Отзыв

на диссертацию Зотова Леонида Валентиновича «Исследование связей между вращением Земли и геофизическими процессами», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности: 01.03.01 – Астрометрия и небесная механика

Диссертационная работа Зотова Леонида Валентиновича посвящена анализу геофизических источников возбуждения полюса, таких как AAM, OAM, HAM, эффектов на границе жидкого ядра и мантии, а также внутреннего ядра. Осуществлено обобщение уравнений Эйлера-Лиувилля на случай трехосной Земли, и спрогнозированы асимметрические эффекты в движении полюса. Обнаружены двадцатилетние модуляции возбуждения чандлеровского движения полюса. Также в работе исследованы колебания длительности суток LOD, рассмотрено влияние на них изменений зонального углового момента атмосферы.

Актуальность работы прежде всего определяется необходимостью создания новых теоретических методов, предназначенных для совместной обработки широкого спектра современных высокоточных данных, таких как наблюдения спутниковой геодезии, параметры современных океанических и атмосферных моделей, а также моделей гравитационного поля и строения Земли. В определенном смысле в работе диссертанта положено начало междисциплинарным исследованиям, рассматривающим особенности вращения Земли в связи с моделированием глобальной циркуляции океана и атмосферы, что позволило выявить некоторые еще не учтенные факторы. В частности, показано, что на современном этапе уже нельзя пренебрегать эффектами асимметрии движения полюса и поверхностных флюидов.

Практическая значимость работы определяется прежде всего тем обстоятельством, что моделирование неоднородностей вращения Земли необходимо для связи земной и небесной систем координат на современном уровне точности, что в свою очередь способствует решению задач космической навигации и позиционирования.

Что касается **новизны** представленных в работе результатов, то здесь хотелось бы выделить следующие из них:

В диссертации впервые выведено обобщенное уравнение Эйлера Лиувилля для трехосной Земли с океаном и на его основе проведен анализ асимметрических эффектов в движении полюса в чандлеровском диапазоне частот.

С использованием корректирующей фильтрации Пантелеева восстановлено чандлеровское возбуждение, в котором выявлены 20-летние модуляции.

На основе многоканального сингулярного спектрального анализа разработана методика фильтрации данных спутников GRACE, и с ее помощью выполнен анализ перераспределения масс в бассейнах крупных рек России.

По результатам анализа зонального AAM по данным NCEP/NCAR и ECMWF получены карты главных компонент, связанные с трендами, Эль-Ниньо Южным колебанием (ЭНЮК), полугодовым и годовым колебаниями. Определен их вклад в изменения длительности суток. Выявлены регионы максимальных вкладов в чандлеровское движение полюса от массовой компоненты OAM.

Выявлена смена направления тренда в гармонике J2 гравитационного потенциала, произошедшая в 2005 г. По коэффициентам C21, S21 этого потенциала вычислены соответствующие возбуждающие функции и продемонстрировано их согласие с дрейфом полюса. Тем самым доказано, что происходящие в последние время под действием изменений климата перераспределения масс значимо влияют на вектор вращения Земли.

Разработан пакет программ, предназначенных 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.

Таким образом, актуальность, практическая значимость и новизна представленного диссертантом исследования не вызывают сомнений.

Обозначенные в работе цель и задачи, а также защищаемые положения сформулированы четко и ясно и полностью соответствуют предмету исследования, а также содержанию работы. Представленный автором перечень работ по теме диссертации, опубликованных в журналах ВАК, полностью отражает его личный вклад в выносимую на защиту работу.

По теме диссертации ее автором написано 50 работ. 26 из них опубликованы в изданиях, индексируемых WoS, Scopus и ВАК. Результаты работы докладывались более чем на 50 отечественных и зарубежных конференциях и семинарах.

Диссертация состоит из предисловия, введения, 11 глав, заключения, пяти приложений, списков сокращений, и списка литературы. Общий объем диссертации 327

страниц, включая 92 рисунка и 16 таблиц. Список литературы содержит 518 наименований.

Во **введении** автор указывает цель, обосновывает актуальность, новизну и практическую значимость работы, перечисляет решаемые задачи и делает краткий обзор исследований в области, соответствующей теме диссертации.

Замечания к введению:

1. Несмотря на приведенный в конце работы полный список сокращений, как во введении, так и в последующем тексте следовало бы давать расшифровку сокращений при первом их упоминании.
2. На стр. 28 идет речь об исследовании «угловых моментов атмосферы и океана на сетке». Здесь до прочтения основного текста диссертации не совсем понятно о чем идет речь, поскольку в большинстве работ применяются интегральные значения угловых моментов для Земли в целом.
3. На стр. 29 диссертант пишет: «Изучая влияние внешних сил на колебания ядра, Ю.В. Баркин [217, 253] инициировал предпринятый нами в главе 10 анализ коэффициентов гравитационного поля, отражающих смещение геоцентра.» После прочтения этой фразы у читателя может создаться ошибочное впечатление, что движение геоцентра определяется несуществующими смещениями внутреннего ядра Земли, а не поверхностными флюидами.

Первая глава посвящена описанию параметров вращения Земли, методов их измерений и особенностей спектрального состава. Кратко освещается история разработки теории вращения Земли. Приводятся графики движения полюса, длительности суток, отклонений небесного полюса dX, dY от модели прецессии и нутации.

Во **второй главе** продемонстрирован вывод обобщенного уравнения Эйлера-Лиувилля, в котором учтена трехосность мантии и асимметрия полюсного прилива в океане. Показано общее решение обобщенного уравнения, а также наличие в наблюдениях асимметрических эффектов величиной порядка 1 мс дуги.

Замечания ко второй главе:

4. На стр. 45. указано, что добротность чандлеровского качания Q лежит в диапазоне 40 − 200. В дальнейшем, например, на стр. 58, 59 и 60 упоминаются различные значения этого фактора (180, 100, 170), а в последующем тексте диссертации автор в основном принимает значение Q=100. Чем мотивирован этот выбор? В работах [Спиридонов Е.А., Цуркис И.Я. Моделирование движения полюса Земли по данным об угловых моментах океана и атмосферы за 1980-2002 гг. //Физика Земли, 2006, №2, сс. 64-71.; Спиридонов Е.А., Цуркис И.Я. О периоде и добротности

чандлеровского движения полюса // Физика Земли. № 8. 2008. С. 1–14.] показано, что к наилучшим результатам моделирования движения полюса по данным ААМ и ОАМ приводит значение добротности 40±20. Имея в своем арсенале гораздо более полный набор возмущающих функций, диссертант вполне мог бы уточнить это значение, что важно для лучшего понимания строения нижней мантии. Однако этого сделано не было. В то же время следует отметить, что величина фактора добротности является одной из важнейших характеристик движения полюса.

5. Стр. 47. В первое из уравнений (2.4) входит величина m', строго говоря, отличная от m. Как и m ее следовало бы пояснить.
6. Стр. 48. В обозначении недиагональных моментов инерции перед формулой (2.7а) не хватает штриха.
7. После формулы (2.19) зачем-то приводятся округленные значения чисел Лява k2 и h2, а также нагрузочного числа k_2'. Какой смысл приводить округленные значения, если на практике применяются точные, приведенные в табл. 2.1 на стр. 53?

В **третьей главе** определяются параметры полосового фильтра Пантелеева, предназначенные для выделения чандлеровского колебания. Проводится сравнение методов решения обратных задач в применении к задаче восстановления чандлеровского возбуждения по наблюдениям за самим движением полюса. Выявлены квазидвадцатилетние модуляции амплитуды возбуждения. Проводится анализ погрешности выделения чандлеровской компоненты, а также сопоставление функций углового момента атмосферы ААМ с геодезическим. Сделан вывод о том, что суммарная изменчивость ААМ объясняет порядка 50% энергии ЧДП.

Замечания ко третьей главе:

8. На рис. 3.3 видно затухание чандлеровского качания в 30-е годы прошлого века. Однако, как показано в работе [Спиридонов Е.А., Акименко Я.В. Моделирование движения полюса по данным о моментах импульса атмосферы и океана. Физика Земли, 2003, №11, сс. 64—73.] по результатам спектрально временного анализа, максимум затухания с расщеплением чандлеровской частоты приходится скорее на 1925 год. Этот же результат содержится и в некоторых других работах. В чем причина такого несоответствия?
9. Стр. 72. Указано, что в работе применены данные NCEP/NCAR. В то же время, эти данные построены по атмосферной модели достаточно низкого пространственного разрешения. Почему, в особенности при работе по сетке, не применялись возмущающие функции, построенные, например, по данным ERA5? Там разрешение 0,25 градуса.

В **четвертой главе** построена модель огибающей чандлеровского движения полюса, содержащая ~восьмидесяти- и ~сорокалетние колебания. Проведено доказательство того факта, что наблюдаемые в возбуждении двадцатилетние модуляции связаны с сорокалетними колебаниями амплитуды. По модели для огибающей чандлеровского качания строится его прогноз. Обсуждаются причины уменьшения амплитуды ЧДП в 2010-е и 1930-е гг., прогнозируется скачок фазы колебания, делаются попытки его объяснения. Отмечается, что модуляция несущей связана с расщеплением спектра. Показано, что 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.

Пятая глава содержит результаты сравнения геофизических возбуждений ОАМ и ААМ с геодезическими, вычисленными в рамках обобщенного уравнения Эйлера-Лиувилля в чандлеровском диапазоне. Показано, что в ретроградном диапазоне вклад от асимметрической части достигает величин ~1 мс дуги, а в прямом диапазоне он в десятки раз меньше. 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.

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. Главные спектральные компоненты 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.

<u>Замечания к шестой главе:</u>

10. Стр. 115, 11 строка сверху. [?]. Знак вопроса вместо указания литературного источника.
11. Стр. 116. Формула (6.2) верна, но в представленном виде непригодна для вычисления ААМ с учетом эффекта обратного барометра IB. Из нее следует выделить часть, соответствующую однородному слою атмосферы, поскольку однородный слой к эффекту IB не приводит. Впрочем, уже в следующем разделе

диссертант отмечает, что до начала обработки из данных было удалено среднее. Правда, не совсем понятно какое, IB или NIB?

12. Стр. 120, 19 строка снизу. Угловой момент «закачивается», а не «заканчивается» в атмосферу.
13. Стр. 128, 5 строка снизу. «Главные компоненты», а не «главнее компоненты».
14. Стр.130, 4 строка снизу. «Полученные», а не «поученные оценки»

Седьмая глава посвящена исследованию пиков в спектре экваториального AAM с периодами 28.5 и 25.8 часов в земной системе отсчета после его перевода в небесную систему координат. AAM был отфильтрован в диапазоне от 2 суток до 1 месяца. В этом диапазоне выявлена пропорциональность между компонентами ветра и давления. 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 AAM. 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 AAM особенно четко наблюдаются вблизи экватора. В более высоких широтах их скрывает турбулентность атмосферы.

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 температуры и уровня моря. После снятия трендов совместный сингулярный спектральный анализ показывает наличие шестидесяти, двадцати- и десятилетних колебаний в обоих указанных климатических индексах. Обсуждается роль океана и его возможный отклик на изменения поверхностной температуры. Кратко рассмотрены 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 OAM, связанных с течениями и перераспределением водных масс. Приводятся карты характеристик годового колебания и тренда OAM. 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. Представлены графики перераспределений масс в бассейнах крупных рек

России. Измерения GRACE также сравниваются с отсчетами баллистического гравиметра ГАБЛ-М. Согласие находится на уровне 1 микрогалла. В главе также представлены результаты обработки данных GRACE по океанам.

В **десятой главе** исследованы коэффициенты гравитационного поля Земли первой и второй степеней по данным спутниковых методов. Выделены тренды положения геоцентра, показывающие смещение к южному полюсу на ~0.1 мм/год и годовые колебания. Выполнено сравнение рядов SLR и GRACE для коэффициента C20, связанного с динамическим форм-фактором J2, описывающим полярное сжатие геоида. Выделены годовое, полугодовое, декадное колебания и тренд в J2. Выполнен пересчет этих изменений в величины влияния на длительность суток LOD, которая имеет экстремум в 2005 году. Влияние вариаций J2 на LOD найдено не превосходящим 0.4 мс. 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. Изменения коэффициентов геопотенциала второй степени C21 и S21 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.

В **одиннадцатой главе** дается описание прогнозов параметров вращения Земли (ПВЗ), выполнявшихся ежедневно с 2012 по 2017 гг. в ГАИШ и Шанхайской обсерватории. Проводится их статистический анализ. Показано, что погрешности представленного комбинированного прогноза имеет тот же порядок, что и погрешность прогноза USNO, а для 2016 г. точность полученного комбинированного прогноза для y-координаты полюса и UT1-UTC на горизонте >20 суток даже превышает точность прогнозов USNO.

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

Приведенные в настоящем отзыве замечания не влияют на положительную оценку работы в целом.

Представленная к защите диссертационная работа безусловно актуальна. Полученные результаты отличает высокая практическая значимость и новизна. Достоверность полученных результатов и выводов подтверждена данными современных наблюдений и не вызывает сомнений.

Автореферат диссертации полностью отражает основное содержание диссертационной работы и оформлен в соответствии с требованиями ВАК.

На основании вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что диссертация соответствует критериям, установленным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации 24 сентября 2013 г. № 842) для ученой степени доктора наук, а ее автор Леонид Валентинович Зотов заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности по специальности: 01.03.01 – Астрометрия и небесная механика.

Я, Спиридонов Евгений Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Ведущий научный сотрудник Лаборатории
происхождения, внутреннего строения и
динамики Земли и планет
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт Физики Земли
Российской Академии Наук (ИФЗ РАН),
доктор физико-математических наук

Спиридонов Евгений Александрович

123242, Россия, Москва, Большая Грузинская ул, д.10, стр.1.
E_mail:
Тел.: +7(499) 253-53-30
Факс: +7(499) 766-26-54

02 сентября 2019 года