-Атлантический антициклон; S-IND – Южно-Индийский антициклон; S-PAC – Южно-Тихоокеанский антициклон.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции рядов индекса интенсивности ( $I_{INT}$ ) ЦДА и среднегодовых значений  $\Delta LOD$

ЦДА	Среднегодовые $I_{INT}$			Сглаженные $I_{INT}$ (MA 11)		
	$R_0$	$R_{max}$	$\tau$	$R_0$	$R_{max}$	$\tau$
AZO	0,26	<b>0,41</b>	9÷10	<b>0,53</b>	<b>0,76</b>	7÷8
ICE	N	N	–	<b>–0,75</b>	<b>–0,75</b>	0
HAW	N	0,30	7	N	<b>0,44</b>	7
ALE	<b>–0,33</b>	<b>–0,37</b>	–5÷–6	<b>–0,66</b>	<b>–0,69</b>	–2÷–3
S-ATL	N	<b>0,39</b>	–11÷–12	<b>0,36</b>	<b>0,47</b>	–9÷–10
S-IND	N	N	–	N	<b>0,48</b>	–15
S-PAC	<b>0,53</b>	<b>0,54</b>	1÷3	<b>0,63</b>	<b>0,63</b>	0

Для каждого из рядов рассчитывались  $R_0$  (коэффициент корреляции при отсутствии лага, т.е. при  $\tau = 0$ ) и  $R_{max}$  (максимальный коэффициент корреляции, полученный при расчете корреляционной функции). В последнем случае в колонке рядом с  $R_{max}$  указывается лаг ( $\tau$ ), для которого получен приводимый коэффициент корреляции.

Положительные значения лага ( $\tau > 0$ ) соответствуют ситуациям, когда ход  $\Delta LOD$  опережает ход интенсивности ЦДА. Отрицательные значения лага ( $\tau < 0$ ) указывают на отставание первой переменной относительно второй.

Полужирным шрифтом в таблицах выделены коэффициенты корреляции, соответствующие  $p\text{-level} < 0,001$  (уровень, определяемый в статистике как высоко значимая корреляция). Значения коэффициентов корреляции, оказавшиеся ниже минимальных для  $p\text{-level} = 0,01$ , отмечались как несущественные (N), то есть, как случаи, в которых корреляционная связь не обнаружена.

Уже при первом взгляде на таблицу обращает на себя внимание тот факт, что антициклонические ЦДА обоих полушарий демонстрируют положительную корреляцию хода интенсивности с ходом  $\Delta LOD$ , в то время как циклонические ЦДА (Исландская и Алеутская депрессии) коррелируют с той же величиной с противоположным знаком. Различие в лагах, для которых получены максимальные значения коэффициентов корреляции, не позволяет сделать какие-либо однозначные выводы, однако в самом первом приближении можно сказать, что усиление антициклонов (с временным сдвигом или без него) коррелирует с ростом  $\Delta LOD$  или, что то же самое, с замедлением скорости вращения Земли. Интенсивность Исландской и Алеутской депрессий в эти же периоды ослабевает, т.е. циклонические ЦДА становятся менее глубокими.

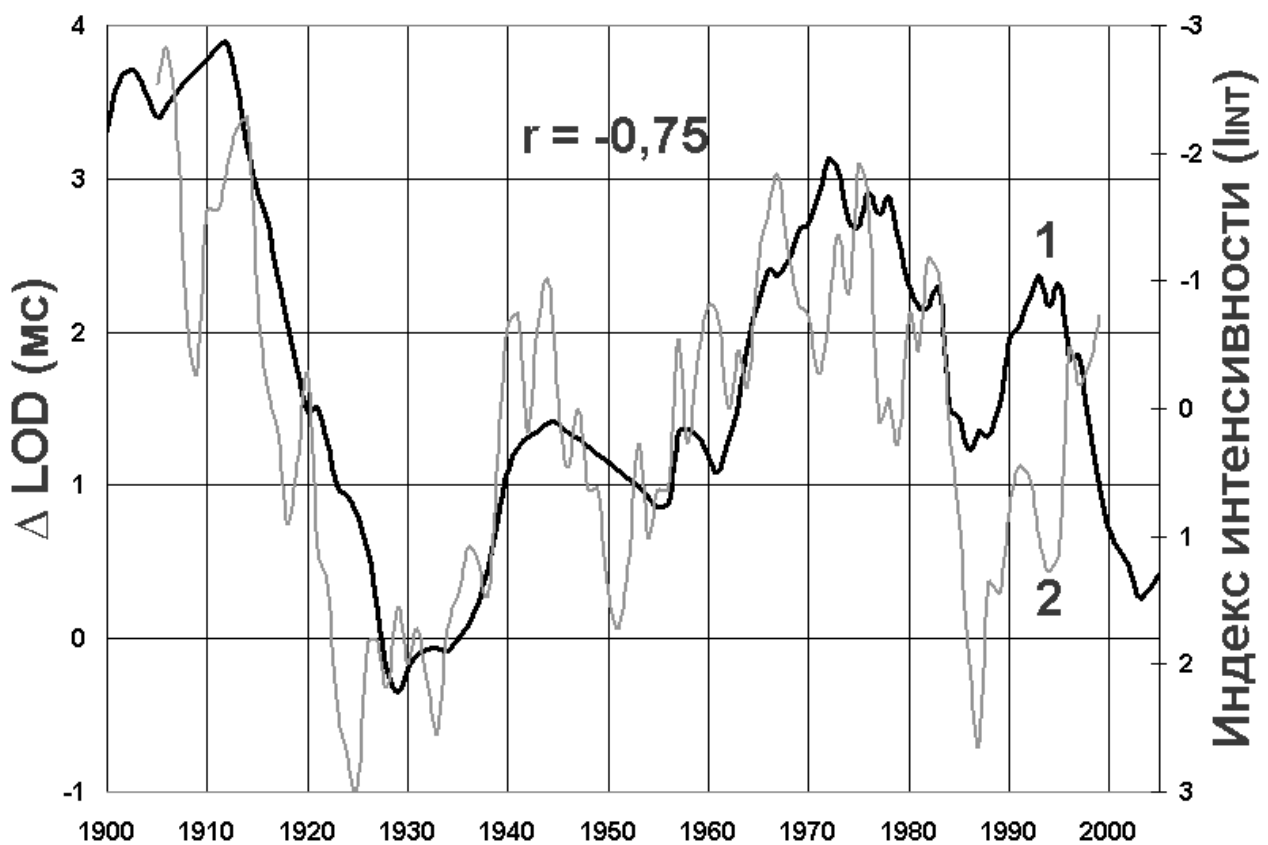


Рис. 8. Многолетний ход среднегодовых значений  $\Delta LOD$  (1) и сглаженных (11-летнее скользящее среднее) значений индекса интенсивности ( $I_{INT}$ ) Исландского ЦДА (2),  $\tau = 0$

Максимальный коэффициент корреляции, как следует из таблицы, получен при отсутствии лага, т.е. для синхронных значений  $\Delta LOD$  и  $I_{INT}$ . Тем не менее, в данном случае возникает возможность осторожной качественной оценки вероятного поведения Исландского ЦДА на период до 5 лет уже в силу того, что среднегодовой ряд  $\Delta LOD$  на 5 лет опережает сглаженный по 11-летнему скользящему среднему ряд значений  $I_{INT}$  Исландской депрессии.

Коэффициент детерминации  $R^2$ , равный 0,56, недостаточно велик для того, чтобы делать какие-либо однозначные выводы только на его основании, однако этот подход может оказаться полезным при наличии других факторов, позволяющих судить о вероятных изменениях динамического состояния Исландской депрессии. На рис. 8 прослеживается тенденция вероятного усиления (углубления) Исландского ЦДА в течение ближайших лет.

В заключительном разделе четвертой главы рассмотрены результаты статистического анализа взаимосвязи  $\Delta$  LOD и географической локализации экстремумов давления в ЦДА. Как и в предыдущем разделе, статистические расчеты были проведены для каждого ЦДА. Корреляционная функция рассчитывалась как для несглаженных рядов аномалий широты и долготы (среднегодовых значений аномалии), так и сглаженных значений этих величин с использованием 11-летнего скользящего среднего. Результаты расчетов были сведены в соответствующие таблицы.

В ходе анализа выяснилось, что аномалия долготного положения экстремумов ЦДА коррелирует с ходом  $\Delta$  LOD не столь часто, как это имеет место в сопоставлении рядов  $\Delta$  LOD с широтной аномалией и с индексом интенсивности  $I_{INT}$ . Интересный результат был получен в случае Алеутской депрессии. Максимальный коэффициент корреляции долготной аномалии этого ЦДА и хода  $\Delta$  LOD составил 0,85 при лаге в 16 лет. Тот факт, что ход  $\Delta$  LOD опережает ход долготной аномалии Алеутской депрессии, позволяет надеяться на использование найденной статистической зависимости в сверхдолгосрочном (климатическом) прогнозировании. При условии, что существующая зависимость не изменит свой характер радикальным образом, можно дать осторожную качественную оценку перемещения по долготе центра Алеутской депрессии на период до 2015-2018 гг.

В исследовании многолетнего хода широтной аномалии ЦДА и  $\Delta$  LOD примечательный результат был получен для ЦДА Южного полушария и в особенности для Южно-Тихоокеанского антициклона. Коэффициент корреляции в данном случае оказался хотя и весьма существенным ( $r = 0,64$ ), однако не самым большим. Но связь между ходом двух величин в определенный момент времени кардинально поменяла свой характер. До начала-середины 1930-х годов ход широтной аномалии предварял ход  $\Delta$  LOD на 8 лет, после чего это опережение сменилось 12-летнее отставанием, причем ход обеих величин стал демонстрировать гораздо более тесную корреляцию.

На приводимом ниже графике (рис. 9) методом 11-летнего скользящего среднего сглажены ходы и широтной аномалии центра антициклона, и  $\Delta$  LOD. Кривая  $\Delta$  LOD смещена во времени на 12 лет вперед с тем, чтобы представить вероятную локализацию ЦДА по широте до 2011 г.

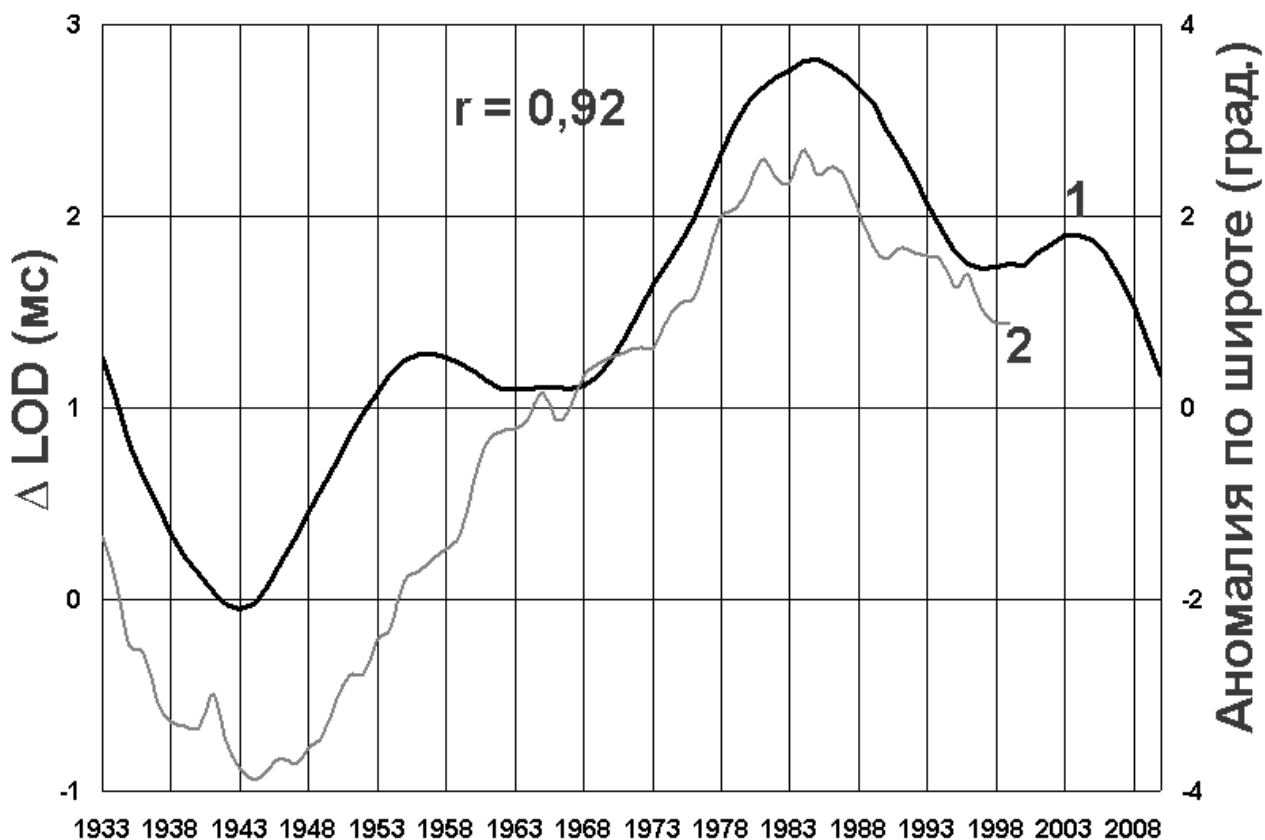


Рис. 9. Ход осредненных (11-летнее скользящее среднее) значений  $\Delta \text{LOD}$  (1) и аномалии по широте Южно-Тихоокеанского ЦДА ( $\tau = 12$  лет)

Из данного графика следует, что при условии сохранения существующей связи центр Южно-Тихоокеанского антициклона на период до 2011 года будет по-прежнему находиться несколько южнее своего среднего многолетнего положения, однако при этом уже должен начать свое движение к экватору, приближаясь к средней за 105 лет широте. При этом экстремум ЦДА должен существенно удалиться к северу от точки своего крайнего южного положения начала 1980-х гг., результатом чего может стать постепенное усиление пассатного переноса (меньшая повторяемость явлений Эль-Ниньо с возможным возникновением явления Ла-Нинья).

Интересно отметить, что полученные на основе наблюдений данные подтверждают результаты эксперимента, поставленного в 1979 г. Б. Хантом на численной модели, продемонстрировавшей изменения динамики глобальной атмосферы, соответствующие периодам ускорения и замедления вращения Земли. (Аномально быстрое вращение Земли вызывало смещение зоны высокого давления к экватору с соответствующим усилением пассатного переноса. Аномально медленное вращение планеты вызывало смещение зоны высокого давления и воздушных масс тропосферы в направлении умеренных широт с усилением зонального переноса.)

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

1. По данным глобальных барических полей за период 1900-2004 гг. в ходе их статистической обработки получены значения экстремумов давления и их локализации в семи перманентных океанических ЦДА обоих полушарий.

2. Для характеристики состояния ЦДА предложен индекс интенсивности  $I_{INT}$ , являющийся количественным показателем статистической аномалии динамического состояния центров действия атмосферы.

3. Проведено исследование статистической связи между индексом интенсивности  $I_{INT}$  и географической локализацией экстремумов давления в ЦДА. Выявлена значимая ( $p\text{-level} < 0,01$ ) и в ряде случаев высокосignificant ( $p\text{-level} < 0,001$ ) статистическая связь между многолетним ходом  $I_{INT}$  и широтной/долготной аномалией экстремумов давления в ЦДА.

4. Выявлены многолетние тренды роста и падения  $I_{INT}$  и широтной аномалии, что с особой отчетливостью проявилось для ЦДА Южного полушария. Абсолютный пик индекса интенсивности  $I_{INT}$  Южно-Тихоокеанского антициклона в начале 1980-х гг. совпал как с пиком аномалии по широте, так и с наиболее мощным Эль-Ниньо за весь период наблюдений.

5. Рассчитаны корреляционные функции для индексов интенсивности  $I_{INT}$  попарно взятых ЦДА. Значимая и высокосignificant связь обнаружена в большинстве случаев. Для ряда ЦДА максимальные коэффициенты корреляции соответствовали значительному лагу, что позволило получить регрессионные прогностические модели для отдельных пар ЦДА.

6. Исследованы статистические связи между многолетними трендами индекса интенсивности  $I_{INT}$  рассматриваемых ЦДА и вариациями скорости вращения Земли (выраженными через  $\Delta LOD$ ). Высокосignificant корреляция для лага от 0 до 15 лет получена для большинства ЦДА. Для сглаженных значений  $I_{INT}$  такая связь обнаружена для всех без исключения ЦДА.

7. Исследована статистическая связь между географической локализацией экстремумов давления ЦДА и ходом  $\Delta LOD$ . Высокосignificant корреляционная связь выявлена для аномалий по долготе всех ЦДА за исключением Исландской депрессии. Существенный коэффициент детерминации в сочетании с большим временным лагом в случае Алеутской депрессии позволяет надеяться на использование найденной зависимости в практике сверхдолгосрочного прогнозирования.

8. Высокосignificant корреляционная связь между широтной аномалией экстремумов ЦДА и  $\Delta LOD$  была получена для всех центров действия. Тесная связь аномалии по широте Южно-Тихоокеанского антициклона и  $\Delta LOD$  в сочетании с существенным временным лагом позволяет сделать предположение, что центр антициклона продолжит уже начавшееся движение к

экватору, результатом чего может стать постепенное усиление пассатного переноса, а также меньшая повторяемость и мощность явлений Эль-Ниньо.

9. В итоге всего комплекса исследований выявлена значимая и высокозначимая статистическая связь динамического состояния центров действия атмосферы (их интенсивности и локализации) как между собой, так и с вариациями скорости вращения Земли. Тем самым снова подтверждается ключевая роль ЦДА в динамике общей циркуляции атмосферы.

10. Тесная корреляция состояния центров действия как с с ходом  $\Delta$  LOD, так и между отдельно взятыми ЦДА в сочетании с временными лагами указывает на возможность использования полученных результатов в практике сверхдолгосрочного и климатического прогнозирования в масштабах от глобального и макрорегионального до локального.

### **ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1.Вершовский М.Г. Азорский антициклон и колебания скорости вращения Земли. // В сб.: Вопросы промысловой океанологии, вып.3. – М.: Изд. ВНИРО. – 2006. – С. 171 – 178.

2.Вершовский М.Г. Многолетние вариации скорости вращения земли как индикатор крупномасштабных изменений в атмосфере. // В сб.: Труды Третьей Международной научно-практической конференции "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности", т.8. – СПб.: Изд. Политехнического университета. – 2007. – С. 187 – 189.

3.Вершовский М.Г. Состояние центров действия атмосферы Атлантического и Тихого океана: пути к прогнозированию. // В сб.: Вопросы промысловой океанологии, вып.4., №2 – М.: Изд. ВНИРО. – 2007. – С. 102 – 110.

4.Вершовский М.Г. Статистические оценки многолетних изменений интенсивности центров действия атмосферы. // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ – 2007. - № 26 (2). – Шифр Информрегистра: 0420700012/0017. – С. 1 – 15. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2007/02/pdf/14.pdf>

5.Вершовский М.Г. Центры действия атмосферы Атлантического океана и вариации скорости вращения Земли. // Электронный научный журнал "Исследовано в России". – 2006. – С. 2651 – 2660. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/275.pdf>

6.Вершовский М.Г. Центры действия атмосферы: индексы интенсивности за 1900 – 2004 гг. // МИТС-Наука: международный научный вестник [Электронный ресурс]. – Ростов н/Д.: РГУ. – 2007. – № 1. – Шифр

Информрегистра: 0420700032/0020. – С. 1 – 10. – Режим доступа: <http://www.roseis.ru/REOS/nauka.nsf/ShowArchiv?OpenAgent&Year=2007>

7.Вершовский М.Г., Кондратович К.В. Южно-Тихоокеанский субтропический антициклон: интенсивность и локализация. // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 12. – С. 29 – 34.

8.Кондратович К.В., Вершовский М.Г. О многолетних изменениях интенсивности и географической локализации Южно-Тихоокеанского субтропического антициклона. // Электронный научный журнал "Исследовано в России". – 2007. – С. 310 – 316. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/032.pdf>

9.Кондратович К.В., Куликова Л.А., Вершовский М.Г. Антициклонические центры действия атмосферы и вариации скорости суточного вращения Земли. // В сб.: Вопросы промышленной океанологии, вып.3. – М.: Изд. ВНИРО. – 2006. – С. 160 – 170.