

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

Диссертационная работа Зотова Леонида Валентиновича посвящена исследованию связей между параметрами вращения Земли и процессами в ее оболочках, в основном в океане и атмосфере, в том числе связанными с колебаниями климата. Эти связи носят стохастический характер и их статистически значимая идентификация требует квалифицированной обработки значительных объемов информации. В качестве основного рабочего инструмента анализа данных автором выбран многокомпонентный сингулярный спектральный анализ (МССА), являющийся по своей сути глубокой модификацией классического метода главных компонент во временной области. **Актуальность** выбранной темы диссертационной работы вытекает из важности комплексного исследования взаимодействия геофизических полей и причин модуляции мер когерентности (синхронизации) этого взаимодействия, одной из наиболее вероятных причин которого является неравномерность вращения Земли и особенности случайной траектории чандлеровского движения полюса. С практической точки зрения выбранная тема представляет значительный интерес как исследование эндогенных причин современных колебаний климата.

Диссертация состоит из введения, 11 глав, заключения, четырех математических приложений и списка литературы из 518 источников, разбитого на несколько рубрик. Общий объем диссертации – 328 страниц.

В главе 1 описано развитие методов измерения параметров вращения Земли с древнейших времен до наших дней. Вводится величина отклонения длительности суток (LOD) от среднего значения, которая в дальнейшем

будет рассматриваться как один из основных «входных» сигналов при воздействии на различные геофизические поля. Приведен график изменения погрешности определения неравномерности вращения с 1962 года, показывающий быстрое увеличение точности измерений с введением инструментов, основанных на использовании космической геодезии. Приведен спектральный состав LOD, характеризуемый набором узкополосных составляющих с периодами от нескольких суток до нескольких лет. В главе 2 приведены сведения об уравнениях вращения Земли, рассматриваемой как твердое тело с осевой асимметрией и с вязкоупругими и жидкими составляющими (мантия и ядро). Эти уравнения модифицированы на случай более сложной трехосной асимметрии и влияния полюсного прилива. Приведено решение линеаризованных уравнений в частотной и временной области, выполненное с помощью преобразования Фурье. Получены выражения для расщепленных частот колебаний в окрестностях годовой и чандлеровской частот, которые возникают вследствие асимметрии.

Глава 3 посвящена идентификации чандлеровского колебания по данным о движении полюса. Эта задача рассматривается как обратная фильтрация для реализации которой применяется узкополосный частотный фильтр Пантелеева. Показано, что примерно половина энергии внешнего воздействия на чандлеровское движение полюса оказывают процессы в атмосфере (вариации давления и ветер). Глава 4 посвящена анализу длинно-периодических составляющих чандлеровского колебания полюса. В частности, основное внимание уделено периодам 84 и 42 года, наблюдаемым в вариациях огибающей чандлеровского колебания, причина которых в настоящее время неясна. Наличие низкочастотных колебаний всегда наводит на идею их использования для долгосрочного прогноза. В диссертации эта идея также реализуется и делается прогноз амплитуды чандлеровского колебания на следующие 20 лет.

В главе 5 исследуется структура чандлеровского движения путем разбиения его на симметричную и асимметричную части. Симметрия здесь понимается относительно аргумента в линейном операторе частотной передаточной функции, описывающей обратную фильтрацию. В главе 6 подробно исследуется влияние циркуляции атмосферы на изменение продолжительности суток. Показано, что для периодов менее года изменения LOD вызваны только влиянием атмосферы, но на больших периодах требуется учет влияния океана и процессов в ядре. Анализ полей атмосферного давления и ветра был произведен с помощью метода многоканального сингулярного спектрального анализа и выделения первых главных компонент. Были определены области на земной поверхности, которые являются источниками воздействия на LOD со стороны давления и ветра. Были также оценены временные тренды изменчивости усредненных величин воздействия давления и ветра и региональные особенности, в частности, вклад Южно-Тихоокеанской циркуляции (Эль-Ниньо и Ла-Ниньо). Глава 7 посвящена детальному исследованию тонкой спектральной структуры углового момента атмосферы в окрестности периодов 28.5 и 25.6 часов, обусловленные приливными явлениями в атмосфере.

Глава 8 явно связана с темой, вынесенной в заголовок, то есть о взаимном влиянии неравномерности вращения Земли и изменчивости климата. В этой главе основное внимание уделено влиянию углового момента океана. Метод многокомпонентного сингулярного спектрального анализа (МССА) был применен к анализу полей изменения уровня моря и температуры океана и был выделен набор первых главных компонент, которые потом сопоставлялись с уровнем солнечной активности (числа Вольфа) и глобальной температурной аномалией. Поведение главных компонент выделяет 10, 20 и 60-летние периодичности. Показано влияние изменения режима океанических течений (явления Эль-Ниньо на юге Тихого океана) на продолжительность суток. Далее МССА был применен к результату ассимиляции площадных океанографических данных, таких как

скорость течения, уровень моря, температура, соленость, давление и вычислены их первые главные компоненты, усредненные по земному шару. Эти усредненные показатели являются функциями времени и они выделяют тренды и характерные периоды изменения углового момента океана и областей, которые являются основными источниками воздействия на движение полюса.

В главе 9 рассматривается анализ данных спутников GRACE, измеряющих временные и пространственные изменения гравитационного поля Земли с 2002 года. Методом МССА выделены первые главные компоненты аномалий гравитационного поля на территории России, которые в основном обусловлены изменением гидрологического режима 15 крупнейших рек. Эти изменения, отражающиеся в вариациях гравитационного поля, связаны с такими экстремальными природными явлениями как весенние паводки, наводнения, засухи. Интересно отметить, что временные аномалии гравитационного поля, выделенные методом МССА по спутниковым данным прекрасно коррелируют с данными абсолютного гравиметра, находящегося в Москве. Спутниковые данные GRACE также применяются для оценки и прогноза методом МССА изменения уровня моря, обусловленного увеличением массы океана.

В главе 10 изучается по спутниковым данным самая вариативная составляющая гравитационного поля Земли, связанная с изменениями и перемещениями масс на земной поверхности, включая океан. Эти перемещения могут быть вызваны сезонным таянием ледников, речными паводками, осадками, речными стоками, течениями в океане. Для анализа данных снова применяется метод МССА, с помощью которого выделяются тренды положения геоцентра и его годовые колебания. Проведена оценка влияния этих вариаций на длину суток. Значительный интерес представляет выделение 60-летних циклов в изменениях первых главных компонент, которые выделяются в климатических временных рядах, в частности в глобальной температурной аномалии. Кроме того, обращает на себя

внимание особенность временного ряда LOD, заключающаяся в смене ускорения во вращении Земли на ее замедление в 2003 году (стр. 209). Согласно недавним исследованиям корреляции свойств глобального низкочастотного сейсмического шума, в 2003 году произошла смена убывания корреляции на ее возрастание, продолжающееся по сей день (<https://doi.org/10.1007/s00024-019-02331-z>). После этого произошло резкое увеличение интенсивности сильнейших сейсмических событий с конца 2004 года, начиная с Суматранского мега-землетрясения. Таким образом, изменение характера LOD в 2003 году могло быть триггером для активизации глобальной сейсмичности.

Глава 11 носит методический характер и посвящена изложению результатов прогнозирования параметров вращения Земли с помощью различных методов с представлением среднеквадратических ошибок прогнозов.

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить **высокую обоснованность** научных положений, которая вытекает из большого объема обработанных данных и сравнения полученных результатов с результатами других авторов. **Новизна** сделанных выводов заключается в формулировке нескольких положений, ранее неизвестных в исследованиях климата и вращения Земли. К ним следует отнести вывод уравнений вращения Земли для случая трехосной асимметрии и влияния полюсного прилива, идентификация параметров чандлеровского движения полюса с помощью обратной частотной фильтрации и выделение в них 20-летней периодичности, разработка метода анализа спутниковых и океанографических данных на основе многоканального метода сингулярного спектрального анализа, позволившего выделить ряд неизвестных ранее эффектов (трендов и периодических составляющих) в вариациях угловых моментов атмосферы и океана и перераспределения масс в бассейнах крупных рек России в связи с аномальным снегонакоплением и наводнениями. Значительный интерес представляют оценки влияния

изменений уровня Каспийского моря и других климатически обусловленных перераспределений масс на земной поверхности на скорость вращения Земли.

Достоверность выводов вытекает из применения набора современных статистических методов анализа геофизических данных большого объема, разложений по сферическим функциям и верификацией полученных результатов путем сравнения с частными аналитическими решениями и результатами других авторов. Важным положительным свойством диссертации является программная реализация методов в виде пакета программ для анализа глобальных геофизических данных.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

По тексту диссертации следует сделать замечания:

1. Желательно было бы изложение метода МССА и процедуру выбора его параметров не относить к приложениям в конце текста, а, наоборот, разъяснить все его детали в начале главы 6, перед его последующим широким применением. Это упростило бы понимание его результатов и не заставляло бы читателя постоянно обращаться в конец текста для понимания аббревиатур и смысла представленных результатов.
2. Выбор значений добротности $Q=100$ в главе 3 (стр. 66) и в последующих вычислениях выглядит несколько произвольным. Хорошо было бы произвести исследование, насколько результаты чувствительны к выбору добротности в разумных пределах ее изменчивости.
3. При обсуждении 84 и 42-летних колебаний огибающей чандлеровского движения полюса в качестве гипотезы о причине их возникновения предлагается рассмотреть «интегрирование случайных шумов» (стр. 86-87). В частности, предлагается рассматривать стохастические дифференциальные уравнения. Однако известно, что их решения не содержат периодических

составляющих и декларация существования периодичностей типа так называемых «волн Эллиота» в финансовой статистике относится скорее к субъективному желанию увидеть периодичности, чем к их реальному существованию. Все-таки следует искать другие причины. Возможно, что эти периодичности в движении полюса также вызваны циклическими вариациями климата.

4. Вызывает сомнение эффективность применения искусственных нейронных сетей для прогноза параметров вращения Земли в главе 11. В данном случае объем обучения нейронной сети (100 отсчетов) при общем числе нейронов 15 в архитектуре нейронной сети 7-7-1 слишком мал. В целом, искусственные нейронные сети адекватны задачам прогнозирования лишь при наличии большого объема обучающей выборки.
5. В тексте диссертации рассматриваются в основном задачи «одностороннего» влияния климатических и метеорологических процессов на параметры вращения Земли. Однако особый интерес представляют влияния «в обратную» сторону, то есть рассмотрение гипотез, когда изменение скорости вращения Земли, обусловленное глубинными процессами в мантии и ядре, может быть источником климатических изменений и триггером катастрофических явлений. Эта тема затрагивается в диссертации вскользь, при обсуждении некоторых результатов, однако ее хорошо было бы обсудить в отдельном параграфе.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.03.01 – «Астрометрия и небесная механика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в

Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Зотов Леонид Валентинович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.01 – «Астрометрия и небесная механика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник, руководитель лаборатории физики колебаний
пробных масс Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Любушин Алексей Александрович

Дата 10.10.2019

Контактные данные:

тел.: +7(499)254-23-50, e-mail: lubushin@ifz.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация: 04.00.22 - "физика твердой Земли", 1996 год

Адрес места работы:

123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, лаборатория физики колебаний
пробных масс.

Тел.: +7(499)766-26-56; e-mail: direction@ifz.ru