

Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2021 г. по 30.06.2022 г.

по проекту «**Исследование сложных задач динамики околоземных объектов методами компьютерного моделирования и машинного анализа данных**»,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 19-72-10022

Руководитель: канд. физ.-мат. наук Александрова Анна Геннадьевна

Исследование динамической структуры околоземного и окололунного орбитальных пространств является весьма актуальной задачей, поскольку знание динамических особенностей различных областей космического пространства необходимо и при разработке новых спутниковых систем, и при определении областей захоронения отработавших объектов.

В рамках настоящего проекта было проведено исследование динамической структуры околоземного космического пространства (ОЗКП), начиная от 8000 км по большой полуоси и до сферы действия Луны, а также окололунного космического пространства (ОЛКП) от 1911.8 км до 26070 км по большой полуоси. В обоих случаях наклонения варьировались от 0 до 180 град.

Моделирование орбитальной эволюции объектов данных областей проводилось при помощи усовершенствованного и разработанного в ходе выполнения предыдущих этапов проекта программного обеспечения: численных моделей движения систем ИСЗ и ИСЛ, а также с помощью методов машинного анализа, в том числе обученной искусственной нейронной сети.

Были построены карты распределения вековых апсидально-нодальных резонансов, связанных с Луной и с Солнцем в ОЗКП и с Землей и Солнцем в ОЛКП.

Анализ орбитальной эволюции всей совокупности рассмотренных объектов (более 100 тыс.) и карт резонансов позволил сделать ряд общих выводов о характере движения объектов изучаемых областей. Значительная часть объектов имеет малое время жизни, что связано с ростом эксцентриситетов орбит. Большой и быстрый рост эксцентриситета и малое время жизни имеют все приполярные объекты, орбиты которых имеют наклонение к экватору, близкое к 90 град. Это объясняется действием вековых резонансов и справедливо и для ОЗКП, и для ОЛКП. Все устойчивые апсидально-нодальные резонансы, содержащие скорость изменения долготы перицентра, группируются в диапазоне наклонений 60–120 град.

В ОЗКП устойчивые нодальные резонансы, содержащие скорость изменения долготы восходящего узла, группируются в окрестности трех наклонений 0, 90 и 180 град., причем большая часть в окрестности 90 град. В ОЛКП данный тип резонансов в основном сосредоточен в диапазоне от 70 до 110 град. по наклонению. Наложение большого количества апсидально-нодальных резонансов приводит к стремительному росту эксцентриситетов орбит объектов, вследствие чего объекты

прекращают свое существование либо сталкиваясь с Землей/Луной, либо уходя из сферы их тяготения.

Резонансы, связанные со средним движением возмущающих тел Луны и Солнца, появляются только в нижней части рассматриваемой области ОЗКП. Вековые резонансы со средним движением Солнца распределены в диапазоне больших полуосей от 8000 км до 21000 км по обе стороны от наклона 90 град., 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. Резонансы, связанные со средним движением возмущающих тел Земли и Солнца (2-5 порядка) в ОЛКП не обнаружены.

Помимо влияния резонансов на движение ИСЗ и ИСЛ действуют и иные факторы, приводящие к уменьшению времени жизни. Так в ОЗКП, начиная с больших полуосей, равных 235000 км, значительная часть объектов имеет малое время жизни для большинства наклонов, а для больших полуосей, превосходящих 275000 км, все объекты имеют быстро растущие эксцентриситеты и малое время жизни независимо от наклона. Это связано с прямым действием Луны, причем влияние Луны тем больше, чем ближе орбита объекта к экватору. В ОЛКП при рассмотрении динамики низколетящих ИСЛ исследования показали, что главным источником роста эксцентриситета на низких орбитах следует считать прямое действие сложного гравитационного поля Луны.

С использованием для ИСЗ идей, предложенных Т. Галардо (2006) для астероидов, была получена сравнительная оценка сил всех действующих в этом пространстве орбитальных резонансов. Эта оценка показала, что чем ниже объект, тем сила резонанса больше и наоборот, чем он выше, тем сила меньше.

Анализ всей совокупности полученных данных позволяет сделать вывод, что на действие практически всех устойчивых компонент орбитального резонанса налагаются действия либо неустойчивых компоненты этого же резонанса, либо вековой резонанс, что приводит к хаотичности. Причем зоны усиления хаотичности совпадают с наложением вековых резонансов.

В рамках данного этапа проведено также исследование динамических структур ОЗКП и ОЛКП с учетом влияния светового давления (СД) для различных значений парусности (отношением площади миделева сечения к массе). Параметры численного моделирования и способ распределения объектов аналогичен эксперименту, проведенному без СД.

Сопоставление карт резонансов, построенных без учета СД, и с учетом СД показывает, что в большинстве случаев резонансные зоны сохраняются, хотя для ряда резонансов при росте парусности зоны могут, как становиться шире, так и совсем исчезать. Кроме того возрастание величины парусности приводит к увеличению скорости роста эксцентриситетов орбит и, как следствие, к уменьшению времени жизни.

Исследование резонансных движений астероидов, сближающихся с Землей, является одной из важных задач на пути к решению проблемы астероидной

опасности. Поскольку устойчивый орбитальный резонанс может служить защитным механизмом от тесных сближений с планетами, а неустойчивый повышает риск сближения астероида с планетой, что в свою очередь может привести к значительным изменениям элементов орбит объектов и возможным сближениям с Землей. Особенно актуально исследование резонансов средних движений для астероидов, имеющих малые перигелийные расстояния, так как орбиты этих объектов имеют вытянутую форму и потенциально способны взаимодействовать с большинством планет Солнечной системы.

В процессе исследования выявлены все астероиды с малыми перигелийными расстояниями, движущиеся в окрестности устойчивых и неустойчивых резонансов средних движений с большими планетами. Так как эффект Ярковского (ЭЯ) может оказывать существенное влияние на движение этих астероидов при прохождении их вблизи Солнца, рассмотрено влияние эффекта на поведение резонансных характеристик со временем. СД также может менять значение большой полуоси, поэтому отдельно было исследовано его влияние на резонансные характеристики.

Оценено влияние ЭЯ на резонансные характеристики: резонансную щель и критический аргумент. Результаты исследования показали, что влияние ЭЯ на устойчивые резонансные соотношения незначительно: оно может несущественно менять амплитуду либрации, но не приводит к разрушению резонанса. В случае же неустойчивого резонанса изменяется число проходов через точную соизмеримость, а для некоторых объектов резонанс становится даже более устойчивым.

Оценка влияния СД на поведение характеристик орбитального резонанса астероидов показала, что СД меньше влияет на движение изучаемых астероидов, чем ЭЯ, особенно при диаметре больше 1 км. Для устойчивого резонанса влияние первого имеет сходный характер с влиянием ЭЯ, а при неустойчивом резонансе учет СД приводит к изменению числа прохождений через точную соизмеримость, в некоторых случаях частично разрушая участки устойчивого резонансного движения или наоборот увеличивая интервалы резонансного движения.

Проведено подробное исследование орбитальной эволюции астероидов 137924 2000 BD19 и 394130 2006 HY51 без учета ЭЯ и СД и отдельно с каждым из них. Результаты исследования показали, что учет СД и ЭЯ практически не оказывает влияния на эволюцию орбитальных элементов обоих астероидов, лишь незначительно изменяя поведение большой полуоси. Такой результат влияния отражается на взаимном расположении астероидов и планет в процессе эволюции и приводит к изменению количества сближений с большими планетами. Так как исследуемые возмущения не оказывают влияния на долготу восходящего узла и аргумент перицентра орбит астероидов, на основе которых вычисляются характеристики вековых резонансов, изменений в поведении вековых резонансов выявлено не было.

Эволюция параметра OMEGNO с учетом ЭЯ и СД показала, что данные возмущения не влияют на интервал предсказуемости движения астероидов 137924 2000 BD19 и 394130 2006 HY51.