

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

**Зотов Леонид Валентинович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ  
ВРАЩЕНИЕМ ЗЕМЛИ И ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ  
ПРОЦЕССАМИ**

**01.03.01 – Астрометрия и небесная механика**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

**Москва — 2019**

Работа выполнена в лаборатории гравиметрии Государственного астрономического института им. П.К.Штернберга МГУ имени М.В.Ломоносова

Научные консультанты:

**Кристиан Бизуар**

HDR, астроном, директор  
Центра параметров вращения Земли  
Международной службы вращения Земли

**Сидоренков Николай Сергеевич**

доктор физико-математических наук  
доцент, главный научный  
сотрудник Гидрометцентра РФ

Официальные оппоненты:

**Бялко Алексей Владимирович**

доктор физико-математических наук  
Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау,  
ассоциированный научный сотрудник,  
журнал “Природа” РАН,  
заместитель главного редактора

**Любушин Алексей Александрович**

доктор физико-математических наук  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
главный научный сотрудник

**Яцкив Ярослав Степанович**

доктор физико-математических наук,  
академик НАН Украины,  
Главная астрономическая обсерватория  
НАН Украины, директор

Защита диссертации состоится 24 октября 2019 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу 119234, г. Москва, Университетский пр. 13, ГАИШ МГУ  
email: wolftempus@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский пр., д 27) и на сайте ИАС “Истина”,  
<https://istina.msu.ru/dissertations/211744667/>

Автореферат разослан 5 июля 2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

М.В. Пружинская

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы исследования

Как известно, Земля – это волчок, наклон оси которого к плоскости эклиптики определяет климатические пояса, а период обращения служит мерой продолжительности суток (LOD). Астрономам известно, что ось Земли прецессирует под действием гравитации Солнца, Луны и планет, что сказывается на климате; скорость вращения Земли непостоянна из-за приливного замедления и небольших вариаций LOD (в пределах нескольких миллисекунд); и, поскольку планета в целом – не мертвый мир, она “живет” своей жизнью: в океане, атмосфере, литосфере и недрах идут термодинамические процессы, перераспределяются массы, меняется магнитное поле, идет обмен моментом импульса между оболочками, даже деятельность человека уже сказывается на климате, – все это, в той или иной степени, вызывает колебания мгновенной оси вращения Земли и движение полюсов (ДП).

Новое в науке зачастую рождается из экспериментов, выполненных на пределе точности, на основе переосмысления накопленных данных и выделения слабых сигналов из шумов. Рост точности наблюдений за вращением Земли выявляет все более тонкие особенности этого процесса, требующие теоретического объяснения.

В представленной работе сделано обобщение уравнений Эйлера-Лиувилля на случай более реалистичной трехосной Земли, покрытой асимметричными океанами. Спрогнозированы асимметрические эффекты в движении полюса, величиной до 1 мс.

Исследуемое в диссертации чандлеровское движение полюса (ЧДП) является не только наибольшей по амплитуде (до 10 м), но и, пожалуй, наиболее загадочной составляющей движения полюсов Земли. Спустя более века после открытия ЧДП, его амплитудные модуляции остаются до конца не понятыми. Если свободная прецессия твердого тела не требует внешних потенциалов в уравнениях Лагранжа, она происходит без воздействия внешних сил: достаточно оси вращения отклониться от главной оси инерции, и она уже не может “встать на место”, свободно прецессируя вследствие гироскопического эффекта с частотой Эйлера, – то для случая вязко-упругой Земли ситуация меняется. Наподобие того, как собственная частота классического осциллятора определяется от-

ношением упругих коэффициентов к обобщенным инерционным, так и чандлеровская частота определяется относительной разностью главных осевого и экваториального моментов инерции Земли и числами Лява, а на место “внешних сил” в правых частях линеаризованных уравнений Эйлера-Лиувилля встают малые поправки к тензору инерции и их производные. Вязкие свойства недр приводят к диссипации, описываемой комплексными частями реологических коэффициентов. Это делает чандлеровское колебание не совсем “свободным”. Кроме того, обратная связь возникает от дополнительной деформации, связанной с полюсным приливом. Все названное сказывается на чандлеровской частоте и определяет свойства связанного с ней резонанса. Для поддержания чандлеровского колебания реальной Земли нужны возбуждения, источником которых считаются изменения углового момента атмосферы и океана случайного характера.

Проведено тщательное исследование ЧДП, разработана методика решения обратной задачи и восстановлено чандлеровское возбуждение, обнаружены его двадцатилетние модуляции. Сравнение с геофизическими возбуждениями показало, что их причина связана скорее с океаном, а не атмосферой. Излишне говорить, какое большое значение имеет понимание причин чандлеровского колебания для долгосрочного прогнозирования координат полюса. И если обнаружение некоторой закономерности в ранее считавшихся случайными рядах позволит улучшить прогноз и уточнить модель, это будет весьма полезным.

В работе также исследованы колебания длительности суток LOD, рассмотрено влияние на них изменений зонального углового момента атмосферы. Исследованы долгосрочные колебания LOD, которые обычно связываются с обменом угловым моментом на границе ядра и мантии. Собраны сведения о процессах в атмосфере и океане, происходящих под действием климатических изменений. Рассмотрены тонкие эффекты в изменениях уровня моря, придонного давления, низших гармониках гравитационного потенциала, также связанные с вращением Земли. Положено начало междисциплинарным исследованиям на стыке традиционного для геодезии предмета, вращения Земли, и изменений климата.

Автору хотелось бы не только представить новые результаты и убедить оппонентов в их корректности, но и вновь привлечь интерес к некоторым несколько ушедшим в тень проблемам высшей геодезии, оживить научные исследования и дискуссии в этой области, что послужит стимулом для развития нового междисциплинарного направления на стыке климатологии, геофизики, геодезии и астрономии.

## **Степень разработанности**

В работе рассматриваются движение полюса и изменения длительности суток, сопоставляются геодезические и геофизические возбуждения, развивается формализм обобщенного уравнения Эйлера-Лиувилля, решается обратная задача восстановления возбуждения чандлеровского движения полюса. Исследуются процессы в океане и атмосфере, сказывающиеся на вращении Земли, перераспределения масс ледников и вод суши, находящие отражение в гравитационном поле. Получен ряд результатов по сопоставлению параметров вращения Земли (ПВЗ) с климатическими индексами. Подведена статистика выполнявшихся с 2012 г. прогнозов ПВЗ.

Заметим, что моделирование неоднородностей вращения Земли имеет практический смысл, оно необходимо для связи земной и небесной систем координат, для решения задач космической навигации и позиционирования, имеет важное значение для обороноспособности страны.

В работе содержатся материалы, необходимые для понимания основ современной теории вращения Земли, которая базируется на механике многослойного вращающегося тела, теории деформаций, современных моделях внутреннего строения Земли. Дан вывод линеаризованных уравнений Эйлера-Лиувилля с комплексной резонансной чандлеровской частотой. В матричном виде записаны уравнения вращения трехслойной Земли с жидким внешним и твердым внутренним ядром, лежащие в основе теории нутации IAU 2000.

Выведены обобщенные уравнения Лиувилля для трехосной мантии и асимметричного полюсного прилива. Показано, что в рамках такого фор-

мализма появляются две резонансные частоты на прямой и обратной чандлеровской. Соответствующие симметрический и асимметрический вклады дают отклик как в прямом, так и ретроградном диапазонах частот, которые оказываются сцеплены. Вычислен бюджет океанического и атмосферного возбуждений, показано, что вклад от асимметрической части находится на уровне нескольких миллисекунд дуги и может проявляться в наблюдаемых параметрах ориентации Земли (ПОЗ).

В диссертации используются методы решения обратных задач, при этом автор стоит на позиции, что в основе подходов, ограничивающих область решения, лежат принципы фильтрации. На основе фильтрации В.Л. Пантелеева выделяется чандлеровское движение полюса (ЧДП) и его возбуждение. В изменениях амплитуды ЧДП, с минимумом в 1930-е и 2010-е гг., при более тщательном рассмотрении удалось обнаружить квазивосьмидесятилетние и сорокалетние колебания. Последним соответствуют двадцатилетние модуляции амплитуды чандлеровского возбуждения.

На основе многоканального сингулярного спектрального анализа выделены моды изменчивости углового момента океана и атмосферы на сетке по данным ECCO, NCEP/NCAR, ECMWF. Выполнен анализ гравитационного поля Земли по данным GRACE. В его изменениях выделены тренды и годовые колебания. Исследованы перераспределения масс в бассейнах крупных рек России с 2013 по 2017 гг.

В последние десятилетия, благодаря развитию средств космической геодезии и гравиметрии, увеличению точности наблюдений за вращением Земли, появлению сетей мониторинга океана и атмосферы, существенно увеличился объем данных о нашей планете. Тремя столпами современной геодезии, по мнению президента Международной ассоциации геодезии Харальда Шу, на сегодня являются фигура Земли (геокинематика), её гравитационное поле, и вращение Земли. Для измерений используются земная и небесная системы координат и преобразования между ними, точность которых достигла нескольких десятков микросекунд дуги. В каждой из названных областей существенное влияние оказывают обнаружимые на современном уровне точности геодинамические процессы.

Озабоченность общественности проблемой изменений климата, появление большого количества работ по этому вопросу, разработка моделей глобальной циркуляции направили современные геофизические, метеорологические и океанографические исследования в русло изучения климатологических аспектов происходящих на Земле процессов. Под эгидой Международного союза по наукам о Земле создан консорциум GCOS Глобальной системы наблюдений за климатом, сформулировавший список глобальных климатических переменных ECV, в который входят температура, уровень моря, характеристики стоков рек, ледниковых щитов и др. с целью постоянного мониторинга происходящего на Земле потепления.

Посвятив более двенадцати лет исследованиям вращения Земли, автор заинтересовался вопросом возможной взаимосвязи изменений климата и вращения Земли. Сопоставление изменений во вращении Земли с процессами в океане и атмосфере, такими как рост уровня моря и изменения глобальной температуры, показало заметное сходство в их поведении. В диссертации поднимается вопрос взаимосвязи изменений длительности суток LOD с Многолетним атлантическим колебанием (АМО), Эль-Ниньо Южным колебанием (ENSO) и другими модами климатической изменчивости. На основе программ реанализа данных удастся вычислить угловые моменты океана и атмосферы; по наблюдениям за гравитационным полем – вычислить перераспределения масс и изменения тензора инерции Земли. Одна из задач работы состоит в том, чтобы привлечь внимание научного сообщества к тонким эффектам во вращении Земли, являющимся суммарным откликом на климатические изменения.

Ряды первых коэффициентов гравитационного потенциала Земли позволяют выявить колебания и тренды в положении геоцентра, факторе  $J_2$  и др. Сравнение трендов движения полюса с возбуждениями, вычисленными по коэффициентам гравитационного потенциала второй степени, проведенное в диссертации, показало, что дрейф полюса с начала XXI века обусловлен перераспределением масс, а вращение планеты откликается на процессы, индуцированные климатическими изменениями.

На поставленные в диссертации вопросы уже обратили внимание крупнейшие специалисты по вращению Земли, космической гравиметрии, климатологии. Об этом говорит появление на международных конференциях специальных междисциплинарных секций, как, например, “Изменения климата и движение полюса” (AOGS-2016). Это свидетельствует о том, что представленная работа идет в ногу со временем. Автор предлагает добавить параметры вращения Земли в список важных климатических переменных ECV, полагая, что точность наблюдений уже позволяет отслеживать эффекты, связанные с климатом, в трех базовых областях геодезии: фигуре Земли, ее гравитационном поле и вращении.

## **Цели и задачи исследования**

В представленной работе рассмотрены различные геофизические эффекты в атмосфере, океане и твердой Земле, по которым накоплен наблюдательный материал, достаточный для точного анализа, с целью выяснить, в какой степени они отражаются на вариациях скорости вращения Земли и движении полюса. Целью также являлось углубление понимания взаимосвязи этих процессов, совершенствование моделей и прогнозов.

Для достижения этого решались следующие задачи:

- изучение чандлеровского движения полюса;
- восстановление возбуждающих функций;
- сравнение геодезических возбуждений движения полюса и длительности суток с геофизическими возбуждающими функциями, восстановленными по данным об океане и атмосфере;
- объяснение модуляций ЧДП модуляциями его возбуждения, восстановление их формы, поиск причин;
- исследование вариаций длительности суток;
- анализ влияния перераспределений масс, детектируемых космическими гравиметрическими миссиями, на вращение Земли;



- анализ геофизических процессов, сказывающихся на вращении Земли, выделение трендов, связанных с климатическими изменениями;
- региональный и глобальный анализ данных спутников GRACE;
- разработка метода сингулярного спектрального анализа и корректирующей фильтрации Пантелеева;
- обзор современных моделей вращения Земли и разработка обобщенного уравнения Эйлера-Лиувилля для трехосной Земли с асимметричными океанами, анализ наблюдательных следствий такого обобщения.

### **Научная новизна**

1. В диссертации впервые выведено обобщенное уравнение Эйлера-Лиувилля для трехосной Земли с океанами и проведен анализ вызванных им асимметрических эффектов в движении полюса в чандлеровском диапазоне частот. Выполнено сравнение геодезических и геофизических возбуждений.
2. Впервые с использованием корректирующей фильтрации Пантелеева восстановлено чандлеровское возбуждение, в котором выявлены 20-летние модуляции. Их наличие подтверждено рядом других методов, включая аналитические.
3. Впервые на основе многоканального сингулярного спектрального анализа разработана методика фильтрации данных спутников GRACE. На основе этого метода выполнен анализ перераспределения масс в бассейнах крупных рек России по данным GRACE.
4. Эффективность МССА продемонстрирована на данных по угловому моменту атмосферы (ААМ) и океана (ОАМ) на сетке широт и долгот. По результатам анализа зонального ААМ по данным NCEP/NCAR с 1948 г. и ECMWF с 1900 г. получены карты главных компонент, связанные с трендами, Эль-Ниньо Южным колебанием (ЭНЮК), полугодовым и годовым колебаниями. Определен

их вклад в изменения длительности суток. Экваториальные компоненты ААМ отфильтрованы и изучены в чандлеровском диапазоне частот. Выявлены регионы максимальных вкладов в ЧДП от массовой компоненты ОАМ.

5. Выполнен анализ первых гармоник гравитационного потенциала Земли по спутниковым данным. Оценены характеристики смещений геоцентра. Впервые выявлена смена направления тренда в гармонике  $J_2$  гравитационного потенциала, произошедшая в  $\sim 2005$  г. По коэффициентам  $C_{21}$ ,  $S_{21}$  вычислены возбуждающие функции и продемонстрировано их согласие дрейфом полюса. Тем самым доказано, что происходящие в последнее время под действием изменений климата перераспределения масс влияют на вектор вращения Земли.
6. Представлен статистический анализ выполнявшихся с 2002 по 2017 гг. ежесуточных прогнозов ПВЗ. Исследована комбинация, основанная на трех прогнозах, выполнявшихся в ГАИШ, и одном – в Шанхайской обсерватории. Точность разработанного Российско-Китайского комбинированного прогноза оказалась лишь немногим уступающей прогнозам бюллетеня А МСВЗ, выполнявшихся USNO.
7. Создан пакет программ для анализа и обработки параметров вращения Земли и их прогнозирования, а также для МССА-обработки геофизических полей, данных спутников GRACE уровня L2, угловых моментов океана и атмосферы на широтно-долготной сетке.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Проведенные в диссертационной работе исследования вращения Земли и геофизических процессов способствуют объяснению явлений, происходящих на планете и в ближнем космосе, улучшают координатное обеспечение и, по нашему мнению, позволяют не только улучшить прогнозы имеющих стратегическое значение ПВЗ, но и повысить прогнози-

руемость изменений климата на планете, последствия которых для мировой экономики трудно переоценить.

Разработанное обобщенное уравнение Эйлера-Лиувилля и результаты вычисления бюджета геодезических и геофизических возбуждений открывают возможности учета эффектов трехосности Земли и проведения уточнённого анализа наблюдений за вращением Земли, а также показывают, какие эффекты еще требуют объяснения.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Новые обобщенные уравнения Эйлера-Лиувилля, включающие трехосность и эффект асимметрического полюсного прилива, в том числе в спектральной форме. Временные ряды для симметрического и асимметрического возбуждений, восстановленные на основе этих уравнений. Вывод о достоверном согласии с геофизическими возбуждениями в прямом чандлеровском диапазоне.
2. Результаты использования метода корректирующей фильтрации Пантелеева: восстановленное с его помощью геофизическое возбуждение чандлеровского движения полюса.
3. Доказательство того, что в чандлеровском колебании присутствует 40-летняя модуляция связанная с 20-летней модуляцией возбуждающих функций и расщеплением частот.
4. Выделенные с помощью многоканального сингулярного спектрального анализа (МССА) тренды в зональном угловом моменте океана (ОАМ) и атмосферы (ААМ), а также компонента изменчивости ветров и давлений, связанная с Эль-Ниньо Южным колебанием (ЭНЮК). Результаты применения МССА к гравитационному полю Земли по данным спутников GRACE. Карты аномалий масс и временные ряды изменений масс в бассейнах крупных рек России с 2003 по 2017 гг.
5. Полученные по коэффициентам первой степени гравитационного поля Земли, оценки трендов в движении геоцентра. Вывод о величинах дрейфа полюса, основанный на анализе коэффициентов  $C_{21}$ ,  $S_{21}$ ,

меняющихся из-за перераспределения масс ледяных щитов. Вывод о том, что тренд в  $J_2$  сменился с убывающего на возрастающий в  $\sim 2005$  г.

6. Аргументы в пользу того, что 13.6- и 7-суточные пики в экваториальном ААМ в небесной системе отсчета вызваны приливным влиянием Луны.
7. Результаты вычисления и комбинирования российско-китайских (ГАИШ и SIAO) прогнозов параметров вращения Земли с точностью, сравнимой с точностью прогноза Центра комбинирования и прогнозирования ПВЗ USNO.

## **Методы исследований**

Помимо теоретических методов, в работе использованы разнообразные математические методы обработки данных. Перечислим среди них вейвлет и Фурье-анализ, фильтры, в частности, В.Л. Пантелеева, многоканальный сингулярный спектральный анализ, равноточный и взвешенный методы наименьших квадратов, регуляризацию Тихонова, метод Мура-Пенроуза, сингулярное разложение матриц. Среди статистических методов можно назвать корреляционный анализ, метод Блэкмана-Тьюки, тест на общую причину и др. При работе с гравитационным полем Земли применялись коэффициенты разложения по сферическим функциям. Автор также старался представить полученные материалы в удобном для восприятия виде, в т.ч. анимируя карты изменчивости геофизических полей.

## **Степень достоверности и апробация результатов**

Тщательная проработка методологии и проверка результатов проводилась в течение нескольких месячных стажировок в Парижской обсерватории. Выделение чандлеровского возбуждения, к примеру, проверено четырьмя способами: сингулярным спектральным анализом, фильтрацией Пантелеева, методом средней квадратической коллокации, фильтра-

цией с отсечением Фурье-компонент. Восстановление возбуждения выполнено, помимо фильтрации Пантелеева, методом Мура-Пенроуза отсечения сингулярных чисел и регуляризацией Тихонова. Приведена формула и построена модель для огибающей. Результат наличия модуляций подтверждается всеми способами.

Там, где автор не был первопроходцем, но совершенствовал анализ, обрабатывал более полные данные, он продвигался увереннее. Там, где появлялось новое, например, расщепление гармоника  $O_1$  атмосферного прилива, результат проверялся всесторонне. Применялись различные статистические критерии. Для названной гармоника, к примеру, были построены сглаженные оценки спектра, спектр по методу Блэкмана-Тьюки, очерчены границы достоверности.

Результаты МССА по данным ААМ и GRACE сравнивались с результатами зарубежных коллег. Где было возможно, выполнялась независимая проверка их на модельных данных, выделенные компоненты подтверждались методом наименьших квадратов, Фурье-анализом. Все коэффициенты корреляции в работе рассматривались под критическим углом зрения, оценивалась их достоверность, приводились погрешности оценок, проверялись статистические гипотезы.

Теоретические выводы перекрестно проверялись, формулы перевыводились. Там где велась совместная работа, соавторы пытались независимо прийти к одному и тому же результату. В исследовании автор также старался руководствоваться здравым смыслом.

При публикации результатов в рецензируемых изданиях и журналах с высоким рейтингом, учитывалась критика уважаемых рецензентов, специалистов в соответствующей области исследований.

Результаты работы доложены на более чем 50 научных конференциях и семинарах, среди которых: ассамблеи EGU-2018, 2017, 2016, 2014, AOGS-2017, 2016, IUGG-2015, COSPAR-2014, конференции Journées-2017, 2014, 2013, 2010, 2005, 2003, Сагитовские чтения 2016, 2013, 2011, 2010, 2008 гг. в ГАИШ, астрометрические и молодежные конференции в ГАО РАН в Пулковом, Гамовские чтения в Одессе, семинары Парижской, Шанхайской, Киевской обсерваторий, Уханьского университета, КНР,

Университета штата Огайо, США.

**По результатам диссертационного исследования опубликованы работы:**

**Статьи в журналах, индексируемых Scopus и WOS:**

- [1] Bizouard C., L. Zotov, and N. Sidorenkov, Lunar influence on Equatorial Atmospheric Angular Momentum, *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, Vol. 119, Iss. 21, pp. 11920-11931, 2014, DOI: 10.1002/2014JD022240 (Импакт-фактор 3.318).
- [2] Bizouard C., L. Zotov, Asymmetric effects on polar motion, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, Vol. 116, Issue 2, pp. 195-212, 2013. (Импакт-фактор 1.584).
- [3] Kalarus, M., Schuh, H., Kosek, W., Akyilmaz, O., Bizouard, Ch., Gambis, D., Gross, R.S., Jovanovic, B., Kumakshev, S., Kutterer, H., Mendes Cerveira, P.J., Pasynok, S., Zotov, L., Achievements of the Earth orientation parameters prediction comparison campaign. *J Geod.*, Vol. 84, pp. 587-596, 2010. (Импакт-фактор 2.949).
- [4] Сколотнев С.Г., Турко Н.Н., Соколов С.Ю., Пейве А.А., Цуканов Н.В., Колодяжный С.Ю., Чамов Н.П., Барамыков Ю.Е., Пономарев А.С., Ефимов В.Н., Ескин А.Е., Петрова В.В., Головина Л.А., Лаврушин В.Ю., Летягина Е.А., Шевченко Е.П., Кривошея К.В., Зотов Л.В. Новые данные о геологическом строении зоны сочленения Зеленомысского поднятия, котловины Зелёного мыса и подводных гор Батиметристов (Центральная Атлантика). Докл. РАН. 2007. Т. 416. N 4. С. 525-529. (Импакт-фактор 1.04).
- [5] Frolova Natalia L., Belyakova Pelagiya A., Grigoriev Vadim Yu, Sazonov Alexey A., Zotov Leonid V., Jerker Jarsjo, Runoff fluctuations in the Selenga River Basin, *Regional Environmental Change*, Springer Verlag (Germany), Vol 17, pp. 1965-1976, 2017. (Импакт-фактор 2.919).
- [6] Zotov L., Sidorenkov N.S., C. Bizouard, C.K. Shum, WB. Shen,

- Multichannel singular spectrum analysis of the axial atmospheric angular momentum, *Geodesy and Geodynamics*, Vol. 8, Iss. 6, 2017, pp. 433-442, KeAi, China, 2017, doi:10.1016/j.geog.2017.02.010. (Импакт-фактор 1.10).
- [7] Zotov L., C. Bizouard, Regional atmospheric influence on the Chandler wobble, *Advances in Space Research*, Vol. 55, Iss. 5, pp. 1300-1306, 2015, doi:10.1016/j.asr.2014.12.013, (Импакт-фактор 1.401).
- [8] Zotov L., Bizouard C., Reconstruction of prograde and retrograde Chandler excitation, *Journal of Inverse and Ill-posed problems*, Vol. 24, Iss. 1, pp. 99-105, 2016, DOI: 10.1515/jiip-2013-0085. (Импакт-фактор 0.783).
- [9] Zotov L., Bizouard C., Shum C.K., A possible interrelation between Earth rotation and climatic variability at decadal time-scale, *Geodesy and Geodynamics*, Vol. 7, Iss. 3, pp. 216-222, KeAi, China, 2016, doi:10.1016/j.geog.2016.05.005 (Импакт-фактор 1.10).
- [10] Zotov L.V., C. Bizouard, On modulations of the Chandler wobble excitation, *Journal of Geodynamics*, 62, 30-34, 2012. doi:10.1016/j.jog.2012.03.010 (Импакт-фактор 1.10).
- [11] Zotov L.V., Dynamical modeling and excitation reconstruction as fundamental of Earth rotation prediction, *Artificial satellites*, 45(2), pp. 95-106, Warsaw, 2010, (Импакт-фактор 0.71).
- [12] Zotov L.V., Xu X.Q., Skorobogatov A., Zhou Y.H., Combined SAI-SHAO prediction of Earth orientation parameters since 2012 till 2017, *Geodesy and Geodynamics*, Vol. 9, Iss. 6, pp. 485-490, KeAi, China, 2018. (Импакт-фактор 1.10).
- [13] Козырева В.С., Богомазов А.И., Демков Б.П., Зотов Л.В., Тутуков А.В. Кандидат в экзопитеры в затменной двойной FL Луг, *Астрономический журнал*, Том. 92, N. 11, стр. 925-942, 2015. (Импакт-фактор 0.592).
- [14] Фролова Н.Л., Белякова П.А., Григорьев В.Ю., Сазонов А.А., Зотов Л.В. Многолетние колебания стока рек в бассейне Селенги, *Водные ресурсы*, Том. 44, N 3, стр. 243-255, М. 2017. (Импакт-фактор

1.304).

- [15] Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Григорьев В.Ю., Использование спутниковой системы измерения поля гравитации (GRACE) для оценки водного баланса крупных речных бассейнов, Вестник Московского университета. Серия 5: География, Изд-во Моск. ун-та, М., N 4, стр. 27-34, 2015. (Импакт-фактор 0.721).
- [16] Зотов Л.В., Регрессионные методы прогнозирования параметров вращения Земли, Вестник Московского университета, Серия 3: Физика, Астрономия, Изд-во Моск. ун-та, М. N 5, стр. 64-68, 2005. (Импакт-фактор 0.503).

**Статьи в сборниках, индексируемых в Scopus и WOS:**

- [17] Xu X.Q., Zotov L.V., Zhou Y.H., Combined prediction of Earth orientation parameters, China Satellite Navigation Conference (CSNC), Proceedings Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 160, Part 2, pp. 361-369, 2012, DOI: 10.1007/978-3-642-29175-3\_32. (Импакт-фактор 0.20).
- [18] Zotov L., Bizouard C., Escargot effect and the Chandler wobble excitation, Proceedings International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond, Journal of Physics: Conference Series (JPCS), Vol. 955, conf. 1, 012033, 2018. (Импакт-фактор 0.48).
- [19] Leonid Zotov, Elena Scheplova, MSSA of globally gridded OAM from ECCO, AAM from ECMWF, and gravity from GRACE, IEEE publications of 2016 Third International Conference on Digital Information Processing, Data Mining, and Wireless Communications (DIPDMWC), pp.127-132, Moscow, Russia, 2016, doi:10.1109/DIPDMWC.2016.7529376.
- [20] Zotov L., Shum C.K., Multichannel singular spectrum analysis of the gravity field data from GRACE satellites, AIP Proceedings of the 9th Gamow summer school, 1206, pp. 473-479, Odessa, 2009. (Импакт-фактор 0.26).



### **Статьи в журналах ВАК:**

- [21] Зотов Л.В., В.Д. Юшкин, О.А. Храпенко, Поправка гидрологии в гравитационное поле по спутниковым данным, Геодезия и картография, Т. 79, N 1, стр. 2-7, 2018. (Импакт-фактор 0.324).
- [22] Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Шам С.К., Гравитационные аномалии в бассейнах крупных рек России, Природа РАН, N 5, стр. 3, 2016. (Импакт-фактор 0.218).
- [23] Сидоренков Н.С., Чазов В.В., Зотов Л.В., 206-суточный лунный цикл в аномалиях погоды последних лет, Природа РАН, N 4, стр. 19-23, 2018. (Импакт-фактор 0.218)
- [24] Сидоренков Н.С., Бизуар К., Зотов Л., Салстейн Д., Момент импульса атмосферы, Природа РАН, N 4, стр. 22-28, РАН, 2014. (Импакт-фактор 0.218).

### **Главы в рецензируемых монографиях:**

- [25] Zotov L.V., C.K. Shum, N.L. Frolova, Gravity changes over Russian rivers basins from GRACE, in Planetary Exploration and Science: Recent Results and Advances, Edt. by Sh. Jin, Springer, 2015. (Индексируется в Scopus).
- [26] Зотов Л., Теория фильтрации и обработка временных рядов, курс лекций, М., Физический факультет МГУ, 2010, 200 с., ISBN 978-5-8279-0089-4, <http://lnfm1.sai.msu.ru/grav/english/lecture/filtering/> (Индексируется ВАК).

### **Глава в книге:**

- [27] Zotov L.V., Panteleev V.L., Filtering and inverse problems solving, Computational Methods for Applied Inverse Problems, Inverse and Ill-Posed Problems Series 56, Edited by Y.F. Wang, A.G. Yagola and C.C. Yang, De Gruyter & Higher Education Press, 169-194, 2012. ISBN 978-3-11-025904-9

### Статьи в сборниках конференций:

- [28] Зотов Л.В., Фролова Н.Л., Юшкин В.Д., О некоторых достижениях миссии GRACE, Доклады научно-практической конференции “Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение”, 14-15 февраля 2017, Менделеево, ФГУП “ВНИИФТРИ”, с. 227-236, 2017.
- [29] Зотов Л.В., Балакирева Е.Ю., Исследование вариаций коэффициента гравитационного поля  $J_2$  методом ССА. Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 44-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, Москва, ИФЗ РАН, стр. 145-146, 2017.
- [30] Зотов Л., Балакирева Е., Исследование вариаций коэффициента гравитационного поля  $J_2$  методом ССА, Материалы 4-й тектонофизической конференции ИФЗ им О.Ю. Шмидта РАН, Москва, стр. 495-501, 2016.  
[http://www.ifz.ru/fileadmin/user\\_upload/subdivisions/506/Konferencii/2016/Mat/V2/5/Zotov.pdf](http://www.ifz.ru/fileadmin/user_upload/subdivisions/506/Konferencii/2016/Mat/V2/5/Zotov.pdf)
- [31] Зотов Л., Власова В., Вариации придонного давления по данным GRACE, Электронный сборник материалов молодежной научной конференции КИМР-2016, стр. 275-281, Севастополь, Россия, 2016.
- [32] Зотов Л.В, Бизуар К., Шум С.К., О возможной взаимосвязи вращения Земли и изменений климата в последние 150 лет, Труды конференции Пулковско-2015, Известия ГАО в Пулкове, N 223, стр. 103-108, СПб, 2016.
- [33] Зотов Л., Сидоренков Н., Бизуар К., Пастушенкова М., Многоканальный сингулярный спектральный анализ углового момента атмосферы, Известия ГАО РАН в Пулкове, Труды VI Пулковской молодежной астрономической конференции, Том. 224, стр. 49-64, СПб, 2016.
- [34] Зотов Л., Сидоренков Н., Бизуар К., О движениях Луны как возможном климатообразующем факторе, Труды V Пулковской молодежной астрономической конференции, Известия ГАО в Пулкове,

- № 222, стр. 41-48, СПб, 2015.
- [35] Зотов Л., Фролова Н., Телегина А.А., Гравитационные изменения в бассейнах крупных рек России по данным GRACE, Альманах современной метрологии, № 3, стр. 142-158, ВНИИФТРИ, 2015.
- [36] Л. В. Зотов. Динамическое моделирование и прогноз вращения Земли, Труды ИПА РАН. Вып. 13. 2005. С. 228-237.
- [37] Зотов Л., Носова С. А., Баринов М. В. Многоканальный сингулярный спектральный анализ данных по гравитационному полю со спутников GRACE, Труды 37-го международного семинара им Успенского. - ИФЗ РАН Москва, стр. 25-29, 2010.
- [38] Горшков В.Л., Малкин З.М., Зотов Л.В., Вращение Земли, Российский национальный отчет по геодезии, журнал Науки о Земле "GeoScience", № 3, стр. 44-45, Геодозор, Москва, Россия, 2015.
- [39] Кафтан В.И., Сермягин Р., Зотов Л.В., Гравитационное поле, Российский национальный отчет по геодезии, журнал Науки о Земле "GeoScience", № 3, стр. 22-28, Геодозор, Москва, Россия, 2015.
- [40] Фролова Н.Л., Зотов Л.В., Новые возможности междисциплинарных исследований: гравитационное поле Земли и гидрология, Публикации вторых Виноградовских чтений "Искусство гидрологии", стр. 306-310, СПб, Россия, 2015.
- [41] Aibulatov D., Zotov L., Frolova N., Chalov S., New insights in remote sensing applications to obtain information about water bodies, Earth from Space, pp. 67-70. August 2015.
- [42] Bizouard C., Zotov L., Sidorenkov N., Lunar influence on equatorial atmospheric angular momentum, Proceedings of Journees 2014, p. 163-166, Pulkovo, Russia, 2014.
- [43] Zotov L., Bizouard C., Prediction of the Chandler wobble, Proceedings of Journees 2014, pp. 198-201, Pulkovo, Russia, 2014.
- [44] Zotov L.V., Sea Level And Global Earth Temperature Changes have common oscillations, Odessa Astronomical Publications, 26(2), 289-291, 2013.

- [45] Zotov L. V., Excitation function reconstruction using observations of the polar motion of the Earth, The Proceedings of the Journees 2005, Space Research Centre of the Polish Academy of Sciences, pp. 237-240, Warsaw, Poland, 2005.
- [46] Zotov L., Bizouard C. Study of the prograde and retrograde excitation at the Chandler frequency Proceedings of Journees 2013, pp. 168-171, 17 September, 2013, Paris, France.
- [47] Zotov L., Application of Multichannel singular spectrum analysis to geophysical fields and astronomical images, Advances in Astronomy and Space Physics, 2, pp. 82-84, 2012.
- [48] Zotov L., On the similarities between Earth rotation and temperature changes, Odessa Astronomical Publications, N 2, p. 225, 2012.
- [49] Zotov L., Analysis of Chandler wobble excitation, reconstructed from observations of the polar motion of the Earth, Journees 2010, pp. 188-191, Paris, France.
- [50] Zotov L.V., Pasynok S.L., Analysis of discrepancies of the nutation theories MHB2000 and ZP2003 from VLBI observations, The Proceedings of the Journees 2005, Space Research Centre of the Polish Academy of Sciences, pp. 135-136, Warsaw, Poland, 2005.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из предисловия, введения, одиннадцати глав, заключения, пяти приложений, списков сокращений, литературы (518 наименований), рисунков (92) и таблиц (16). Полный текст диссертации изложен на 327 страницах.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** даётся краткое содержание и пункты из автореферата по требованиям ВАК. Поясняется выбор темы, даётся описание того, что вошло в работу, и что оказалось за кадром. Перечисляются клю-

чевые вопросы, поставленные в исследовании. Упомянуты те ученые, которые своими работами инициировали разработку той или иной темы. Обсуждается современное положение дел.

**Первая глава** посвящена описанию параметров вращения (ориентации) Земли. Объясняются методики их измерений и причины, вызывающие появление в их спектре различных компонент. Кратко освещается история разработки теории вращения Земли. Приводятся графики движения полюса (рис. 1.1), длительности суток (рис. 1.4), отклонений небесного полюса  $dX$ ,  $dY$  от модели прецессии и нутации (рис. 1.7) и др.

Во **второй главе** выводится обобщенное уравнение Эйлера-Лиувилля для положения оси вращения Земли

$$(1 - U)m + \frac{i}{\sigma_e}(1 + eU)\dot{m} - Vm^* + \frac{i}{\sigma_e}eV\dot{m}^* = \Psi^{(pure)}. \quad (1)$$

В нём учтена трехосность мантии и асимметрия полюсного прилива в океане [2, 7, 46]. Появление в уравнении отклонений положения мгновенной оси  $m$  и сопряженной к ней величины  $m^*$  ведет к связанности прямого и обратного спектрального диапазона и появлению двух корней характеристического многочлена – на прямой и обратной чандлеровской частотах. Само значение комплексной чандлеровской частоты теперь определяется через вековое число Лява и введенное К. Бизуаром океаническое число. Дается общее решение обобщенного уравнения, показывается, что в наблюдениях появятся асимметрические эффекты величиной порядка 1 мс дуги.

В **третьей главе** определяются параметры полосового фильтра Пантелеева для выделения чандлеровского колебания. Проводится сравнение методов решения обратных задач в применении к задаче восстановления чандлеровского возбуждения по наблюдениям за ДП. Применены метод усечения сингулярных чисел Мура-Пенроуза, метод регуляризации Тихонова и корректирующая фильтрация Пантелеева [26, 27], которые привели к схожим между собой результатам (рис. 3.3). Удастся выявить квазидвадцатилетние модуляции амплитуды возбуждения. Проводится анализ погрешности выделения чандлеровской компоненты. По мотивам работ [7, 8] проводится сопоставление функций углового момен-

та атмосферы ААМ с геодезическим возбуждением в чандлеровском диапазоне. На отфильтрованных в этом диапазоне картах средних вкладов ААМ (рис. 3.6) четко выделяются Северная Атлантика, вносящая значимый вклад в ветровую меридиональную компоненту ААМ, и территория Европы, откуда поступает большой вклад в экваториальную компоненту давления. Делается вывод, что суммарная изменчивость ААМ объясняет около 50% энергии ЧДП.

В **четвертой главе** построена модель огибающей ЧДП, содержащая ~восьмидесяти- и ~сорокалетние колебания. Аналитически, на базе вывода уравнения для огибающей, и на основе модели, показанной на рис. 1 (4.6 в диссертации), доказывається, что наблюдаемые в возбуждении двадцатилетние модуляции связаны с сорокалетними колебаниями амплитуды ЧДП. Доказывається, что алгоритм корректирующей фильтрации Пантелеева является регуляризирующим алгоритмом, а его параметры выбраны квазиоптимально. На базе модели для огибающей ЧДП строится прогноз. Обсуждаются причины уменьшения амплитуды ЧДП в 2010-е и 1930-е гг., прогнозируется скачок фазы колебания, делаются попытки его объяснения пересечением резонансной частоты, а также переходом огибающей колебания удвоенного периода через ноль. Отмечается, что модуляция несущей связана с расщеплением спектра. Спектральному представлению ЧДП на длительном интервале времени ставится в соответствие представление на основе мгновенной частоты и фазы. В рамках последнего чередование периодов раскручивания и закручивания ЧДП, которые длятся по 20 лет для модуляции сорокалетнего периода, ведёт к появлению ретроградных компонент в спектре, вычисленном в скользящем окне. Этот математический эффект назван нами “эффектом эскарго” [18]. Обсуждается понятие резонанса. Доказывається, что если заранее не отделить ретроградную компоненту, при восстановлении прямого возбуждения ЧДП, оно затеряется в ней.

**Пятая глава** содержит результаты сравнения геофизических возбуждений ОАМ и ААМ с геодезическими, вычисленными в рамках обобщенного уравнения Эйлера-Лиувилля в чандлеровском диапазоне [8, 18]. В операторном виде выписываются симметрическая и асимметрическая

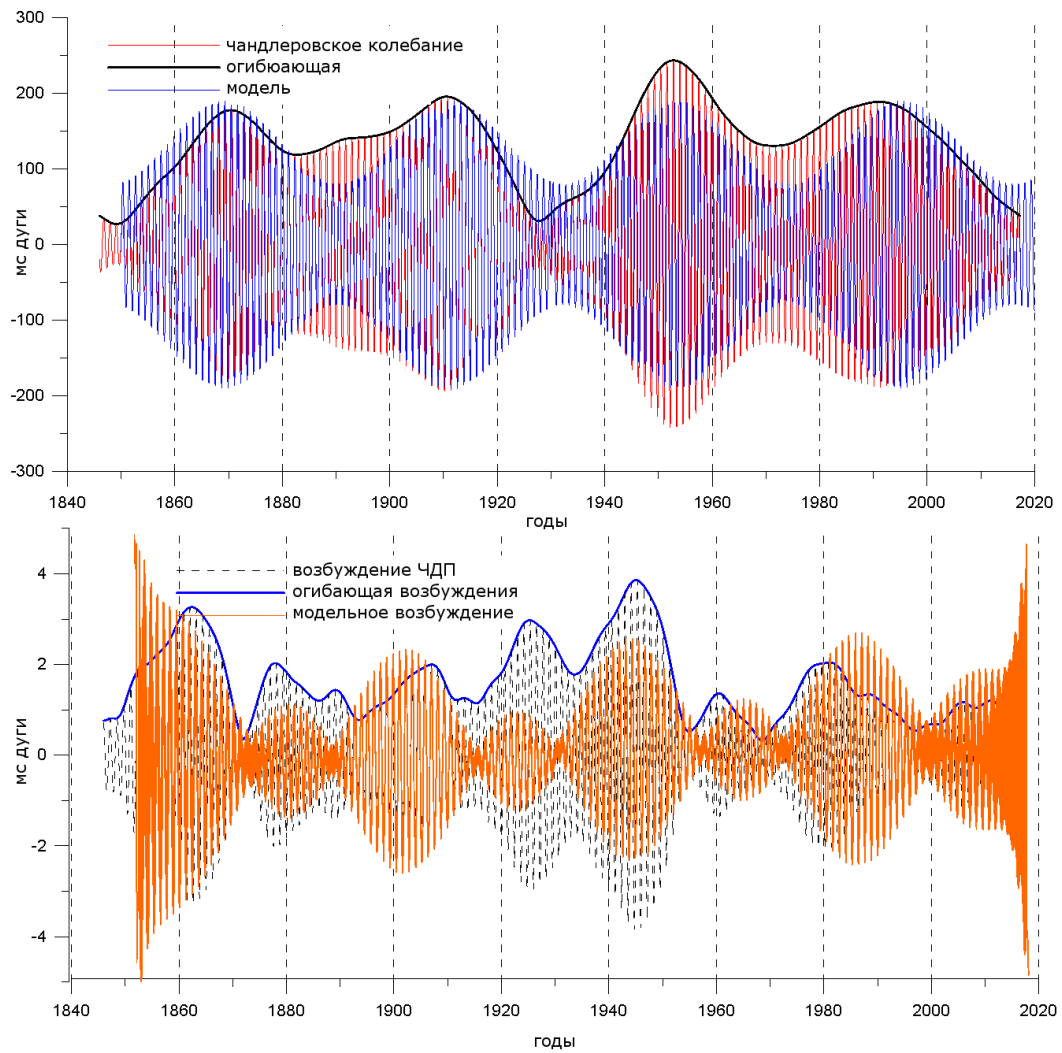


Рис. 1: Вверху: выделенное чандлеровское колебание и его модель. Внизу: выделенное чандлеровское возбуждение по реальным данным и на основе модели.

передаточные функции, входящие в обобщенное уравнение. Для них решается обратная задача выделения симметрического и асимметрического чандлеровского возбуждений. Показано, что в ретроградном диапазоне вклад от асимметрической части достигает величин  $\sim 1$  мс дуги. В прямом диапазоне он в десятки раз меньше (рис. 5.3). Классическая симметрическая часть возбуждения в окрестности прямой чандлеровской частоты не превосходит 3 мс дуги (рис. 5.2), однако ретроградная часть достигает нескольких десятков мс. При хорошем согласии геодезического и геофизического возбуждений в прямом чандлеровском диапазоне, разногласия в обратном диапазоне оказываются весьма велики (таблица 5.1). Выдвигается предположение, что это может быть следствием усиления шумов наблюдений до 1900 г., возникающего в ходе решения обратной задачи.

В **шестой главе** методом многоканального сингулярного спектрального анализа (МССА) исследованы зональные компоненты углового момента атмосферы ААМ по данным NCEP/NCAR с 1948 г. и ECMWF с 1900 г. на сетке широт и долгот [6]. Главные компоненты (ГК) пересчитаны в величины влияния на длительность суток LOD. Изучены вклады давления и ветра. Выделены медленные тренды в ААМ величиной 0.02 (ветер) и -0.25 (давление) мс за 60 лет, годовое, полугодовое, 4-месячное колебания. Особое внимание вызывает компонента, связанная с ЭНЮК и вносящая вклад в LOD амплитудой порядка 0.1 мс (ветер) и 0.015 мс (давление). Прослежено глобальное (по всей Земле) распространение этой моды.

**Седьмая глава** посвящена исследованию пиков в спектре экваториального ААМ с периодами 28.5 и 25.8 часов в земной системе отсчета. Посредством демодуляции углового момента атмосферы сделан его перевод в небесную систему, где эти спектральные пики имеют периоды 7 и 13.6 суток. Такой “небесный” ААМ отфильтрован в диапазоне от 2 суток до 1 месяца. Выявлена пропорциональность между компонентами ветра и давления в этом диапазоне. Вычислены моменты приливных сил, показано, что изменения давления из-за так называемого момента балджа ответственны за приливные колебания ветров и вызывают 13.6-



суточный пик в ААМ. Расщепление 13.6-суточного пика из-за 18.6-летней модуляции прилива и соответствие его фазы и амплитуды модельным позволяют возложить ответственность за него на лунный прилив. Дается сходная интерпретация широкого 7-суточного пика. Показано, что как 13.6-суточный, так и 7-суточный пики ААМ особенно четко наблюдаются вблизи экватора (рис. 9.4). В более высоких широтах их скрывает турбулентность атмосферы. Основные результаты главы опубликованы в [1, 24, 42].

**Восьмая глава** диссертации посвящена океану, как важному фактору, оказывающему влияние на вращение Земли и климат. Даются общие сведения о происходящих на Земле климатических изменениях, приводятся тренды в температуре  $T$  и уровне моря  $SL$  по данным IPCC. После снятия трендов совместный сингулярный спектральный анализ  $T$  и  $SL$  показывает наличие шестидесяти, двадцати- и десятилетних колебаний в обоих важнейших климатических индексах. Обсуждается роль океана и его возможный отклик на изменения поверхностной температуры. Кратко обсуждаются вопросы взаимосвязи океанической циркуляции с климатическими процессами, в т.ч. с ледниковыми периодами. Приводятся сведения о климатических модах, таких как Северо-Атлантическое (NAO) и Атлантическое многолетнее колебание (AMO), Эль-Ниньо Южное колебание (ENSO), примеры их влияния на скорость вращения Земли. Даются формулы для компонент углового момента океана ОАМ, связанных с течениями и перераспределением водных масс. Выполняется МССА экваториальной массовой компоненты ОАМ на сетке по данным ЕССО с 1993 по 2010 г. Приводятся карты характеристик годового колебания и тренда ОАМ. Делаются выводы о районах мирового океана, откуда от перераспределений масс и давления поступают наибольшие вклады в движение полюса.

**Девятая глава** посвящена описанию данных космической гравиметрической миссии GRACE за весь период её работы с 2002 по 2017 гг. С помощью МССА данные GRACE удалось отфильтровать от полосовых шумов – страйпов и построить карты глобальных и региональных колебаний и трендов (рис. 9.9). В разделе 9.3 представлены графи-

ки перераспределений масс в бассейнах крупных рек России, на которых отлично видны экстремальные события засух, наводнений, снегонакопления. Общие тренды несут важную гидрологическую информацию [5, 14, 15, 22, 25, 35]. Измерения GRACE сравниваются с отсчетами баллистического гравиметра ГАБЛ-М на Главном гравиметрическом пункте СССР в обсерватории на Красной Пресне (рис. 9.7), согласие находится на уровне микрогал. В главе также представлены результаты МССА-обработки данных GRACE по океанам. GRACE – космическая миссия, проработавшая 15 лет, единственная, позволявшая получить информацию о перераспределении массы океана и нестерической компоненте изменений уровня моря. Удачно осуществленный 22 мая 2018 г. запуск следующей миссии GRACE Follow-On очень обрадовал научное сообщество, данные L2 начали поступать в июне 2019 г.

В **десятой главе** исследованы коэффициенты гравитационного поля Земли первой и второй степеней по данным спутниковых методов. Первые коэффициенты по данным лазерной локации SLR с 2002 по 2017 гг. проанализированы методом МССА. Выделены тренды положения геоцентра, показывающие смещение к южному полюсу на  $\sim 0.1$  мм/год и годовые колебания. Выполнено сравнение рядов SLR и GRACE для коэффициента  $C_{20}$ , связанного с динамическим форм-фактором  $J_2$ , описывающим полярное сжатие геоида. Выделены годовое, полугодовое, декадное колебания и тренд в  $J_2$ , который отличается от тренда по модели послеледниковой поднятия GIA ICE 6G\_C тем, что с 2005 года его направление поменялось с убывающего на возрастающее. Выполнен пересчет этих изменений в величины влияния на длительность суток LOD, которая также имеет экстремум в  $\sim 2005$  году. Влияние вариаций  $J_2$  на LOD найдено не превосходящим 0.4 мс (рис. 10.7). На рисунке 2 (10.8) представлен график, иллюстрирующий корреляцию LOD, напряженности магнитного поля Земли и инвертированных вариаций температуры на планете на декадных интервалах времени. Шестидесятилетнее колебание в температуре оказывается коррелированным со скоростью вращения Земли и изменениями магнитного поля. Проводится анализ значимости корреляций и тест на общую причину изменчивости. В разделе

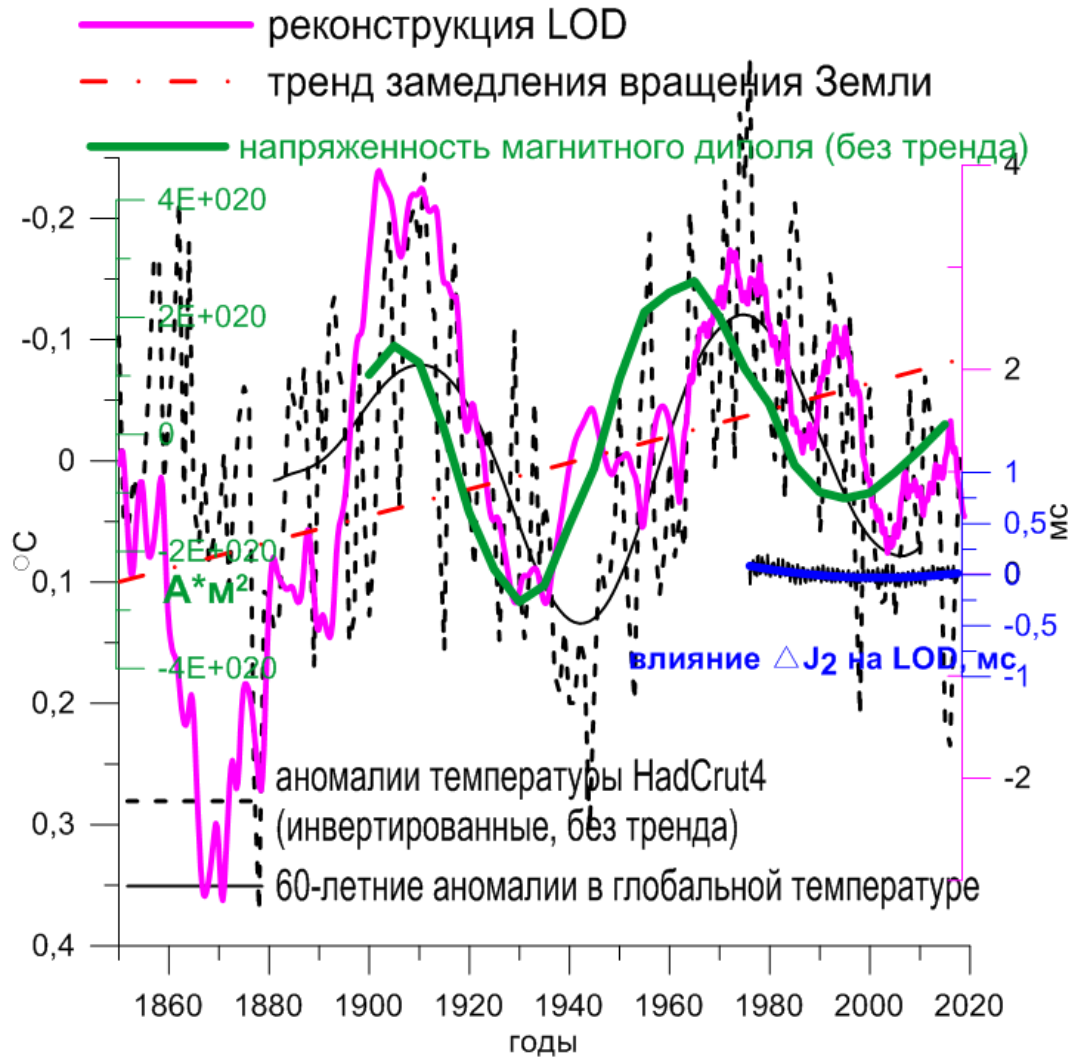


Рис. 2: Сравнение вызванных  $J_2$  изменений LOD, аномалий температуры и магнитного дипольного момента с долговременной реконструкцией LOD с 1832 по 2017 г. Тренд LOD (0.013 мс/год) показан красным пунктиром.

Таблица 1: Сравнение точности нашего комбинированного прогноза COMB и прогноза бюллетеня А МСВЗ USNO за 2016 г.

горизонт сутки	x	USNO x мс дуги	y	USNO y мс дуги	UT1-UTC 0.0001 сек	USNO UT1-UTC 0.0001 сек
1	1.3	0.3	0.5	0.2	1.0	1.3
5	2.6	2.1	1.5	1.4	4.5	2.2
10	3.7	3.5	2.5	2.5	10.8	6.6
20	5.1	5.0	3.9	4.5	24.0	20.0
40	7.8	7.5	7.1	8.2	43.4	45.2
90	9.8	7.9	12.2	15.2	95.3	91.3

10.7 изменения коэффициентов геопотенциала второй степени  $C_{21}$ ,  $S_{21}$  пересчитаны в возбуждающие функции и, на основе сравнения с трендами в движении полюса на интервале 2002-2018 гг., подтвержден тот факт, что дрейф полюса отражает вызванные изменениями климата перераспределения масс на Земле. Сделаны оценки трендов по моделям GIA.

В **одиннадцатой главе** дается описание прогнозов параметров вращения Земли (ПВЗ), выполнявшихся ежедневно с 2012 по 2017 гг. в ГАИШ и Шанхайской обсерватории, и методики их комбинации [3, 11, 12, 16, 17]. Проводится статистический анализ. Средние и средние квадратические ошибки отклонений прогнозов от наблюдений представлены графически (рис. 11.8, 11.9). Комбинированный прогноз сравнивается с прогнозом бюллетеней А МСВЗ, вычисленным USNO, на всем периоде 2012-2017 гг. в таблице 11.1, и для 2016 г. – в таблице 1 (11.2). Погрешность нашего комбинированного прогноза, как показывает статистика, имеет тот же порядок, что и погрешность прогноза USNO, а для 2016 г. точность нашего комбинированного прогноза для у-координаты полюса и UT1-UTC на горизонте  $>20$  суток даже превышает точность прогнозов USNO.

В **заклучении** перечисляются основные результаты работы, дается более общий взгляд на поставленные вопросы и обсуждаются дальнейшие перспективы.

**Приложение А** служит для ознакомления с современной теорией вращения Земли. Изложение, начинающееся с основ механики и кинематических соотношений, идет через принцип Лагранжа к динамическим уравнениям Эйлера. Выводятся линеаризованные уравнения Эйлера-Лиувилля для компонент вектора мгновенной угловой скорости. С помощью функций углового момента делается переход к уравнениям для координат полюса. Учет полюсного прилива и вязко-упругих свойств Земли приводит к уточнению чандлеровской частоты. После общих замечаний об обозначениях выводится уравнение для углового момента жидкого ядра, служащего основой аппроксимации Сасао-Окубо-Саито [50]. Полная система уравнений для компонент вектора угловой скорости трехслойной Земли, состоящей из мантии, жидкого внешнего и твердого внутреннего ядер в двуосной аппроксимации, выводится по методике Мэтьюса, Сасао, Дехант и др. В матричном виде выписывается общая система уравнений вращения трехслойной Земли, поясняется смысл четырех резонансных частот.

**Приложение Б** посвящено оконному преобразованию Габора и методике построения огибающей на его основе.

В **приложении В** описана корректирующая фильтрация Пантелеева [26, 27]. Приводятся формулы окон Пантелеева и даются указания к их использованию для подавления шумов, усиливаемых обратным оператором.

В **приложении Г** дано краткое объяснение многоканального сингулярного спектрального анализа МССА.

В **приложении Д** перечислены выявленные ошибки прогнозов.

В **приложении Е** дается каталог компьютерных программ диссертации.

### **Личный вклад автора**

**В настоящей диссертации и совместных работах автору принадлежат следующие результаты** В главах 2 и 5 и работах [2, 8] сформулированы обобщенные уравнения Эйлера-Лиувилля. Автору при-

надлежит их решение в операторном виде, все вычисления и сравнение симметрической и асимметрической частей возбуждений в чандлеровском диапазоне. В главе 7 и работах [1, 24, 42] автором выполнена демодуляция и фильтрация ААМ в выделенном диапазоне частот, долготно-широтный анализ, построение спектров, интерпретация результатов. Все остальные главы содержат исследования, выполненные, в подавляющей своей части, автором самостоятельно [9, 10, 11, 12, 25, 33]. Автором самостоятельно написано более 300 программ, представленных в приложении Е.

## **Благодарности**

Автор благодарит своих консультантов и учителей К. Бизуара, Н.С. Сидоренкова, В.Л. Пантелеева, Н.Л. Фролову, Н.И. Арбузову, Ю.В. Баркина, Н.А. Чуйкову, В.С. Губанова, А.Г. Яголу, С.М. Копейкина, коллег из России и из-за рубежа, студентов. Работа не прекращалась благодаря поддержке грантов Президента РФ, Академии наук и Научного Фонда КНР, Конгресса США, РФФИ, НИУ ВШЭ и др.