


«Утверждаю»
Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института астрономии
Российской академии наук
Чл.-корр. РАН
Б.М. Шустов



ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации **Филипповой Александры Сергеевны** «*Численно-аналитическое исследование параметров вращения Земли с приложениями для спутниковой навигации*», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика.

Современная теория вращения Земли относительно центра масс включает две составляющие. Во-первых, движение оси, проходящей через **небесный промежуточный полюс**, относительно геоцентрической небесной системы отсчёта. Эта система отсчёта является инерциальной. Во-вторых, движение *небесного промежуточного полюса* относительно **земного промежуточного полюса**. Это движение рассматривается *во вращающейся (неинерциальной) земной системе отсчёта*. Начальные положения небесного промежуточного полюса и земного промежуточного полюса достаточно условны, хотя и близки друг к другу, и выбраны на основе анализа многолетних астрометрических и геодезических измерений, выполненных на Земле и на борту космических аппаратов.

Движение относительно геоцентрической небесной системы отсчёта является в основном вынужденным, обусловлено действием Луны и Солнца и составляет предмет теории прецессии-нутации. Свободное движение оси момента импульса отсутствует, свободное движение оси, соответствующей небесному промежуточному полюсу, минимально. Высокотехнологичные

измерения на радиоинтерферометрах со сверхдлинной базой дают поправки к принятой модели прецессии-нутации на уровне *миллисекунд дуги*. Отметим сразу, что эта составляющая теории вращения Земли в диссертации считается заданной стандартными соглашениями Международной службы вращения Земли и *не рассматривается*.

Движение небесного промежуточного полюса в земной системе отсчёта является главным образом *свободным колебанием*. Период и амплитуды свободного колебания полюса возможно вычислить только для модели абсолютно твёрдого тела. Внутреннее строение Земли является сложным, каждый слой от поверхности до внутреннего ядра обладает упругостью и вязкостью. Оценки приближённого значения периода свободных колебаний реальной Земли получают на основе наблюдений. И период, и амплитуды существенным образом отличаются от вычисленных с помощью модели абсолютно твёрдого тела величин и подвержены значительным вариациям. Вынужденные колебания полюса также присутствуют, они обусловлены действием Луны и Солнца и различными геофизическими явлениями. Причина некоторых изменений в амплитудах и периодах вынужденных колебаний остаётся не выясненной.

В этой связи *анализ данных* Международной службы вращения Земли об изменениях координат полюса и вариациях скорости вращения Земли и разработка алгоритмов *прогноза значений параметров* на различных интервалах времени является **актуальной научной задачей**.

Рецензируемая работа посвящена построению моделей, позволяющих прогнозировать параметры вращения Земли на основе аппроксимации совокупности имеющихся данных. Интервал прогноза для различных моделей составляет от нескольких суток до нескольких лет.

Диссертация на 121 странице состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы.

Во *введении* сделан краткий исторический обзор проблемы и представлены современные *определения* систем отсчёта пространства и времени, рекомендованные Международным астрономическим союзом. Подчёркивается, что положение небесного промежуточного полюса в земной опорной системе отсчёта задаётся координатами полюса и разностью всемирного времени и всемирного координированного времени, называемыми параметрами вращения Земли, а эти параметры являются величинами, определяемыми на основе наблюдений.

В *первой главе* записаны дифференциальные уравнения вращения для модели Земли, состоящей из упругой мантии и твёрдого ядра. Модель содержит свободные параметры, характеризующие упругость и вязкость мантии. После линеаризации дифференциальных уравнений выполнено осреднение правых частей линеаризованных уравнений. При осреднении было учтено, что период вращения Земли значительно меньше периода свободных колебаний полюса. Получено решение осреднённых уравнений в случае отсутствия внешних воздействий. Выбор конкретных числовых значений параметров модели, характеризующих упругость, позволил получить близкий к наблюдаемой величине период свободных колебаний полюса.

В *первых разделах второй главы* дано решение осреднённых дифференциальных уравнений, полученных в основной модели колебаний полюса с учётом возмущений. Основная модель имеет два периода, период свободных колебаний и период обращения Земли вокруг Солнца, и шесть параметров. Численные значения параметров определяются с помощью метода наименьших квадратов на основе ряда значений координат полюса.

Прогноз значений координат полюса с помощью основной модели и сравнение с результатами наблюдений показали, что алгоритм основной модели не может учесть «нерегулярные» кратковременные флуктуации периода и фазы свободных колебаний. В работе представлены результаты

спектрального анализа данных Международной службы вращения Земли на различных интервалах времени. Диаграммы наглядно свидетельствуют о вариациях скорости изменения фазы.

В диссертации было высказано предположение, что эффект нерегулярных флуктуаций может быть связан с кратковременными изменениями численных значений тензора инерции. Автором работы были проанализированы ряды изменений численного значения коэффициента при второй зональной гармонике разложения гравитационного поля Земли в ряд по сферическим функциям. **Впервые** обнаружена и доказана сильная корреляция между изменениями численных значений коэффициента и вариациями фазы свободных колебаний полюса.

Далее во *второй главе* выполнено *уточнение* основной модели: добавлены два параметра, отвечающие за эффект изменения скорости фазы и вычисляемые на основе данных об изменениях коэффициента при второй зональной гармонике.

Уточнение основной модели способствовало улучшению точности прогноза координат полюса на *длительных интервалах времени*. Результаты отражены на графиках: точность прогноза становится удовлетворительной.

В *третьей главе* диссертации основное внимание уделяется уточнению алгоритма прогноза параметров вращения Земли на коротких интервалах времени порядка нескольких суток. На таких промежутках важен точный прогноз не только координат полюса, но и вариаций продолжительности суток.

Одним из средств при решении задачи, поставленной в третьей главе, является аналитическое интегрирование линеаризованных уравнений вращения с учётом вынужденных вариаций численных значений компонентов тензора инерции Земли. В результате интегрирования получен небольшой по составу набор частот короткопериодических колебаний.

Автором работы предложен алгоритм постоянной настройки модели прогноза. Алгоритм заключается в том, что амплитуды и фазы тригонометрических функций с заданным набором частот вычисляются по методу наименьших квадратов на основе ежедневно обновляемых данных о параметрах вращения Земли.

Сравнения результатов аппроксимации и прогноза с данными наблюдений подтверждают **надёжность, достоверность** и хорошее качество предлагаемого алгоритма. Это особенно важно в случае прогноза разности всемирного времени и всемирного координированного времени.

В *четвёртой главе* доказана возможность применения алгоритмов прогноза параметров вращения Земли, предлагаемых автором диссертации, в устройствах автономной навигации на поверхности Земли и на борту космических аппаратов. **Практическая значимость** результатов состоит в том, что точности разработанных моделей достаточно для решения большинства навигационных и эфемеридных задач.

В заключении приводятся основные результаты работы.

На основании изложенного материала можно констатировать следующие пункты, характеризующие **научную новизну** результатов и выводов диссертации:

- Выполнены уточнения основных моделей колебаний небесного промежуточного полюса в земной системе отсчёта. Уточнённые модели дают удовлетворительный прогноз параметров вращения Земли на коротких и длительных интервалах времени.
- Впервые обнаружена зависимость вариации фазы и периода свободных колебаний полюса от изменений числового значения коэффициента при второй зональной гармонике разложения гравитационного поля Земли.

- Предлагаемые алгоритмы содержат небольшое число параметров и могут быть использованы в эфемеридном обеспечении. Предложена и реализована на практике схема настройки моделей по мере появления новых данных о параметрах вращения Земли.

Результаты и основные выводы предлагаемой диссертации являются **достоверными** как в теоретическом, так и в практическом плане:

- Дифференциальные уравнения движения полюса в модели Земли, обладающей упругостью и вязкостью, после применения процедур линеаризации и осреднения являются обобщением классических уравнений, опубликованных в книгах по теоретической механике.
- На всех приводимых в тексте рисунках показано, что модели дают хорошую аппроксимацию мгновенных значений параметров вращения Земли и удовлетворительную точность прогноза.
- Материалы работы были доложены на четырёх международных конференциях.

Автор диссертации является соавтором 10 статей, опубликованных в журналах из списка научных журналов, рекомендованных ВАК. Основные положения, выносимые на защиту, полностью отражены в публикациях.

Автореферат соответствует содержанию текста диссертации.

Материал хорошо иллюстрирован, пояснения к диаграммам понятны.

Предлагаемая работа выполнена на высоком профессиональном уровне. Автор диссертации показала, что умеет выполнять линеаризацию, осреднение и интегрирование дифференциальных уравнений механики. В исследованиях с успехом были использованы метод спектрального анализа и способ наименьших квадратов.

К сожалению, не обойтись без пяти замечаний по тексту диссертации:

- Из последнего предложения на стр. 4 можно сделать вывод, что Леонард Эйлер учёл *возмущающие «силы, действующие на Землю со стороны Солнца и Луны»* и вычислил *период движения полюса вращения по поверхности Земли, равный «305 звёздным суткам»*. Это, конечно, не так. Здесь речь идёт о периоде **свободных колебаний** Земли как абсолютно твёрдого тела.
- В дальнейших публикациях на эту тему следует заменить слово *«интерполяция»* термином *«аппроксимация»*. Интерполяция – поиск функции, которая проходит через все заданные точки. Частным случаем метода наименьших квадратов является аппроксимация набора величин функцией с ограниченным числом определяемых параметров.
- На стр. 6 одна и та же фраза о *земном координатном времени* присутствует два раза. Половина абзаца со стр. 11 повторяется на стр. 35. Интересная и правильная мысль о *«поиске компромисса» «между сложностью модели и точностью измерений»* встречается в тексте не один раз.
- Несколько раз в контексте периода свободных колебаний полюса употребляется термин *«свободная нутация»* (стр. 33, например). В теории вращения Земли этот термин применяется в смысле движений относительно инерциальной системы отсчёта.
- Вряд ли уместно употребление следующих словосочетаний: *«небесно-механический»*, *«гравитационно-приливный»*, *«фундаментальные составляющие параметров вращения Земли»*.

Замечания сделаны по тексту диссертации, имеют методическое значение, носят рекомендательный характер и никак не отражаются на высоком уровне рецензируемой работы.

Результаты диссертации могут быть использованы в Институте астрономии РАН, в Центре управления полётами, в ГАИШ МГУ.

Диссертация А. С. Филипповой представляет из себя завершённое и логически стройное исследование в области численно-аналитических методов построения моделей аппроксимации и прогноза параметров вращения Земли на различных интервалах времени от нескольких суток до нескольких лет. Разработанные алгоритмы существенно уточняют основную модель явления и могут быть использованы в эфемеридном обеспечении. Доказанная зависимость между вариациями значений коэффициентов геопотенциала и флуктуациями периода свободных колебаний полюса может стать предметом дальнейших изысканий.

В целом диссертация содержит **новые решения важных задач** в аспекте теории вращения Земли, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности *01.02.01 – Теоретическая механика*, а её автор А. С. Филиппова несомненно заслуживает присвоения ей искомой степени.

Отзыв заслушан и одобрен 1 декабря 2015 г. на объединённом семинаре научно-исследовательских групп космической астрометрии и космической геодезии Института астрономии Российской академии наук .

Руководитель семинара

Рыхлова Л.В.

д.ф.-м.н.

Секретарь семинара

Баканас Е.С.

к.ф.-м.н.