

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Блинковой Евгении Владимировны
на тему: «Исследование динамической структуры низкоорбитальной об-
ласти околоземного космического пространства»
1.3.1 – Физика космоса, астрономия**

Актуальность темы

Диссертация **Евгении Владимировны Блинковой** посвящена изучению динамической структуры низкоорбитальной области околоземного космического пространства и выявлению зон устойчивого и хаотического движения малых тел на резонансных орбитах вблизи Земли.

Запуск искусственных спутников Земли, где первым был Советский Союз, глубоко повлиял на развитие астрономии и многих отраслей промышленности. Начавшееся соревнование мировых держав привело к тому, что спустя 2/3 века на орбитах вокруг Земли кружат многие тысячи созданных человеком аппаратов и их фрагментов, среди которых действующих спутников всего несколько процентов, а остальное – отработавшие свое ступени ракет, еще не сгоревшие в атмосфере аппараты и их многочисленные обломки. Количество этих отходов непрерывно растет. Появился термин «космический мусор», но это мусор, который летает над головой, обладает гигантской кинетической и потенциальной энергией и может быть весьма опасен для человека как на Земле, так и в космосе.

Новые проблемы привели к пониманию необходимости изучения эволюции орбит ИСЗ и компонентов космического мусора. Эти тела движутся по законам небесной механики в сложном поле сил, определяемом гравитационным влиянием Земли, Луны и Солнца. И здесь человечество столкнулось с серьезной и весьма трудоемкой научной задачей. Число объектов, за которыми надо следить и предсказывать их движение огромное, и по характеру задачи исследователю требуется не только детально знать фигуру Земли и структуру

её гравитационного поля, не только умело и творчески применять законы небесной механики, но необходимо развивать и такие области знаний, как теория возмущений, теория резонансов и динамического хаоса. Прогресс в изучении динамики искусственных небесных тел в околоземном пространстве напрямую связан с освоением огромного массива наблюдательной информации, что и предопределяет актуальность данной диссертационной работы.

Диссертация состоит из Введения, трех Глав, Заключения, списка использованных источников (45 наименований) и одного приложения, содержит 107 рисунков и 5 таблиц. Общий объем работы составляет 113 страниц.

Во **Введении** показана и обоснована актуальность работы, обозначены цели и задачи исследования, подчеркивается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, а также приводится список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

В Главе 1 дается описание используемой численной модели движения ИСЗ. В ней рассматриваются уравнения движения и математическая модель возмущающих сил, связанных с гравитационным полем не только Земли, но также Луны и Солнца. Учитываются и силы светового давления на аппараты. Приводятся алгоритмы вычисления влияния возмущающих сил. Основными факторами, которые приводят к изменению орбиты, являются резонансные возмущения. Отмечается, что на данный момент, резонансная структура околоземного космического пространства (ОКП) мало изучена. Все расчеты в диссертации выполняются с применением усовершенствованного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ» на кластере СКИФ ТГУ с использованием параллельных вычислений.

В Главе 2 приводится описание используемых методов. Рассматриваются 20 известных типов апсидально-нодальных резонансных характеристик движения ИСЗ с учетом влияния Луны и Солнца (Таблица 1) В Таблице 2

приводится список 16 вековых резонансов, связанных со средним движением пробного тела. Эти вековые резонансные характеристики получались по обычной методике из однократно и двукратно осредненных аргументов, выделенных из возмущающей функции.

Большое внимание в работе уделялось изучению устойчивости орбит. Для этого путем интегрирования уравнений движения вычислялся показатель быстрой ляпуновской характеристики MEGNO. Величина и характер эволюции во времени параметра MEGNO $\bar{Y}(t)$ показывает степень хаотизации орбиты: для квазипериодических (регулярных) орбит этот параметр осциллирует около 2, для хаотических орбит он всегда больше 2 и растет линейно, а для устойчивых орбит типа гармонического осциллятора параметр $\bar{Y}(t) = 0$.

В основе диссертации лежит многоэтапный процесс вычислений, который был организован следующим образом.

1. Вначале из намеченного списка выбиралось определенное значение орбитального резонанса средних движений ИСЗ со скоростью вращения Земли. По терминологии автора, это резонанс n-типа. Затем для этого значения резонанса производился расчет координат и скоростей и вычислялась орбита пробного объекта.

2. Одновременно с расчетом координат и скоростей для данной орбиты вычислялся и показатель хаотичности MEGNO $\bar{Y}(t)$.

3. По полученным данным, применяя специальные алгоритмы выявлялись более сложные резонансы (см. таблицы 1 и 2), действующие на объект. Поиск дополнительных резонансов был организован методом расчета либраций пяти указанных ниже критических аргументов компонентов мультиплета орбитального резонанса:

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad \mathcal{H}_1 &= u(M + \mathcal{U}) - m; \quad \textcircled{2} \quad \mathcal{H}_2 = u(M + \mathcal{U}) + m(-); \\ \textcircled{3} \quad \mathcal{H}_3 &= uM \mathcal{M} (\mathcal{U} + -); \quad \textcircled{4} \quad \mathcal{H}_4 = (M - + \mathcal{U}) - m; \quad \textcircled{5} \quad \mathcal{H}_5 = uM + m(-\mathcal{U} + 2 -). \end{aligned}$$

Соответствующие этим аргументам частоты находятся дифференцированием по t . Здесь M , ϖ , Ω – стандартные обозначения кеплеровых элементов, θ – угол поворота Земли или звездное время. Первые три компоненты мультиплета были выведены в 1967 г. Алланом, четвертая и пятая компоненты были получены в 2012 г. Э. Д. Кузнецовым для орбитального резонанса 1:2. В общем же виде для других резонансов четвертая и пятая компоненты были записаны диссертантом с соавторами в 2019 г.

При вычислении частот учитывалось влияние эксцентриситета и наклона орбиты. Для этого при малых значениях e и i применялись аналитические формулы, а при больших значениях эксцентриситета использовался численный подход.

4. Для выполнения вычислений диссертант применил усовершенствованный комплекс «Численная модель движения систем ИСЗ», основанный на интеграторе *Lobbie*. Данный интегратор заменил ранее используемый интегратор Эверхарта.

5. Кроме *пробных* орбит, в работе изучалось также движение *реальных* объектов, населяющих околоземное космическое пространство. Сведения о таких объектах взяты из американского каталога NORAD. В этом списке из 145 объектов есть как функционирующие, так и отработавшие космические аппараты и обломки космического мусора.

Основные результаты работы представлены в Главе 3.

В подразделе 3.1 дано полное описание структуры орбитальных и вековых резонансов в исследуемой области ОКП, где, в соответствии с изучаемыми резонансами от 1:3 до 1:11, большие полуоси орбит находятся в диапазоне от 8000км до 21000км, а наклоны орбит от 0° до 180° .

В общую картину вековых резонансов включены также данные для 145 *реальных* объектов, населяющих низкоорбитальное пространство. **Установлено, что в этой области ОКП действует большое количество орбитальных и вековых резонансов.**

Подразделы 3.2–3.5 посвящены детальному описанию динамических структур областей орбитальных резонансов от 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7, 1:8, 1:9, 1:10 и 1:11 со скоростью вращения Земли.

В качестве примера, остановимся подробнее на результатах, полученных для **орбитального резонанса 1:3**. Установлено, что для этого резонанса существуют, в основном, неустойчивые компоненты указанного мультиплета; устойчивое состояние показывает лишь вторая компонента δ^2 . Кроме того, в рассмотренной области действует большое количество апсидально-нодальных резонансов, **связанных с прецессией орбиты Луны**, которые в основном расположены при наклонах от 45° до 135° . Здесь проявляют свое действие и неустойчивые резонансы, которые накладываются на устойчивые. На рисунке 5 представлено распределение вековых апсидально-нодальных резонансов, связанных **с прецессией орбиты Солнца**. Как и для случая с Луной, здесь вековой резонанс пронизывает всю область по наклонам 0° , 90° и 180° . Кроме того, в этой области действуют все типы резонансов, представленных в таблице 1.

Результаты по расчету быстрой ляпуновской характеристики MEGNO показали, что для **орбитального резонанса 1:3** область отличается **высокой степенью хаотизации орбит**, причем наибольшая степень хаотизации наблюдается при наклонах от 60° до 90° . Это объясняется наложением большого количества резонансов различных типов, как вековых, так и орбитальных.

О резонансах **1:4**, **1:6** и **1:8**. Все они имеют сходство структур распределения дополнительных резонансов, поэтому автор ограничился более подробным изложением для **области резонанса 1:4**. Выясняется, что здесь наибольшие зоны устойчивости показывают вторая, третья и пятая компоненты мультиплета. Третья и пятая компоненты действуют практически во всей резонансной области, и в основном для них преобладает неустойчивость. Замечено, что первая и четвертая компоненты имеют тонкую линию действия.

Для случая **1:4** была рассмотрена и структура **вековых резонансов**. Здесь действует один устойчивый апсидально-нодальный резонанс, связанный

с прецессией орбиты Солнца, и девять устойчивых резонансов, связанных с прецессией орбиты Луны. В области больших полуосей от 16725 до 16750 км проявляют свое действие несколько неустойчивых резонансов, связанных как с прецессией орбиты Луны, так и Солнца, но лишь для наклонов от 50° до 110° . Резонанс Лидова-Козаи практически отсутствует.

Привлекает внимание своей фактической одномерностью карта для трех компонент мультиплета для орбитального резонанса **1:10**.

В подразделе 3.9 представлены выводы всего исследования:

- Пятикомпонентная структура мультиплета орбитального резонанса подтверждается для большинства рассмотренных резонансов;
- Орбитальные резонансы могут способствовать появлению хаоса в движении объектов за счет наложения компонент собственного резонансного мультиплета и нескольких резонансов других типов;
- Апсидально-нодальные резонансы пронизывают всю рассматриваемую область, причем резонансы, связанные с прецессией орбиты Луны более плотно покрывают рассматриваемую область орбитального пространства, чем аналогичные резонансы с Солнцем;
- Нодальный резонанс $s_L = -s_L$ устойчив и для Солнца, и для Луны на всем диапазоне больших полуосей при трех значениях наклонов 0° , 90° и 180° . В орбитальной эволюции действие этого резонанса проявляется наличием долгопериодических колебаний в наклоне орбиты;
- Область резонанса **1:3** со скоростью вращения Земли отличается повышенной хаотизацией движения объектов;
- В областях резонансов 1:4, 1:5, 1:6, 1:7, 1:8 и 1:9 хаотизация движения происходит по линии действия второй компоненты мультиплета орбитального резонанса, в результате наложения на нее резонансов различных типов;
- Наименее подвержены хаотизации движения области резонансов 1:10 и 1:11;

– Совместное действие светового давления и резонансов со средним движением Солнца действительно могут способствовать росту амплитуды колебаний эксцентриситета;

– Наличие резонансов со средним движением Солнца ведет к росту амплитуды колебаний эксцентриситета, даже если световое давление не действует. Световое давление только усиливает этот рост;

– Световое давление способствует более раннему проявлению действия вековых резонансов и способно менять структуру резонансных возмущений объекта;

– При отсутствии влияния резонансов со средним движением Солнца, совместное действие светового давления и других вековых резонансов не оказывает значительного влияния на амплитуду колебаний элементов.

В **Заключении** делаются основные выводы по результатам диссертационного исследования.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Все выносимые на защиту результаты являются новыми, опубликованы в научной печати и прошли апробацию, подтвердившую их значимость и новизну. Новизна диссертационного исследования не вызывает сомнений. Достоверность полученных автором диссертации результатов также не вызывает сомнений. Отметим наиболее важные результаты:

– Построены карты распределения вековых резонансов для орбит в координатах «наклон $0^\circ \leq i \leq 180^\circ$ - большая полуось (8000 км-21000 км»;

– Апсидально-нодальные резонансы, связанные с прецессией орбиты Луны более плотно покрывают рассматриваемую область орбитального пространства, чем аналогичные резонансы, связанные с прецессией орбиты Солнца;

– Область резонанса **1:3** со скоростью вращения Земли отличается повышенной хаотизацией движения объектов. В этой области действует большое

количество орбитальных и вековых резонансов. Наложение этих резонансов друг на друга введет к появлению хаоса в движении;

– В области резонансов **1:4, 1:5, 1:6, 1:7, 1:8 и 1:9** хаотизация движения происходит по линии действия второй компоненты мультиплета орбитального резонанса, в результате наложения на нее резонансов различных типов. Несмотря на то, что третья и пятая компоненты мультиплета орбитальных резонансов **1:4, 1:6 и 1:8** неустойчивы практически во всей рассмотренной области, к хаосу в движении это не приводит;

– Наименее подвержены хаотизации движения области резонансов **1:10** и **1:11**. Здесь третья и пятая компоненты мультиплета орбитального резонанса исчезают. Преобладает действие вековых резонансов, наличие орбитальных резонансов не приводит к хаосу;

– Совместное действие светового давления и резонансов со средним движением Солнца действительно могут способствовать росту амплитуды эксцентриситета;

– Рассматриваемые области обильно заселена различными спутниками и космическим мусором. Световое давление способствует более раннему проявлению действия вековых резонансов и способствует хаотизации движения;

– При отсутствии влияния резонансов со средним движением Солнца, совместное действие светового давления и других вековых резонансов оказывает заметное влияние только на возникновение хаотичности движения, что отражает параметр MEGNO, который становится больше 2.

Все эти результаты диссертационной работы обладают научной и практической ценностью.

Замечания по диссертационной работе

1. Для более полного уточнения коэффициентов геопотенциала желательно было бы в Приложении уделить внимание вспомогательному этапу весьма трудоемких алгебраических преобразований при переходе в потенциале Земли от сферических координат к шести переменным

кеплеровской орбиты. К сожалению, в разделе 2.2.1 подробный вывод указанных формул отсутствует.

2. В работе исследована серия p -резонансов от $1:3$ до $1:11$, однако ничего не говорится о p -резонансах с другими численными параметрами (где, например, левая часть равна не 1, а 2). По-видимому, в будущем имело бы смысл составить план общей картины для серий резонансов.
3. В выводах диссертации несколько раз встречается жаргонная фраза «Построены карты распределения вековых резонансов в области наклонов от 8000 км до 21000 км». Как известно, наклонение - это угол, и в километрах не измеряется.
4. В разделе «Цели и задачи» читаем «выполнен анализ динамической структуры зон орбитальных резонансов с использованием быстрой ляпуновской характеристики MEGNO...». Здесь точнее было бы сказать, что с помощью характеристики MEGNO выполнен анализ конкретно устойчивости (или степени хаотизации) орбит.
5. В главе 3 автор говорит о том, что «Совместное действие светового давления и резонансов со средним движением Солнца ... могут способствовать росту амплитуды колебаний эксцентриситета». Однако не отмечается, что влияние светового давления приводит не только к колебаниям эксцентриситета, но и к росту этой величины.
6. О вековых резонансах. В выводах работы следовало подчеркнуть, что влияние вековых резонансов тем значительнее, чем больше эксцентриситет и большая полуось орбиты объекта. Следовало пояснить, почему резонансы, связанные с прецессией орбиты Луны более плотно покрывают рассматриваемую область орбитального пространства, чем аналогичные резонансы с Солнцем.

Есть и ряд мелких замечаний.

1. Не часто, но в тексте все-таки встречаются пропуски слов, нарушающих связность предложений (см. на стр. 65, например, последний абзац перед разделом 3.5).
2. Фамилия Allan в работе пишется то с одной, то с двумя буквой «л», а фамилия другого исследователя Кук (Cook) пишется почему-то с двумя «к». В предложении «Аналитические формулы ... (2.29) и (2.31) являются взаимозаменяемыми» последнее слово точнее было бы заменить на «взаимодополняющими».

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 специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (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 требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Блинкова Евгения Владимировна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», физический факультет, кафедра небесной механики, астрометрии и гравиметрии, профессор; Федеральное

государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, отдел небесной механики, ведущий научный сотрудник

Кондратьев Борис Петрович

12 июня 2023 года

Контактные данные:

тел.: 7(495)939 26-50, e-mail: work@boris-kondratyev.ru.

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.03.01 – Астрометрия и небесная механика

Адрес места работы:

119234, Москва, Университетский проспект, д. 13,

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга

Телефон: +74959392046, e-mail: director@sai.msu.ru

Подпись сотрудника МГУ Б.П. Кондратьева удостоверяю:

начальник отдела канцелярии

Л.Н. Новикова