

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Блинкова Евгения Владимировна
Исследование динамической структуры низкоорбитальной области
околоземного космического пространства

Специальность 1.3.1 Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре астрономии и космической геодезии физического факультета Томского государственного университета

**Научный
руководитель**

– *Бордовицына Татьяна Валентиновна, доктор физико-математических наук, профессор*

**Официальные
оппоненты**

– *Кондратьев Борис Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры небесной механики, астрометрии и гравиметрии физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова*

Кузнецов Эдуард Дмитриевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды Института естественных наук и математики Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

Шайдулин Вахит Шамильевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета

Защита диссертации состоится «22» июня 2023 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: belova.oksana@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.1/2526>

Автореферат разослан « » мая 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

О.М. Белова

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Проблема засорения космическим мусором околоземного пространства является глобальной. Например, командование воздушно-космической обороны Северной Америки (<https://celestrak.org/>) на данный момент имеет данные о почти 13 тысячах объектах размером более 10 см. Только 6% из них являются функционирующими ИСЗ. Кроме того, существует и множество мелких объектов, которые невозможно отследить в силу их малых размеров и большой скорости. Вся эта масса отработавших космических аппаратов, ступеней и блоков ракет-носителей, и их обломков, образовавшихся в результате взрывов и столкновений, является угрозой не только для использования околоземного пространства, но и представляет прямую опасность для Земли. Под действием различных возмущений неуправляемые объекты могут менять свою орбиту, что приводит к новым космическим столкновениям и разрастанию количества обломков космического мусора, или к их падению на Землю. В последнем случае, при неполном сгорании космического мусора в атмосфере, его обломки могут быть опасны для людей и наземных объектов.

Основными факторами, которые приводят к изменению орбиты, являются резонансные возмущения. На данный момент, резонансная структура околоземного космического пространства (ОКП) мало изучена. Орбитальный резонанс возникает, если есть целочисленная соизмеримость среднего движения спутника со скоростью вращения Земли. Кроме того, соизмеримость может возникать между скоростями изменения долготы перицентра и долготы восходящего узла спутника с одной из частот движения Солнца (Земли) или Луны. К собственным частотам движения третьего тела относятся его среднее движение и скорости изменения долгот перицентра и восходящего узла. Такие резонансы называются вековыми. Кроме того, при наложении резонансов, как мы покажем в дальнейшем, может возникать хаотичность в движении объектов, что делает их движение плохо предсказуемым.

Создание и размещение в околоземном космическом пространстве новых космических систем, а также поиск орбит для утилизации или паркинга отработавших объектов, требуют детального знания динамической структуры околоземного пространства. Из всего сказанного следует, что проблема исследования динамической структуры ОКП является актуальной.

Степень разработанности

Изучение влияния орбитальных (тессеральных) и вековых резонансов на динамику околоземных объектов было начато в 60-ые годы прошлого столетия работами М. Марандо,

Р. Аллана, Л. Блиндера, Б. Гарфинкеля, Г. Гедсона [1-6] и др. в области орбитальных резонансов и работами М. Лидова[7] и Дж. Кукка[8] в области вековых резонансов.

За прошедший период было выполнено и опубликовано большое количество исследований. Рассмотреть результаты всех этих исследований здесь не представляется возможным, поэтому мы ограничимся только теми работами, которые имеют непосредственное отношение к данной работе.

Многочастотность в движении околоземных космических объектов приводит к расщеплению орбитальных резонансов. Р. Аллан [2,3] выделил три компоненты мультиплета орбитальных резонансов из критического аргумента возмущающей функции, а затем Э.Д. Кузнецов [9] для резонанса 1:2 получил еще две компоненты. Результаты Э.Д. Кузнецова и др.[9] были записаны в нашей работе [10] в общем виде. Во всех последующих наших исследованиях, и в настоящей работе, рассматривается пятикомпонентный резонансный мультиплет.

В работе С. Волк и др. [11] был предложен оригинальный алгоритм вычисления быстрой ляпуновской характеристики MEGNO (Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbit) [12-15], позволяющий интегрировать совместно с уравнениями движения уравнения параметров, используемых для вычисления MEGNO. В этой же работе было показано, что влияние светового давления вносит в аргумент возмущающей функции среднюю долготу Солнца, что может менять структуру резонансных возмущений объекта.

Развертывание глобальных навигационных систем GPS и ГЛОНАСС привело к возникновению интереса к исследованию динамической структуры области функционирования этих систем [16-18]. В первых двух работах рассматриваются только вековые резонансы, в третьей работе и орбитальный, и вековые резонансы.

Ряд исследований орбитальных и вековых резонансов был выполнен группой А. Целлети. Обзор работ приведен в [19]. Все результаты получены аналитическими методами.

Следует отметить также работы С. Брейтера [20-23] по исследованию вековых резонансов со средним движением третьего тела, где он впервые показал, что наложение двух вековых резонансов может приводить к возникновению хаотизации движения.

В работе Е. М. Алесси и др [24] было впервые высказано предположение, что действие вековых резонансов, связанных со средним движением Солнца, усиливает влияние светового давления.

Вопросы совместного действия светового давления и вековых резонансов на динамику околоземных объекты в последнее время привлекают всё большее внимание. Обзор работ можно найти во введении к работе [25]. В указанной работе рассматривается возникновение так называемого флипа, т.е. переворота движения объекта с прямого на обратное, возникающее при

переходе наклона через 90° под действием светового давления и при наличии в движении вековых резонансов. Показано, что световое давление при большой парусности (отношение миделева сечения к массе объекта) может вызывать такие перевороты, а при определенных условиях подавлять такие перевороты, вызываемые эффектом Лидова-Козаи.

Цели и задачи

Объектом исследования являются различные реальные и модельные объекты ОКП, движущиеся под действием законов физики. **Предметом исследования** является динамическая структура ОКП, которая выявляется путем исследования динамики объектов. Исходя из этого, цель работы формулируется как выявление динамической структуры низкоорбитальной области ОКП и исследование особенностей динамики объектов, движущихся в этой области под влиянием орбитальных и вековых резонансов.

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

- исследована структура орбитальных резонансов высоких порядков, возникающих в динамике объектов, движущихся в низкоорбитальной области ОКП;
- выполнен анализ динамической структуры зон орбитальных резонансов с использованием быстрой ляпуновской характеристики MEGNO [11-15] и построены соответствующие карты;
- произведен общий анализ вековых резонансов, возникающих в движении объектов, и построены карты расположения вековых резонансов относительно исследуемых областей орбитальных резонансов;
- изучена особенность движения объектов под действием светового давления, при одновременном влиянии вековых резонансов, связанных со средним движением Солнца;
- на все карты нанесены положения реальных объектов, взятые из каталога NORAD, который ведет командование воздушно-космической обороны Северной Америки;
- выявлены особенности динамической эволюции орбит реальных объектов под влиянием резонансов.

Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит в следующем:

- дано полное описание структуры орбитальных резонансов 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7, 1:8, 1:9, 1:10 и 1:11 со скоростью вращения Земли;
- произведен анализ вековых резонансов области от 8000 км до 21000 км по большой полуоси и от 0° до 180° по наклону, тем самым представлена самая полная структура вековых резонансов низкоорбитальной области. В данной работе, диапазон исследования был выбран

исходя из динамической структуры орбитальных резонансов. Так, области орбитальных резонансов 1:3, 1:10 и 1:11 имеют не характерные картины резонансной структуры и являются верхней и нижними границами области, которую мы будем называть низкоорбитальным пространством;

- численными методами показано, что действие вековых резонансов, связанных со средним движением Солнца, усиливает влияние светового давления. Исследования проводились в диапазоне больших полуосей от 6500 км до 9500 км и по наклонению от 0° до 90° . Коэффициент парусности принимался равным $1 \text{ м}^2/\text{кг}$;

- показано также, что действие светового давления способно менять структуру вековых резонансов объекта;

- выявлены реальные объекты, которые движутся в условиях наложения резонансов различных типов, что приводит к хаотизации их движения.

Научная и практическая значимость работы

В работе впервые исследована резонансная структура низкоорбитальной области ОКП и построены соответствующие карты.

Обобщены формулы четвертой и пятой компоненты мультиплета орбитального резонанса, полученные Э. Д. Кузнецовым [9] для резонанса 1:2 со скоростью вращения Земли, на случай произвольного резонанса и путем численного моделирования подтверждена пятикомпонентная структура резонансного мультиплета практически для всех рассмотренных резонансов.

Полученные в работе данные об орбитальной эволюции объектов рассматриваемой области ОКП позволяют на стадиях разработки и утилизации космических систем выбирать для размещения или паркинга области ОКП с оптимальными свойствами динамики объектов.

Методология и методы исследования

Основные законы динамики небесных тел являются методологией исследования. В качестве метода исследования выступает численно-аналитическое моделирование движения объектов. Выявление орбитальных и вековых резонансов производится по следующей схеме:

- выполняется численное моделирование долговременной орбитальной эволюции объектов при помощи усовершенствованного программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ» [26] с учетом возмущений от несферичности Земли, притяжения Луны, Солнца, а при необходимости и возмущений от светового давления;

- по полученным данным о движении объектов, вычисляются резонансные характеристики орбитальных и вековых резонансов по специальным аналитическим формулам. Причем для вычисления вековых частот используются и аналитические, и численные способы, поскольку

аналитические формулы дают искажённые результаты при больших эксцентриситетах, а формулы для численного моделирования имеют особенности при малых эксцентриситетах;

– производится численное исследование эволюции во времени резонансных характеристик, оценивается близость к нулю резонансного соотношения и устанавливается тип поведения критического аргумента: циркуляция – резонанс отсутствует, либрация – резонанс есть, и он устойчив, смена циркуляции и либрации – резонанс неустойчив.

Совместно с уравнениями движения обычно интегрируются уравнения для вычисления текущего и усредненного параметров MEGNO. Эволюция во времени усредненного параметра MEGNO показывает степень хаотизации движения объекта. Так, например, известно, что для квазипериодических (регулярных) орбит параметр MEGNO осциллирует около 2, для устойчивых орбит типа гармонического осциллятора усредненное значение MEGNO равно нулю, а при значении параметра MEGNO больше 2 и его линейном росте имеет место хаотизация движения, что не позволяет точно прогнозировать орбитальное движение объекта.

Положения, выносимые на защиту

1. Наличие пятикомпонентного мультиплета в орбитальном резонансе прослеживается в подавляющем большинстве рассмотренных резонансов.
2. Орбитальные резонансы могут способствовать появлению хаоса в движении объектов за счет наложения нескольких резонансных компонент мультиплета.
3. Вековые резонансы пронизывают все рассматриваемое орбитальное пространство. Наложение вековых резонансов может являться источником хаоса.
4. Вековые резонансы, связанные со средним движением Солнца, усиливают влияние светового давления. При этом влияние светового давления может менять резонансную структуру объекта.
5. Орбитальная эволюция реальных объектов показывает влияние всех обнаруженных в данной области пространства резонансных структур.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты научной работы представлены на следующих научных конференциях:

Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики (Томск, 2018), XI Международная конференция: Околосолнечная астрономия и космическое наследие (Казань, 2019), Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики (Томск, 2019), Конференция «Наука будущего» и форум «Наука будущего – наука молодых» (Сочи, 2019), 49-я Международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2020), The eleventh Moscow solar system symposium 11m-s3 (Москва,

2020), Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики (Томск, 2020), Всероссийская астрономическая конференция (Москва, 2021), Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики (Томск, 2021), XI Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2022).

Основные результаты по теме диссертации представлены в 15 печатных изданиях, из которых 5 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus/RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия:

1. Томилова И. В., Блинкова Е.В., Бордовицына Т. В. Особенности динамики объектов, движущихся в окрестности резонанса 1:3 с вращением Земли // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*, 2019. Т. 53. № 5. С. 323–338 DOI: 10.1134/S0320930X19050074 (Двухлетний импакт-фактор РИНЦ 2021: 1,253) // Переводная версия: Tomilova I.V., Blinkova E.V., Bordovitsyna T.V. Features of the dynamics of objects moving in the neighborhood of the 1:3 resonance with the Earth's rotation//*Solar System Research*, 2019. Vol.53. №5. P.307-321. DOI: 10.1134/S0038094619050071 (Двухлетний импакт-фактор WoS 2021: 0,790) Личный вклад: 70%

2. Александрова А.Г., Блинкова Е.В., Бордовицына Т.В., Попандопуло Н.А., Томилова И.В. Вековые резонансы в динамике объектов, движущихся в областях LEO–MEO околоземного орбитального пространства// *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*, 2021. Т 55. № 3. С. 272–287 DOI: 10.31857/S0320930X21030014 (Двухлетний импакт-фактор РИНЦ 2021: 1,253)// Переводная версия: Aleksandrova A.G., Blinkova E.V., Bordovitsyna T.V., Popandopulo N.A., Tomilova I.V. Secular resonances in the dynamics of objects moving in LEO–MEO regions of near-earth orbital space// *Solar System Research*, 2021. Vol.55. №3. P.266-281. DOI: 10.1134/S0038094621030011 (Двухлетний импакт-фактор WoS 2021: 0,790) Личный вклад: 45%

3. Томилова И. В., Блинкова Е.В., Бордовицына Т. В. Особенности динамики объектов, движущихся в зонах орбитальных резонансов 1:4, 1:6 и 1:8 с вращением Земли// *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*, 2021. Т 55. № 5. С. 427–443 DOI: 10.31857/S0320930X21040101 (Двухлетний импакт-фактор РИНЦ 2021: 1,253)// Переводная версия: Tomilova I.V., Blinkova E.V., Bordovitsyna T.V. Features of the dynamics of objects moving in the zones of orbital resonances 1 : 4, 1 : 6, and 1 : 8 with the Earth's rotation// *Solar System Research*, 2021. Vol.55. №5. P.420-436. DOI: 10.1134/S0038094621040092 (Двухлетний импакт-фактор WoS 2021: 0,790) Личный вклад: 70%

4. Блинкова Е.В., Бордовицына Т. В. Исследование совместного влияния светового давления и вековых резонансов, связанных со средним движением Солнца, на динамику объектов

в области LEO// *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*, 2022. Т 56. № 4. С. 219–236 DOI: 10.31857/S0320930X22040028 (Двухлетний импакт-фактор РИНЦ 2021: 1,253)//
Переводная версия: Blinkova E.V., Bordovitsyna T.V. Investigation of the joint effect of light pressure and secular resonances associated with the mean motion of the Sun on the dynamics of objects in the LEO region// *Solar System Research*, 2022. Vol.56. №4. P.207-224. DOI: 10.1134/S0038094622040025 (Двухлетний импакт-фактор WoS 2021: 0,790) Личный вклад: 80%

5. Блинкова Е.В., Бордовицына Т. В. Исследование динамики области орбитальных резонансов высоких порядков// *Вестник Томского государственного университета. Математика и Механика*, 2022. № 79. С. 58-68 DOI: 10.17223/19988621/79/5 (Двухлетний импакт-фактор РИНЦ 2021: 0,963) Личный вклад: 80%;

И 10 публикаций в сборниках материалов конференций:

1. Блинкова Е.В., Томилова И.В. Орбитальная эволюция объектов, движущихся в окрестности резонанса 1:3 с вращением Земли, в условиях наложения резонансов различных типов// VIII Всероссийская молодежная научная конференция "Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики - 2018". Материалы конференции. Под редакцией М.Ю. Орлова. 2019. С. 177-180.

2. Blinkova E.V., Aleksandrova A.G., Bordovitsyna T.V., Popandopulo N.A., Tomilova I.V. Study of the dynamic structure of LEO-MEO regions of the near-earth orbital space// *The Eleventh Moscow Solar System Symposium 11M-S3*. Москва, 2020. С. 260-262.

3. Блинкова Е.В., Красавин Д.С. Исследование динамической структуры околоземного орбитального пространства в области резонанса 1:4 со скоростью вращения Земли// *Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики - 2019*. Материалы IX Всероссийской молодежной научной конференции. Под редакцией М.Ю. Орлова. 2020. С. 214-216.

4. Блинкова Е.В., Томилова И.В. Орбитальная эволюция объектов, движущихся в окрестности резонанса 1: 4 с вращением Земли// *Физика космоса. труды 49-й Международной студенческой научной конференции*. Министерство науки и высшего образования РФ, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. 2020. С. 153-154.

5. Красавин Д.С., Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Блинкова Е.В., Томилова И.В. Компьютерное моделирование с применением искусственных нейронных сетей в исследовании динамической структуры околоземного орбитального пространства// XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства. сборник тезисов : в 4 т.. Москва, 2021. С. 418-423.

6. Блинкова Е.В., Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Попандопуло Н.А., Томилова И.В. Особенности динамики объектов, движущихся в областях LEO-MEO околоземного космического пространства под действием вековых резонансов различных типов// X Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики -2020». Материалы конференции. под редакцией М.Ю. Орлова. Томск, 2021. С. 196-200.

7. Блинкова Е.В., Бордовицына Т.В. Исследование динамики объекта 84414 из каталога NORAD// X Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики -2020». Материалы конференции. под редакцией М.Ю. Орлова. Томск, 2021. С. 193-196.

8. Томилова И.В., Александрова А.Г., Блинкова Е.В., Бордовицына Т.В., Попандопуло Н.А. Резонансная структура и динамическая эволюция объектов высокоорбитальной области околоземного орбитального пространства// Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики - 2021. Материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием. Под редакцией М.Ю. Орлова. Томск, 2022. С. 295-299.

9. Томилова И. В., Александрова А. Г., Блинкова Е. В., Бордовицына Т. В., Попандопуло Н. А. Исследование резонансной структуры высокой орбитальной области ОКП методами численного моделирования // Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2021: Астрономия в эпоху многоканальных исследований, Москва, 23–28 августа 2021 года. Москва: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2021. С. 95–96.

10. Блинкова Е.В., Бордовицына Т.В. Исследование совместного влияния светового давления и вековых резонансов, связанных со средним движением Солнца, на динамику объектов в области LEO// Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики - 2021. Материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием. Под редакцией М.Ю. Орлова. Томск, 2022. С. 267-270.

Исследования проведены при поддержке 5 НИР: грант фонда им. Д.И. Менделеева №8.1.14.2018 «Исследование актуальных проблем динамики малых объектов Солнечной системы, связанных с реализацией существующих и планируемых космических миссий» 2018г., грант РФФИ №18-32-00735 мол_а «Исследование особенностей динамики околоземных космических объектов в условиях наложения резонансов различных типов»2018-2020г., грант РНФ №19-72-10022 «Исследование сложных задач динамики околоземных объектов методами компьютерного моделирования и машинного анализа данных» 2019-2022г., грант РФФИ №20-32-90095 «Аспиранты» по теме «Исследование динамики совокупности неуправляемых объектов, движущихся в областях LEO и LEO-MEO околоземного космического пространства

(ОКП)» 2020-2022г.; тема выполняемая в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSWM-2020-0049 по теме «Численное моделирование движения малых тел Солнечной системы на основе позиционных наблюдений» 2020 – 2024 гг.

Все представленные в диссертации результаты получены, обработаны и проанализированы при непосредственном участии автора.

Личный вклад

Соискателем совместно с научным руководителем определены цель и задачи исследования. Все результаты по численному моделированию динамики объектов, построению динамической структуры изучаемой области ОКП и анализу результатов получены соискателем лично. Научный руководитель соискателя, а также руководители проектов, по которым выполнялась работа, принимали участие в постановке задачи и обсуждении результатов.

В двух совместных работах с И. В. Томиловой и Т. В. Бордовицыной указанные соавторы участвовали в постановке задач и обсуждении результатов, полученных лично соискателем. В обширной работе пяти авторов А. Г. Александрова, Е. В. Блинкова, Т. В. Бордовицына, Н. А. Попандопуло, И. В. Томилова соискателю принадлежат все исследования структуры вековых резонансов рассматриваемой области околоземного космического пространства. В двух последних работах в соавторстве с Т. В. Бордовицыной, научный руководитель определял цели и задачи, которые были выполнены соискателем.

Краткое содержание 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.

В первой главе дается описание используемой численной модели движения ИСЗ. Рассматриваются уравнения движения и математическая модель возмущающих сил, связанных с несферичностью геопотенциала, влиянием Луны и Солнца, рассматриваемых как материальные точки, а также с действием светового давления. Дано описание возмущающих сил, приведены алгоритмы вычисления их влияния. Все расчеты выполняются с применением усовершенствованного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ» [26] на кластере СКИФ ТГУ с использованием параллельных вычислений.

Во второй главе приводится описание используемых методов. Дается описание алгоритма вычисления быстрой ляпуновской характеристики MEGNO [12-15] путем совместного интегрирования уравнений движения и уравнений параметров для вычисления MEGNO.

Как уже упоминалось, эволюция во времени усредненного параметра MEGNO $\bar{Y}_\phi(t)$ показывает степень хаотизации орбиты. Эти характеристики вычисляются одновременно с прогнозированием движения ИСЗ.

По вычисленным в процессе прогнозирования движения координатам и скоростям объектов производится выявление всех резонансов, действующих на объект, по специальным алгоритмам. Компоненты мультиплета орбитального резонанса вычисляются по ниже следующим формулам. Резонансные соотношения имеют вид:

$$\dot{\Phi}_1 = u(\dot{M} + \dot{\omega} + \dot{\Omega}) - m\dot{\theta}, \quad \dot{\Phi}_3 = u\dot{M} + m(\dot{\omega} + \dot{\Omega} - \dot{\theta}), \quad \dot{\Phi}_5 = u\dot{M} + m(-\dot{\omega} + 2\dot{\Omega} - \dot{\theta}),$$

$$\dot{\Phi}_2 = u(\dot{\omega} + \dot{M}) + m(\dot{\Omega} - \dot{\theta}), \quad \dot{\Phi}_4 = u(\dot{M} - \dot{\Omega} + \dot{\omega}) - m\dot{\theta},$$

а соответствующие им критические аргументы записываются как:

$$\Phi_1 = u(M + \omega + \Omega) - m\theta, \quad \Phi_3 = uM + m(\omega + \Omega - \theta), \quad \Phi_5 = uM + m(-\omega + 2\Omega - \theta),$$

$$\Phi_2 = u(\omega + M) + m(\Omega - \theta), \quad \Phi_4 = u(M - \Omega + \omega) - m\theta,$$

где M, ω, Ω – стандартные обозначения Кеплеровых элементов, θ – звездное время.

Первые три компоненты были выведены Р. Аланом [2,3], затем четвертая и пятая компоненты мультиплета были получены Э. Д. Кузнецовым [9] для орбитального резонанса 1:2. В общем виде четвертая и пятая компоненты были получены нами [10].

Вековые резонансные характеристики получаются из однократно и двукратно усредненного аргумента, выделенного из возмущающей функции. В работе рассматриваются 20 типов апсидально-нодальных резонансных характеристик для Луны и Солнца (Таблица 1) и 16 вековых резонансов, связанных со средним движением третьего тела (Таблица 2).

Таблица 1 — Типы апсидально-нодальных резонансов первого-шестого порядков

№	Тип резонансного соотношения	№	Тип резонансного соотношения	№	Тип резонансного соотношения
1	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + \dot{\omega} - \dot{\omega}'_{S,L}$	8	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_{S,L}$	15	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + 2\dot{\omega}'_{S,L}$
2	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - \dot{\omega} + \dot{\omega}'_{S,L}$	9	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + \dot{\omega}$	16	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - 2\dot{\omega}'_{S,L}$
3	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + \dot{\omega} + \dot{\omega}'_{S,L}$	10	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - \dot{\omega}$	17	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$
4	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - \dot{\omega} - \dot{\omega}'_{S,L}$	11	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + 2\dot{\omega}$	18	$\dot{\omega} - \dot{\omega}'_{S,L}$
5	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_{S,L}$	12	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - 2\dot{\omega}$	19	$\dot{\omega} + \dot{\omega}'_{S,L}$
6	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_{S,L}$	13	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + \dot{\omega}'_{S,L}$	20	$\dot{\omega}$
7	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) + 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_{S,L}$	14	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) - \dot{\omega}'_{S,L}$		

Таблица 2 — Типы вековых резонансов со скоростью движения возмущающего тела второго–пятого порядков

№	Тип резонансного соотношения	№	Тип резонансного соотношения	№	Тип резонансного соотношения
1	$\dot{M}'_{S,L} - \dot{\omega}$	7	$\dot{M}'_{S,L} + \dot{\omega} - (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$	13	$\dot{M}'_{S,L} - 2\dot{\omega} - (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$
2	$\dot{M}'_{S,L} + \dot{\omega}$	8	$\dot{M}'_{S,L} - \dot{\omega} + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$	14	$\dot{M}'_{S,L} + 2\dot{\omega} + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$
3	$\dot{M}'_{S,L} - 2\dot{\omega}$	9	$\dot{M}'_{S,L} - \dot{\omega} - (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$	15	$\dot{M}'_{S,L} - 2\dot{\omega} + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$
4	$\dot{M}'_{S,L} + 2\dot{\omega}$	10	$\dot{M}'_{S,L} + \dot{\omega} + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$	16	$\dot{M}'_{S,L} + 2\dot{\omega} - (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$
5	$\dot{M}'_{S,L} - (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$	11	$\dot{M}'_{S,L} - 2(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$		
6	$\dot{M}'_{S,L} + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$	12	$\dot{M}'_{S,L} + 2(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$		

Где Ω , ω – долгота перицентра и восходящего узла спутника, $\Omega'_{S,L}$, $\omega'_{S,L}$, $M'_{S,L}$ – долгота перицентра, долгота восходящего узла и средняя аномалия третьего тела.

Особенности вычисления частот зависят от величины эксцентриситета и наклона орбиты. При их малых значениях применяются аналитические формулы [27], а при больших значениях эксцентриситета используется численный подход [28].

Близость к нулю резонансного соотношения является обязательным условием возникновения резонанса. Поведение критического аргумента говорит об устойчивости резонанса. Если критический аргумент либрирует, то резонанс устойчив. Если либрация сменяется циркуляцией и наоборот, то резонанс не устойчив. Если критический аргумент циркулирует, считается, что резонанса нет.

Все вычисления производятся на усовершенствованном комплексе «Численная модель движения систем ИСЗ», основанного на интеграторе Lobbie [29]. Данный интегратор заменил ранее используемый интегратор Эверхарта.

Кроме того, в работе изучается движение реальных объектов. Положения реальных наблюдаемых объектов, населяющих околоземное космическое пространство, взято из каталога NORAD. Это как функционирующие космические аппараты, так и отработавшие объекты и обломки космического мусора.

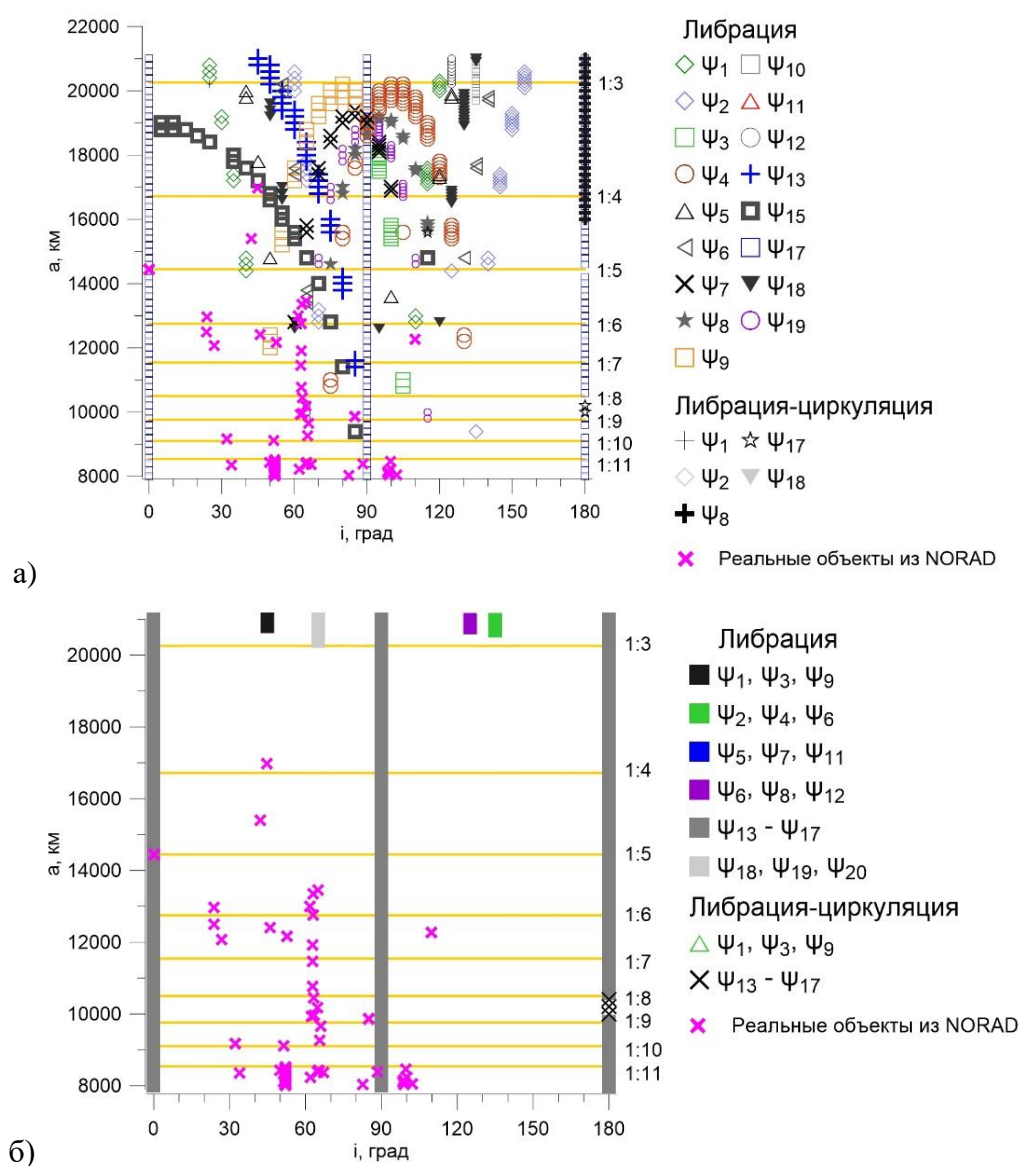
Все результаты работы описаны в главе три.

В работе показано, что нижний и верхний из рассмотренных в работе орбитальных резонансов имеют не характерную структуру, по сравнению с другими орбитальными резонансами, расположенными между ними. Таким образом, эти резонансы являются границами области, которую в рамках данной работы мы называем низкоорбитальной.

В подразделе 3.1 дано полное описание структуры орбитальных и вековых резонансов области ОКП, расположенной в диапазоне от 8000км до 21000км по большой полуоси и от 0° до 180° по наклонению.

На рисунках здесь и далее введены такие обозначения: ψ – критический аргумент векового резонанса, а приписанный ему номер есть номер типа резонанса из таблицы 1 и 2.

Общая картина вековых резонансов представлена на рисунке 1 и 2. Кроме того, на все карты вековых резонансов было нанесено относительное положение областей орбитальных резонансов и реальных объектов, населяющих низкоорбитальное пространство. Всего в рассмотренной области расположено 145 объектов с эксцентриситетом меньше 0,5. Данные по расположению реальных объектов были взяты из каталога NORAD.



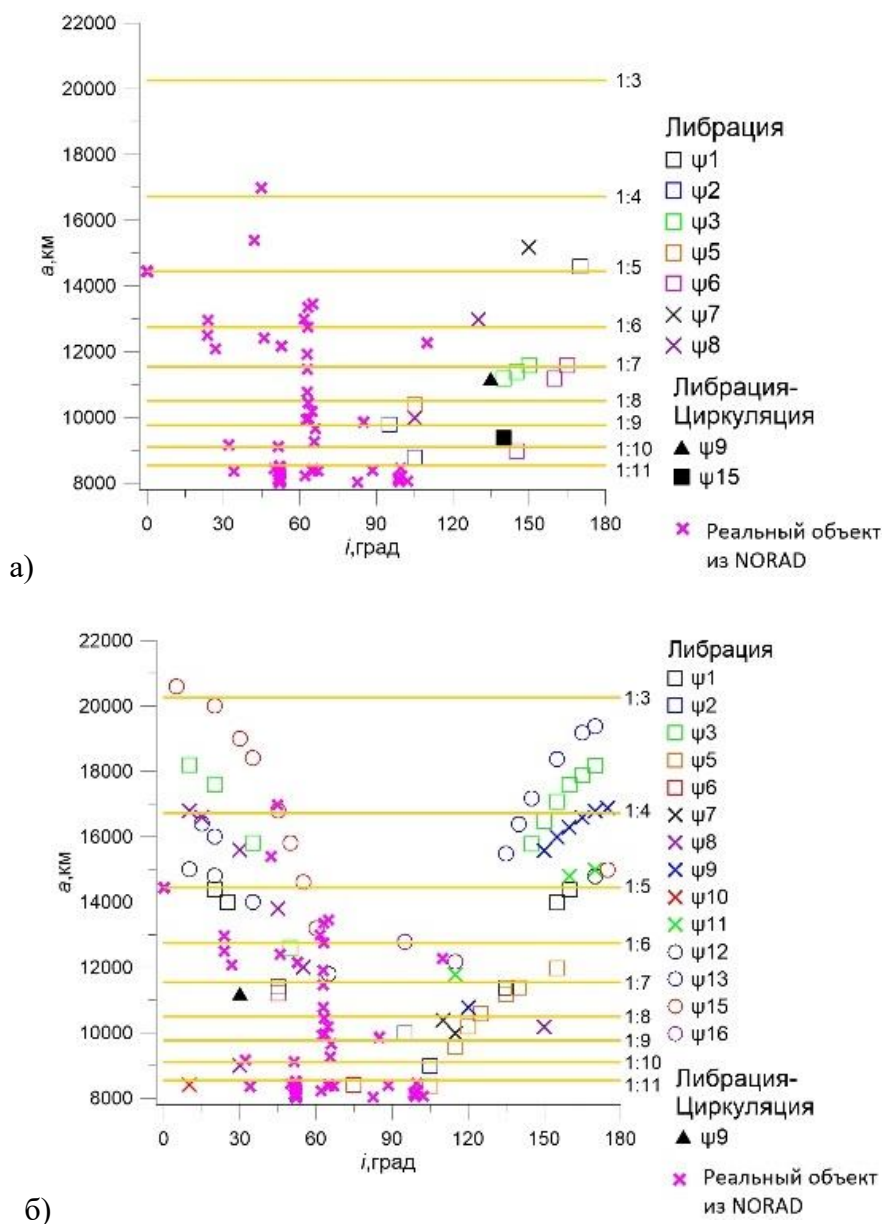
а) апсидально-нодальные резонансы с прецессией орбиты Луны, б) апсидально-нодальные резонансы с прецессией орбиты Солнца

Рисунок 1 — Общая картина вековых апсидально-нодальных резонансов

Как показывают данные, приведенные на рисунках 1 и 2, в низкоорбитальной области ОКП действует большое количество вековых резонансов.

На рисунке 1а и 1б представлены резонансы, связанные с прецессией орбиты Луны и Солнца соответственно. В геоцентрической системе координат, прецессия орбиты Солнца является отражением прецессии орбиты Земли. Так как этот параметр является малым, некоторые резонансы на рисунке 1б совпадают.

На рисунках 2а и 2б показано распределение вековых резонансов, связанных со средним движением Луны и Солнца соответственно.



а) резонансы со средним движением Луны, б) резонансы со средним движением Солнца

Рисунок 2 — Общая картина вековых резонансов, со средним движением третьего тела

Вековые резонансы со средним движением Солнца распределены в диапазоне больших полуосей от 8000 км до 21000 км по обе стороны от наклона 90° , а вековые резонансы со средним движением Луны проявляются только на орбитах, большие полуоси которых менее 16000 км и только в динамике объектов с обратным движением.

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

На рисунке 3 представлено распределение компонент мультиплета орбитального резонанса 1:3 со скоростью вращения Земли.

В основном структуру орбитального резонанса формируют малоустойчивые компоненты (показано на рисунке 3 серым цветом). Устойчивое влияние показывает вторая компонента мультиплета орбитального резонанса.

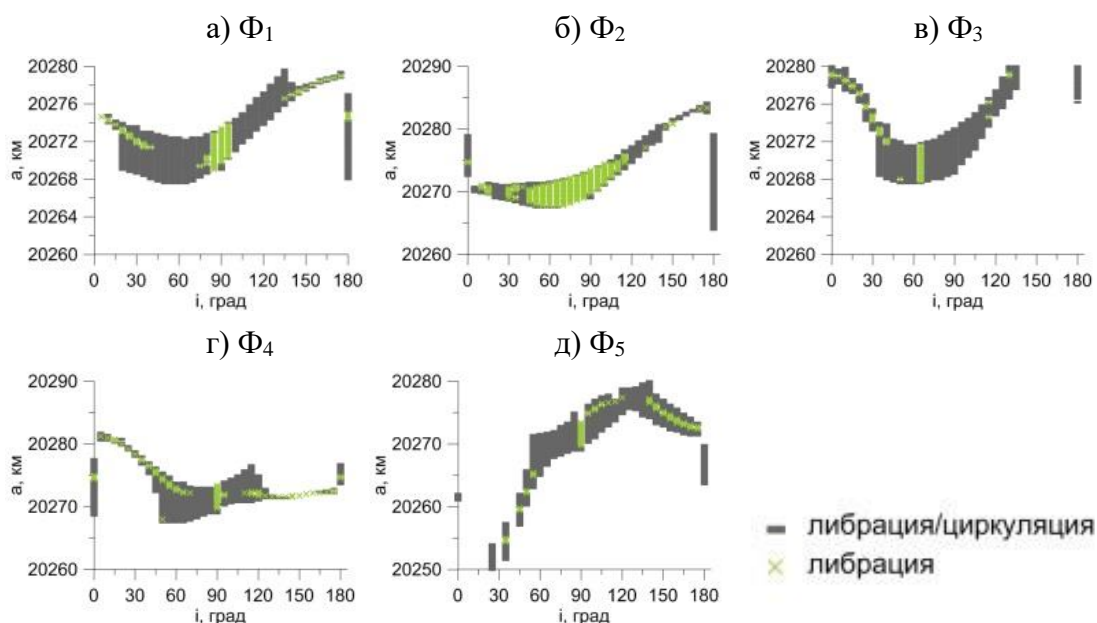


Рисунок 3 — Карта компонент мультиплета орбитального резонанса 1:3

Более того, структуру орбитального пространства формируют и вековые резонансы. На рисунке 4 показано распределение вековых апсидально-нодальных резонансов, связанных с прецессией орбиты Луны.

Данные на рисунке 4 показывают, что 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 же проявляют свое действие и неустойчивые резонансы, которые накладываются на устойчивые.

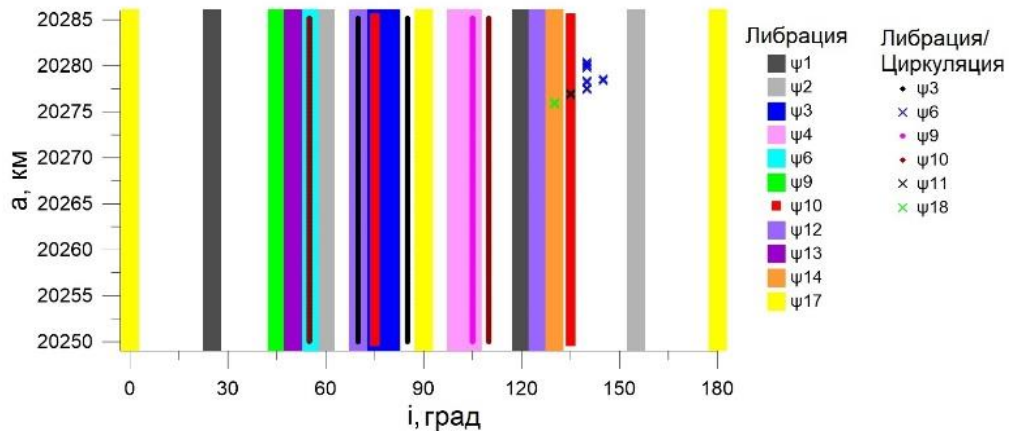


Рисунок 4 — Распределение вековых апсидально-нодальных резонансов, связанных с прецессией орбиты Луны, в области орбитального резонанса 1:3

На рисунке 5 представлено распределение вековых апсидально-нодальных резонансов, связанных с прецессией орбиты Солнца. Как и для случая с Луной, здесь вековой резонанс $\dot{\Psi}_{17S,L} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L}) \approx 0$ пронизывает всю область по наклонениям 0° , 90° и 180° . В этой области действуют все типы резонансов, представленных в таблице 1, причем как устойчивые, так и неустойчивые.

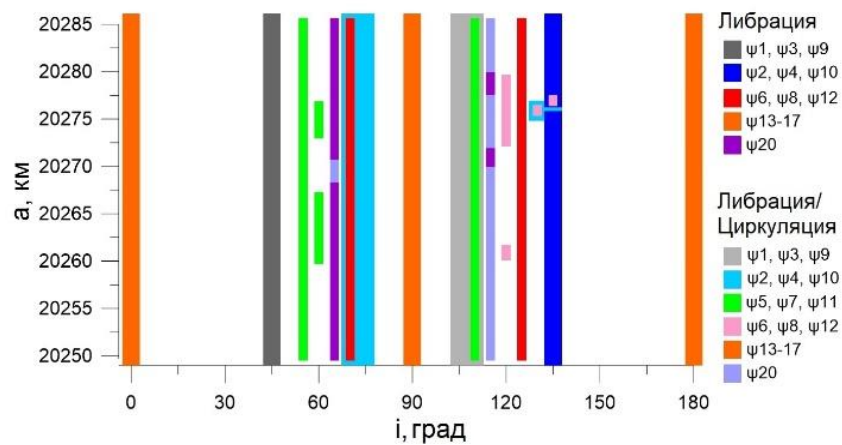


Рисунок 5 — Распределение вековых апсидально-нодальных резонансов, связанных с прецессией орбиты Солнца, в области орбитального резонанса 1:3

Вековых резонансов, связанных со средним движением третьего тела в области 1:3 не обнаружено.

Вместе с тем, динамическую структуру характеризует параметр MEGNO (рисунок 6), который показывает степень хаотизации движения объектов. Данные, приведенные, на рисунке 6 показывают, что рассмотренная область отличается высокой степенью хаотизации орбит, причем наибольшая степень хаотизации наблюдается в области наклонений от 60° до 90° . Это можно

объяснить наложением большого количества резонансов различных типов, как вековых, так и орбитальных.

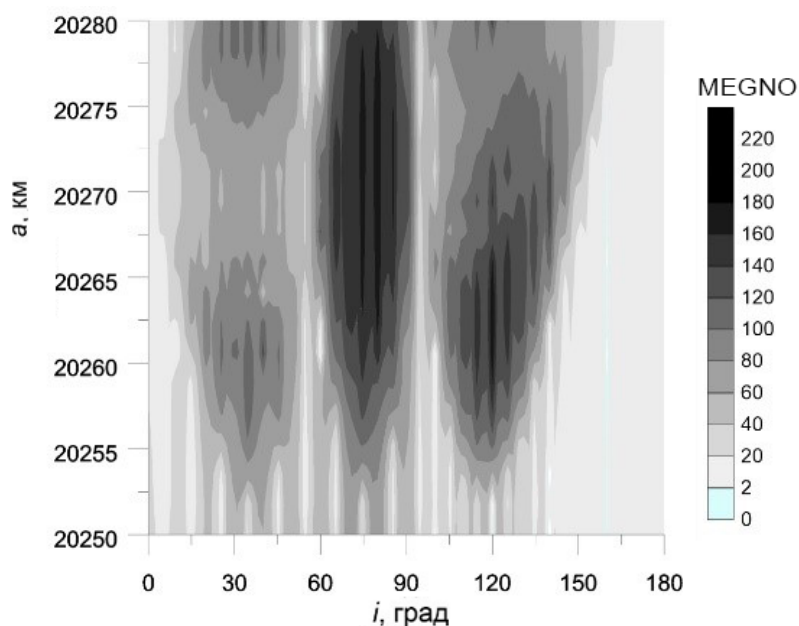


Рисунок 6 — Карта MEGNO-параметра для орбитального резонанса 1:3 со скоростью вращения Земли

Группа резонансов 1:4, 1:6 и 1:8 имеют сходство структур распределения резонансов, поэтому ограничимся примером изучения особенностей динамики области резонанса 1:4.

Компоненты мультиплета орбитального резонанса 1:4 приведены на рисунке 7.

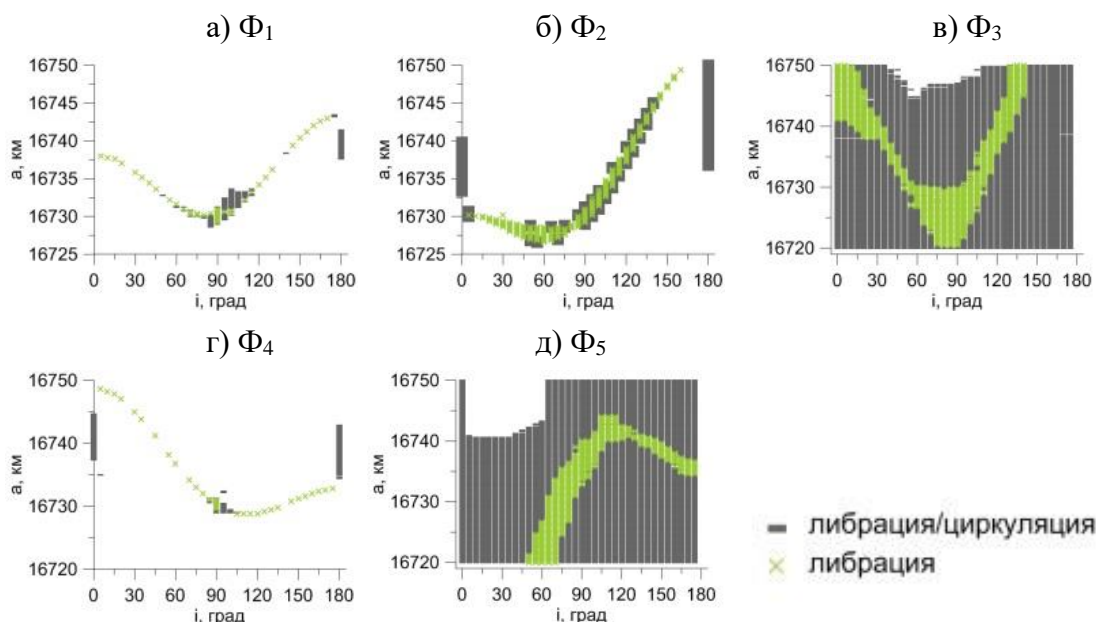


Рисунок 7 — Карта компонент мультиплета орбитального резонанса 1:4

Следует отметить, что здесь наибольшие зоны устойчивости показывают вторая, третья и пятая компоненты. Третья и пятая компоненты действуют практически во всей резонансной

области и в основном преобладает неустойчивое влияние. Первая и четвертая компоненты имеют тонкую линию действия.

Кроме того, была рассмотрена структура вековых резонансов, населяющих область 1:4. В рассматриваемой области орбитального пространства действует один устойчивый апсидально-нодальный резонанс, связанный с прецессией орбиты Солнца, и девять устойчивых резонансов, связанных с прецессией орбиты Луны. В области от 5° до 40° и от 140° до 175° по наклонению вообще не обнаружено вековых резонансов. 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 только для наклонов 50° до 110° . Резонанс Лидова-Козаи практически отсутствует.

Анализ распределения вековых резонансов, связанных со средним движением Луны и Солнца показывает, что эти резонансы появляются впервые в этой области околоземного орбитального пространства. Устойчивых резонансов только три. В более высоких областях таких резонансов нет.

На рисунке 8 представлена MEGNO-карта для области резонанса 1:4 со скоростью вращения Земли. На ней изображена зона хаотизации движения. Наиболее темным цветом представлена область, в которой невозможно прогнозировать движение объектов.

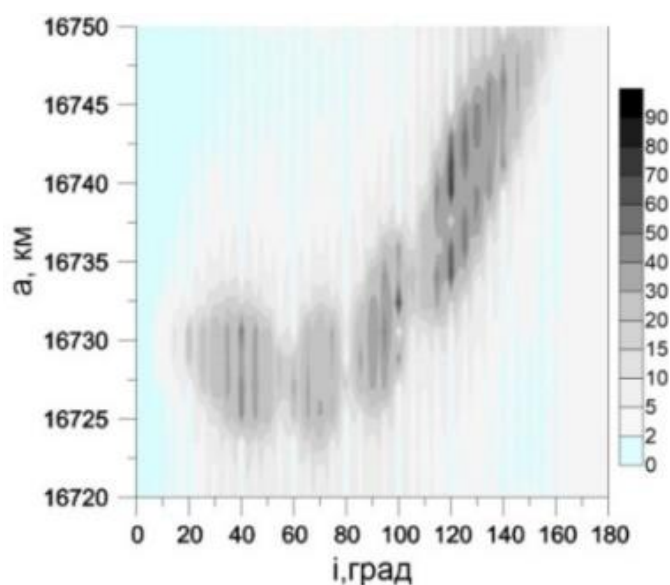


Рисунок 8 — Карта MEGNO-параметра для орбитального резонанса 1:4 со скоростью вращения Земли.

Если сравнить рисунок 8 с соответствующей картой мультиплетов на рисунке 7, можно сделать вывод, что зона хаотизации проходит по линии действия второй компоненты мультиплета орбитального резонанса, по всей видимости, в результате наложения на нее других резонансов различных типов.

Рассмотрим еще одну область, а именно область орбитального резонанса 1:5 со скоростью вращения Земли. Сходство структур имеют и резонансы 1:7 и 1:9.

Карты распределения пяти компонент мультиплета орбитального резонанса 1:5 со скоростью вращения Земли представлены на рисунке 9. Первая, вторая и четвертая компоненты имеют четкие устойчивые линии действия. Третья и пятая компонента имеют бóльшую площадь покрытия, но в основном это неустойчивые резонансы.

На карту компонент мультиплета орбитального резонанса были нанесены реальные объекты, взятые из каталога NORAD. В данной области располагаются 20 спутников связи группировки ОЗб. Они имеют наклонение приближенное к 0° , один спутник имеет большую полуось 14447 км, а остальные 14444 км. Ни один из этих спутников не попадает под действие орбитального резонанса 1:5.

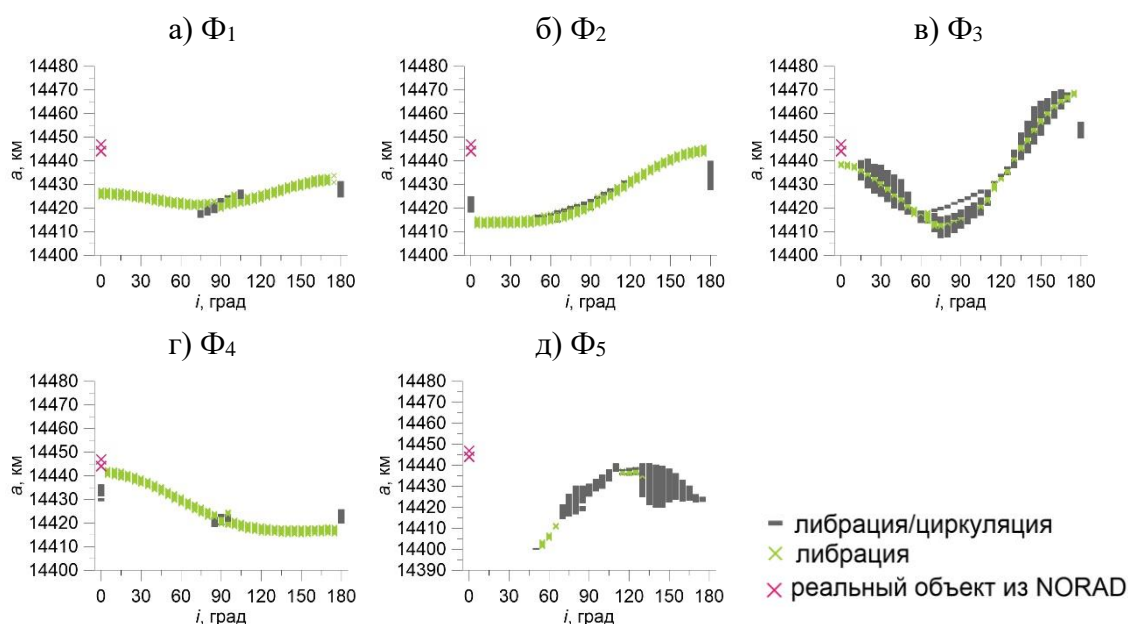


Рисунок 9 — Карта компонент мультиплета орбитального резонанса 1:5

Исследование вековых резонансов в область орбитального резонанса 1:5 показывает, что структура этих резонансов, в этой области сложна и отличается большим количеством наложений, как устойчивых, так и неустойчивых резонансов. Более подробно анализ вековых резонансов всех областей представлен в работе.

Ниже представлены MEGNO-карта для области 1:5 со скоростью вращения Земли (рисунок 10). Сравнивая рисунок 9 с соответствующей MEGNO-картой (рисунок 10), можно сказать, что хаотизация движения происходит по линии действия второй компоненты мультиплета орбитального резонанса, путем наложения на нее других резонансов различных типов. Данный вывод аналогичен выводу, сделанному из анализа орбитальных областей 1:4, 1:6 и 1:8.

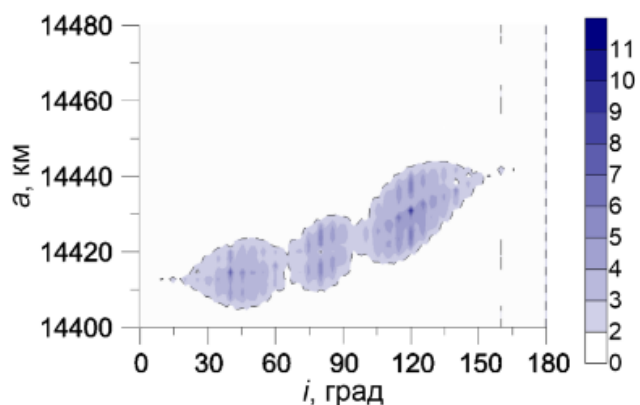


Рисунок 10 — MEGNO-карта области орбитального резонанса 1:5 со скоростью вращения Земли

Следующие две области 1:10 и 1:11 имеют близкие картины эволюции компонент мультиплета орбитальных резонансов. Третья и пятая компоненты у резонансов исчезают. Размах компонент мультиплета у резонанса 1:10 составляет около 110 км, у резонанса 1:11 – 120 км. Приведем пример исследования области резонанса 1:10 со скоростью вращения Земли (рисунок 11).

Единственный объект в области резонанса 1:10 является космическим мусором. На рисунке 11в видно, что объект расположен в области четвертой компоненты мультиплета резонанса. Однако, анализ показал, что четвертая компонента для этого объекта циркулирует. Это обозначает отсутствие резонанса.

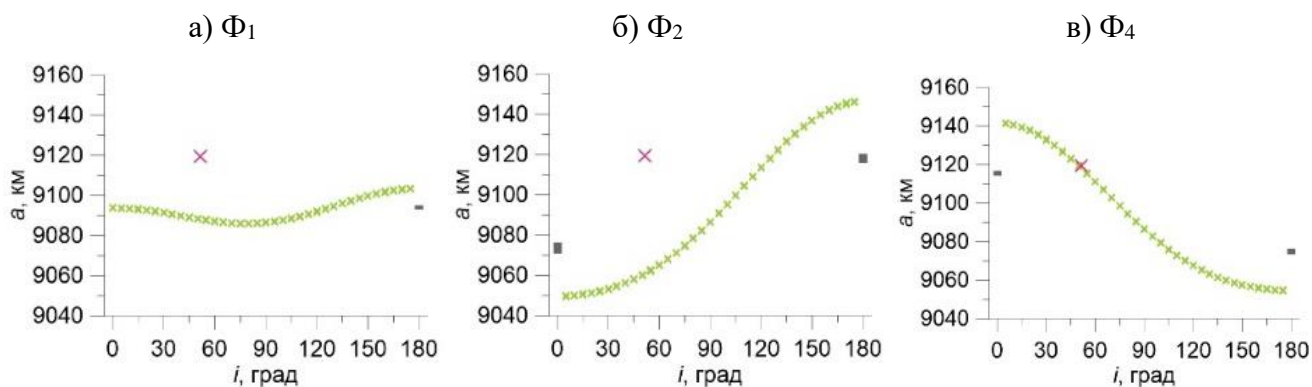


Рисунок 11 — Карта компонент мультиплета для орбитального резонанса 1:10

В области резонанса 1:10 практически все пронизывающие вековые апсидально-нодальные резонансы, связанные с прецессией орбиты Луны, являются устойчивыми, кроме резонанса $\underline{\underline{\psi}}_{18,L}$, который действует неустойчиво при наклонениях 60° и 120° . Наложений резонансов практически не прослеживается, кроме небольших точечных участков.

Анализ распределения вековых апсидально-нодальных резонансов, связанных с прецессией орбиты Солнца, показывает, что пронизывают рассмотренную область только резонанс $\dot{\psi}_{13-17,S}$ при наклонениях 0° , 90° и 180° , остальные резонансы действуют точечно.

Вековые резонансы, связанные со средним движением Луны, действуют только точечно и в основном в экваториальной зоне.

Вековые резонансы со средним движением Солнца тоже в большинстве своем проявляются на точечных участках, с наибольшей концентрацией в экваториальных зонах.

MEGNO-карта для резонанса 1:10 (рисунок 12) отличается от карт резонансов рассмотренных выше. Орбитальные резонансы здесь не влияют на хаотизацию движения, по всей видимости в этой области преобладает действие вековых резонансов.

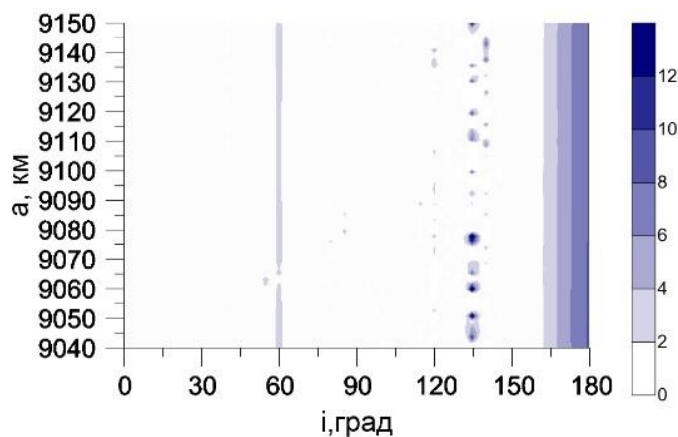


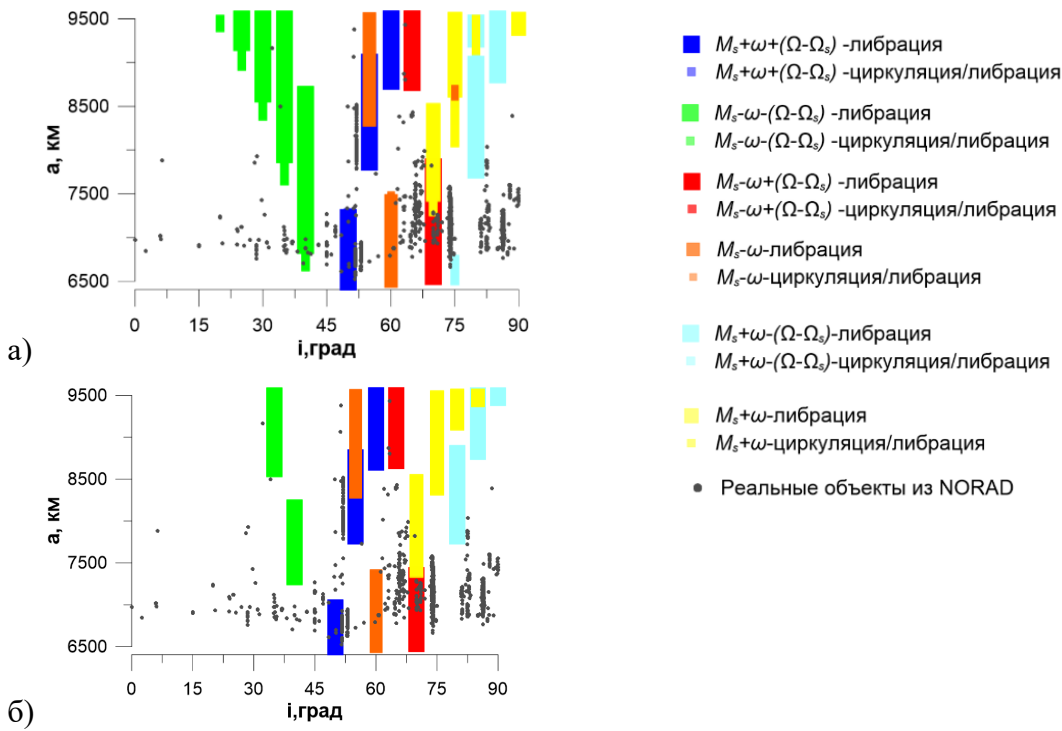
Рисунок 12 — MEGNO-карта области орбитального резонанса 1:10 со скоростью вращения Земли

Таким образом, главной особенностью динамики объектов исследуемых областей орбитального пространства низкоорбитальной зоны является совместное действие резонансов различных типов и большое обилие сочетаний действующих резонансов. Сравнивая все зоны действия орбитальных резонансов и величину зон хаотизации, можно отметить особенность: чем ниже расположена резонансная область, тем шире размах линий действия резонансов и тем больше область хаотизации.

Подраздел 3.6 связан с исследованием динамики объектов под действием светового давления и вековых резонансов. Здесь проверено и подтверждено численными методами предположение, высказанное в работе [24], что действие вековых резонансов, связанных со средним движением Солнца, усиливает влияние светового давления.

Область исследования была выбрана аналогично [24]: от 6500 км до 9500 км по большой полуоси и от 0° до 90° по наклонению. В качестве парусности была выбрана величина $1 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Первоначально была исследована структура вековых резонансов, связанных со средним движением Солнца и произведено сравнение с картой, полученной [24].



а) резонансы, полученные с учетом светового давления; б) без учета светового давления

Рисунок 13 — Карты распределения вековых резонансов, связанных со средним движением Солнца

На рисунке 13 показано распределение вековых резонансов, связанных со средним движением Солнца, с учетом светового давления и без него. Сравнивая рисунок 13а, с картой представленной [24], можно сделать вывод, что расположение и размер полос резонансов практически совпадают. На графике [24] показано, что самую широкую полосу действия имеет резонанс $\dot{M}'_s - \dot{\omega} - (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_s)$. Это же имеет место и на рисунке 13а. Кроме того, в отличие от работы указанных авторов в данной работе рассмотрены неустойчивые резонансы и резонансы более высоких порядков.

Сравнивая картину распределения резонансов при учете светового давления и без него (рисунки 13а и 13б), можно сказать, что распределения вековых резонансов, связанных со средним движением Солнца, не зависит от влияния светового давления, однако области действия ряда резонансов становятся меньше, но в целом картина на рисунке 13б близка к рисунку 13а.

Проверка усиления влияния светового давления, при действии вековых резонансов со средним движением Солнца, как и в работе [24], осуществлялась нами по нахождению взаимосвязи между действующими резонансами и амплитудой колебаний эксцентриситета.

На рисунке 14 представлена карта амплитуды колебаний эксцентриситета на интервале 3 года.

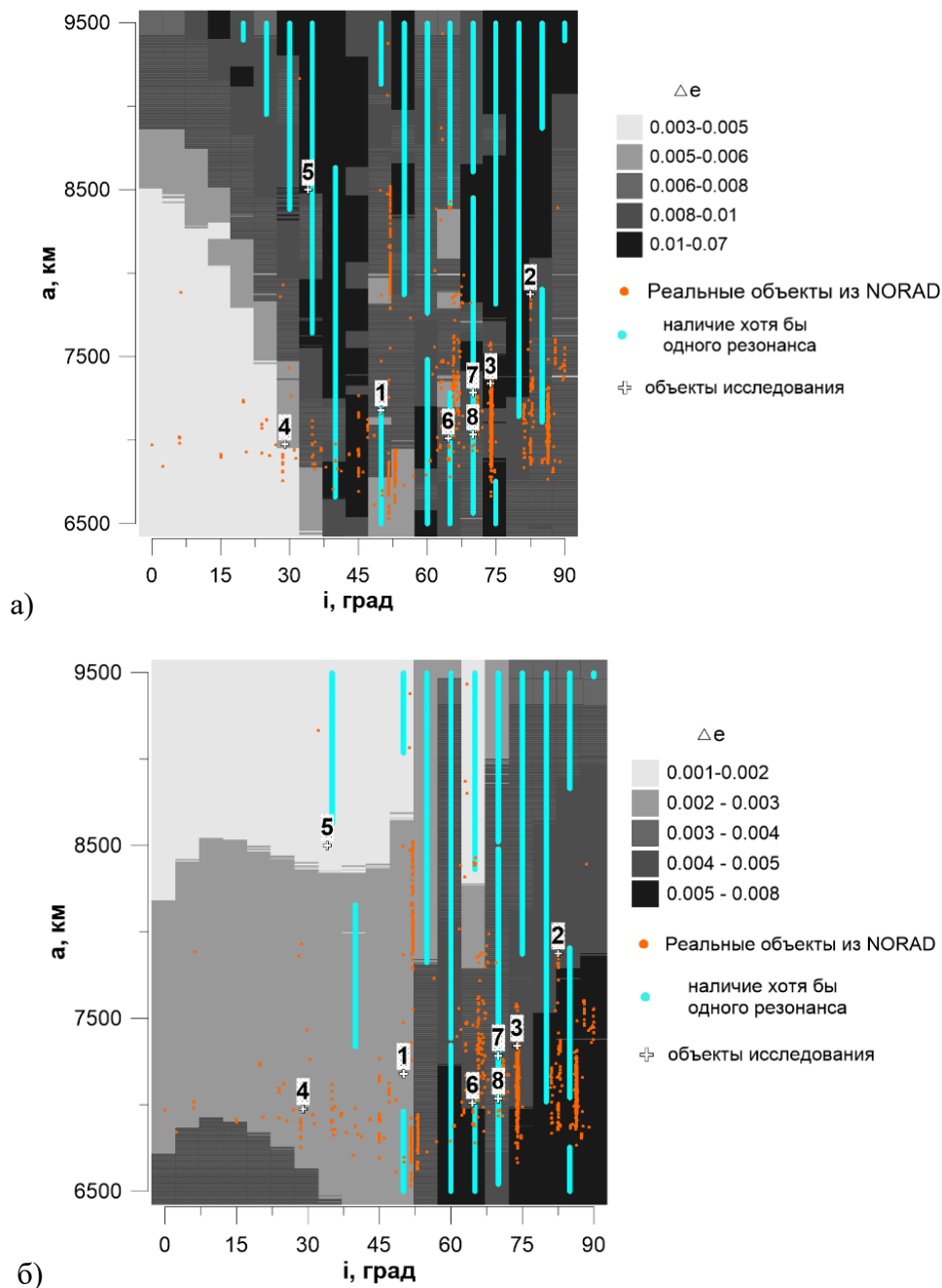


Рисунок 14 — Размер амплитуды колебаний эксцентриситета на временном интервале 3 года:
 а) с учетом светового давления; б) без учета светового давления

Чем темнее участок, тем выше значение амплитуды. Голубыми линиями обозначены места действия резонансов, со средним движением Солнца. Светлыми точками отмечены реальные объекты, орбитальная эволюция которых рассмотрена в подразделе 3.8.

Сравнивая данные, приведенные на рисунках 13а и 14а, можно заметить, что в случае учета влияния светового давления области роста амплитуды колебаний эксцентриситета совпадают с областями расположения вековых резонансов, связанных со средним движением Солнца. Картина роста амплитуды колебаний эксцентриситета практически повторяет картину расположения резонансов со средним движением Солнца (голубые линии на рисунке 14). При

отсутствии влияния светового давления наблюдается совершенно другая картина распределения амплитуд колебаний эксцентриситета, причем расположение резонансов практически не изменилось. Однако возможны и другие ситуации, когда световое давление меняет структуру резонанса.

В подразделе 3.7 обсуждаются особенности динамики объектов, движущихся вне областей орбитальных резонансов. Показано что хаотичность в движении объектов здесь является следствием наложения большого числа резонансов.

В подразделе 3.8 дан анализ динамики избранных реальных объектов из каталога NORAD, попадающих в области действия изучаемых резонансов.

Приведем пример динамики движения одного из рассмотренных объектов. Объект COSMOS 2251 DEB(35824), эволюция элементов которого представлена на рисунке 15.

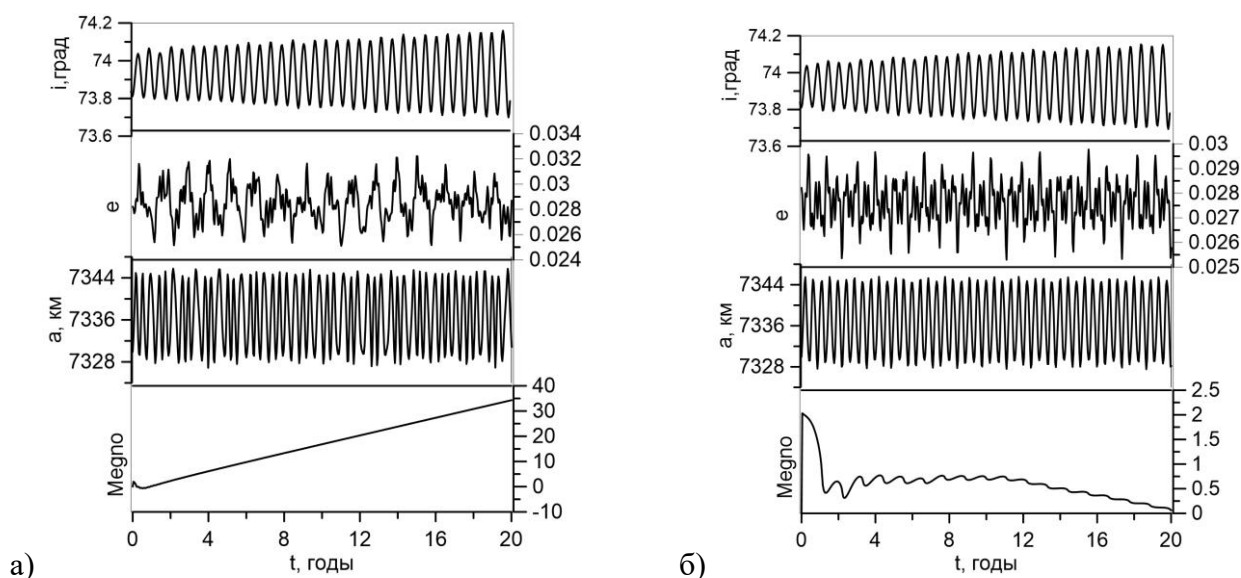
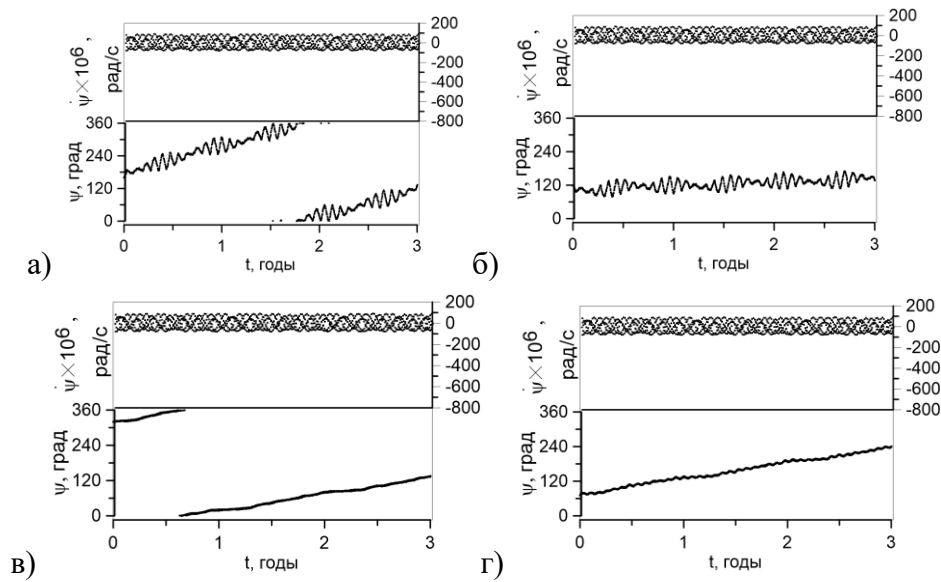


Рисунок 15 — Эволюция элементов объекта COSMOS 2251 DEB(35824): а) с учетом светового давления; б) без учета светового давления

Этот объект подвержен влиянию устойчивых резонансов, а именно: три апсидально-нодальных резонанса с прецессией орбиты Луны и три апсидально-нодальных резонанса с прецессией орбиты Солнца (рисунок 16). Эти резонансы аналогичны как для динамики в условиях действия светового давления, так и без него. Сравнение эволюции элементов орбиты объекта COSMOS 2251 DEB(35824) для случаев действия светового давления и без него (рисунок 15), показывает, что отличается только динамика параметра MEGNO. При учете светового давления, параметр MEGNO растет быстро и становится больше 2. Быстрый рост MEGNO на рисунке 15а обусловлен совместным действием светового давления и апсидально-нодальных резонансов. На остальные параметры движения объекта COSMOS 2251 DEB(35824) эти возмущения заметного влияния не оказывают.



Апсидально-нодальные резонансы, связанные с прецессией орбиты Луны: а) $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_L) - \dot{\omega} + \dot{\omega}'_L$, б) $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_L) - \dot{\omega} - \dot{\omega}'_L$, в) $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_L) - \dot{\omega}$; апсидально-нодальные резонансы, связанные с прецессией орбиты Солнца: г) $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_S) - \dot{\omega} + \dot{\omega}'_S$, $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_S) - \dot{\omega} - \dot{\omega}'_S$, $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_S) - \dot{\omega}$

Рисунок 16 — Резонансные соотношения и критические аргументы резонансов, действующих на объект COSMOS 2251 DEB(35824)

Более того, было установлено, что световое давление выявляет вековые резонансы и усиливает их действие. Причина этому, по всей видимости, кроется в средней долготе Солнца, которая, при учете светового давления, вступает в резонанс с критическим аргументом векового резонанса, связанного со средним движением Солнца. Проверка данной гипотезы представлена в работе.

В подразделе 3.9 представлены выводы, которые позволяют сделать проведенные 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 различных 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 $\underline{\underline{\psi}}_{17,S,L} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$ резонанс устойчив и для Солнца, и для Луны на всем диапазоне больших полуосей при трех значениях наклона 0° , 90° и 180° ;

– 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 со скоростью вращения Земли 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 вековых 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* перечислены основные результаты, представленные в диссертационной работе:

– Построены карты распределения вековых резонансов в области наклонений от 8000 км до 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, которое является отражением прецессии орбиты Земли;

– Обращает на себя внимание тот факт, что резонанс $\underline{\underline{\psi}}_{17,S,L} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_{S,L})$ устойчив и для Солнца, и для Луны на всем диапазоне больших полуосей при трех значениях наклона 0°, 90° и 180°. В орбитальной эволюции действие этого резонанса проявляется наличием долгопериодических колебаний в наклонении орбиты. Причем наибольшая амплитуда при одних и тех же значениях больших полуосей у объектов с наклоном орбиты 90°. Величина амплитуды растет с увеличением большой полуоси;

– 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 и введет к появлению хаоса в движении;

– В области резонансов 1:4, 1:5, 1:6, 1:7, 1:8 и 1:9 со скоростью вращения Земли 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. Действует большое количество точечных вековых резонансов, особенно в экваториальных областях. Хаос в движении наблюдается на небольших участках, при наклонениях 60° и 135° , и при обратном движении в экваториальной области. Здесь преобладает действие вековых резонансов, наличие орбитальных резонансов не приводит к хаосу;

– Картина роста эксцентриситета практически повторяет картину действующих резонансов со средним движением Солнца в случаях, когда действует световое давление. Без влияния светового давления карта резонансов и амплитуды эксцентриситета отличаются друг от друга. Исходя из этого, можно сделать вывод, что совместное действие светового давления и резонансов со средним движением Солнца действительно могут способствовать росту амплитуды эксцентриситета;

– Рассматриваемая область обильно заселена различными спутниками и космическим мусором, поэтому все наблюдаемые объекты были нанесены на карты, представленные в данной работе. Положение реальных объектов было взято из каталога NORAD. Кроме того, было произведено исследование динамики восьми реальных объектов и результаты анализа представлены в работе. Из полученных данных можно сделать вывод, что наличие резонансов со средним движением Солнца ведет к росту амплитуды колебаний эксцентриситета, даже если световое давление не действует. Световое давление только усиливает этот рост. Кроме того, световое давление способствует более раннему проявлению действия вековых резонансов. А совместное действие этих двух факторов ведет к 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. Амплитуды колебаний других элементов существенно не изменяются в этом случае.

Список цитируемых источников

1. Morando M. B. Orbites de Resonance des Satellites de 24h// Bull. Astron. 1963. V.24. pp. 47.
2. Allan R.R. Resonance effects due to the longitude dependence of the gravitational field of a rotating primary// Planetary and Space Science. 1967a, V.15. pp. 53–76
3. Allan R.R. Satellites resonance with the longitude dependent gravity. II. Effects involving the eccentricity// Planetary and Space Science. 1967b, V.15. pp. 1829–1845
4. Blitzer L. Synchronous and Resonant Satellite Orbits Associated with Equatorial Ellipticity// ARS Journal. 1963. V.32. pp.1016-1019
5. Garfinkel B. Formal Solution in the Problem of Small Divisors// Astron. Journal. 1966. V.71. pp.657-669
6. Gedeon G. S., Dial O. L. Along-track Oscillations of a Satellite due to Tesseral Harmonics// AIAA Journal 1967. V.5. 593-595
7. Лидов М.Л. Эволюция искусственных спутников планет под действием гравитационных возмущений от внешнего тела // Искусственные спутники Земли. 1961. Т.8. С. 5– 45.
8. Cook G.E. Luni-Solar Perturbations of the Orbit of an Earth Satellite // Geophys. J. 1962. V.6. № 3. P. 271 – 291.
9. Кузнецов Э.Д., Захарова П.Е., Гламазда Д.В., Шагабутдинов А.И., Кудрявцев С.О. О влиянии светового давления на орбитальную эволюцию объектов, движущихся в окрестности резонансов низких порядков // Астрон. вест. 2012. Т. 46. № 6. С. 480 - 488
10. Томилова И. В., Блинкова Е.В., Бордовицына Т. В. Особенности динамики объектов, движущихся в окрестности резонанса 1:3 с вращением Земли // Астрон. вест, 2019. Т 53. №5. С. 323–338 DOI: 10.1134/S0320930X19050074
11. Valk S., Delsate N., Lemaître A., Carletti T., Global dynamics of high area-to-mass ratios GEO space debris by means of the MEGNO indicator // Adv. Space Res. 2009. V. 43. P. 1509 – 1526.
12. Cincotta P.M., Simó C. Simple tools to study global dynamics in non-axisymmetric galactic potentials – I // Astronomy and Astrophysics Supplement. 2000. V. 147. P. 205–228.
13. Cincotta P.M., Girdano C.M., Simo C., Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits // Physica D. 2003. V. 182. P. 151 – 178.
14. Бордовицына Т.В., Александрова А.Г., Чувашов И.Н. Комплекс алгоритмов и программ для исследования хаотичности в динамике искусственных спутников Земли // Изв. вузов. Физика. 2010. № 8/2. С. 14 – 21.
15. Александрова А.Г. Исследование долговременной орбитальной эволюции объектов космического мусора геостационарной зоны: дис. ... канд. физ.-мат. наук 01.03.01 / Александрова А.Г. – СПб., 2012. – 117 с.

16. Rosengren A.J., Alessi E.M., Rossi A., Valsecchi G.B. Chaos in navigation satellite orbits caused by the perturbed motion// MNRAS. 2015. Vol. 449, Is. 4. P. 3522–3526.
17. Daquin J. et al The dynamical structure of the MEO region: long-term stability, chaos, and transport // Celest Mech Dyn Astr. Published online 02 January 2016.
18. Томилова И. В., Красавин Д. С., Бордовицына Т. В. Динамическая структура околоземного орбитального пространства в области резонанса 1:2 со скоростью вращения Земли // Астрон. вест, 2020. Т 54. № 4. С. 337–348.
19. Celletti. A., Gales C., Lhotka Ch. (INVITED) Resonances in the Earth's space environment//Commun Nonlinear Sci Numer Simul. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2020.105185>
20. Breiter S. Lunisolar apsidal resonances at lowsatellite orbits //Celest. Mech. Dyn. Astr. 1999. V. 74. P. 253–274.
21. Breiter S. The prograde C7 resonance for Earth and Mars satellite orbits // Celest. Mech. Dyn. Astr. 2000. V. 77. P. 201–214.
22. Breiter S. On the coupling of lunisolar resonances for Earth satellite orbits // Celest. Mech. Dyn. Astr. 2001a. V. 80. P. 1–20.
23. Breiter S. Lunisolar resonances revisited // Celest. Mech. Dyn. Astr. 2001b. V. 81. P. 81–91.
24. Alessi E.M., Schettino G., Rossi A., Valsecchi G.B. Solar radiation pressure resonances in Low Earth Orbits// MNRAS. 2018. V. 473. P. 2407–2414
25. Belkin S.O., E.D. Kuznetsov Orbital flips due to solar radiation pressure for space debris in near-circular orbits// Acta Astronautica 2021. 178/ P. 360–369
26. Александрова А.Г., Авдюшев В.А., Попандопуло Н.А., Бордовицына Т.В. Численное моделирование движения околоземных объектов в среде параллельных вычислений// Изв. вузов. Физика. 2021. Т. 64. № 8. С. 168–175.
27. Бордовицына Т.В., Томилова И.В., Чувашов И.Н. Вековые резонансы как источник возникновения динамической хаотичности в долговременной орбитальной эволюции неуправляемых объектов спутниковых радионавигационных систем // Астрон. вестн. 2014. Т.48, № 4. С. 280 – 289.
28. Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Попандопуло Н.А., Томилова И.В. Новый подход к вычислению вековых частот в динамике околоземных объектов на орбитах с большими эксцентриситетами// Изв. вузов. Физика. 2020. Т. 63. № 1. С. 57–62.
29. Авдюшев В.А. Новый коллокационный интегратор для решения задач динамики. I. Теоретические основы // Изв. вузов. Физика. 2020. Т. 63. №. 11. С. 131–140