

Сведения о выполненных работах  
в период с 01.07.2020 г. по 30.06.2021 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

В течение второго этапа работы по проекту проведено исследование области околоземного космического пространства (ОКП) вплоть до сферы действия Луны по отношению к Земле (от 35000 до 315000 км по большой полуоси). Подробно изучена резонансная структура данного околоземного космического пространства.

Показано, что значительная часть объектов рассматриваемой области имеет малое время жизни, что вполне объясняется 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 градусам. Начиная с больших полуосей, равных 235000 км, значительная часть объектов имеет малое время жизни для большинства наклонений, а для больших полуосей, превосходящих 275000 км, все объекты имеют быстро растущие эксцентриситеты и малое время жизни независимо от наклонения. Это связано с прямым действием Луны, причем влияние Луны тем больше, чем ближе орбита объекта к экватору. Характер эволюции объектов, не подверженных прямому действию Луны, объясняется действием многочисленных вековых резонансов, как устойчивых, так и неустойчивых.

Были построены карты распределения вековых апсидально-нодальных резонансов, связанных с Луной и с Солнцем в рассматриваемой области ОКП. Данные карты, а также, составленные на их основе карты наложений резонансов различных типов для Луны и для Солнца были получены с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС).

Анализ всех построенных карт позволил сделать следующие выводы: все устойчивые апсидально-нодальные резонансы, содержащие скорость изменения долготы перицентра, группируются в диапазоне наклонений 60–120 градусов, а устойчивые нодальные резонансы, содержащие скорость изменения долготы восходящего узла, группируются в окрестности трех наклонений 0, 90 и 180 градусов, причем большая часть в окрестности 90 градусов. Это объясняет, почему все объекты приполярной области имеют быстро растущий эксцентриситет и малое время жизни.

Для выявления в данной области ОКП отличительных особенностей в движении околоземных объектов в областях, подверженных влиянию орбитальных резонансов, и вне их действия рассмотрены несколько областей орбитальных резонансов. Ранее при исследовании областей действия орбитальных резонансов низких порядков мы приходили к выводу, что области хаотичности движения определяются наложением

прежде всего устойчивых и неустойчивых компонент орбитального резонанса, а наложение вековых резонансов только усиливает хаотизацию. Однако при рассмотрении областей резонансов высоких порядков, например 2:1 со скоростью вращения Земли, мы увидели ситуация прямо противоположную той, которую мы наблюдаем в области орбитальных резонансов низких порядков. Сопоставляя данные по всем видам резонансов, действующих в области резонанса 2:1 со скоростью вращения Земли, мы обнаружили, что орбитальный резонанс проявляется лишь незначительным ростом хаотичности движения объектов, попадающих в этот резонанс, в то время как основным фактором оказывающим влияние на орбитальную эволюцию являются вековые резонансы. Таким образом, в данной части ОКП динамика области, содержащей орбитальные резонансы высоких порядков, мало чем отличается по своим особенностям от областей, не содержащих данных резонансов.

Разработана усовершенствованная за счет уточнения модели сил и использования более эффективного интегратора численная модель движения искусственных спутников Луны. Кроме того численная модель была дополнена возможностью вычисления осредненного параметра MEGNO, позволяющего судить о хаотичности движения космических объектов. Модель реализована в двух версиях: для персонального компьютера и в среде параллельных вычислений на кластере «СКИФ Cyberia» Томского Государственного Университета. Проведено всестороннее тестирование модели, которое подтвердило ее высокую точность.

Проведено тестирование системы автоматической обработки данных с использованием искусственной нейронной сети путем подбора размеченных данных по окололунным объектам. Тестирование показало, что для корректного распознавания наличия или отсутствия резонанса, необходимо помимо временных рядов, связанных с критическим аргументом, рассматривать в качестве сигналов еще два временных ряда, связанных с изменением эксцентриситета и наклона орбиты.

С применением разработанного программного обеспечения выполнен анализ влияния структуры селенопотенциала на движения окололунных объектов, который показал, что причиной роста эксцентриситета на низких орбитах является прямое действие селенопотенциала.

Проведен анализ резонансной структуры окололунного орбитального пространства. По результатам исследования составлены карты действия на окололунные объекты вековых апсидально-нодальных резонансов 1-4 порядков и полuveковых резонансов 2-5 порядков со средними движениями возмущающих тел Земли и Солнца. Показано, что главной причиной роста эксцентриситета и значительного сокращения времени жизни на орбите для объектов на средних и больших высотах следует считать влияние на орбитальную динамику ИСЛ векового резонанса типа Лидова–Козаи и близких к нему по типу резонансов.

Полuveковые резонансы со средними движениями Земли и Солнца локализованы в средних и верхних областях окололунного орбитального пространства, начиная с большой полуоси в 6000 км. Действие этих резонансов имеет неустойчивый характер, в изменении резонансных аргументов прослеживается

перманентный переход от либрации к циркуляции и обратно. Поэтому значительного воздействия на орбитальную эволюцию они не оказывают.

Класс астероидов, имеющих малые перигелийные расстояния (менее 0.15 а.е.), представляет большой интерес для ученых с точки зрения возможной опасности для Земли, исходящей от этих объектов. На динамику астероидов при прохождении их вблизи Солнца могут оказывать существенное влияние негравитационные возмущающие факторы, такие, как эффект Ярковского и световое давление. Не учет этих возмущений в модели сил в ряде случаев может привести к недостоверному прогнозу движения, в том числе к ошибочным оценкам вероятности столкновения. Основная проблема учета этих возмущений заключается в том, что для большинства астероидов в настоящее время плохо известны физические свойства, необходимые для определения параметров эффекта Ярковского и светового давления. В данной ситуации одним из способов определения параметров является метод получения их из наблюдений астероидов.

В ходе выполнения второго этапа проекта с использованием модифицированного программного комплекса «ИДА» были получены параметры эффекта Ярковского  $A_2$ , светового давления  $k_s$  и их среднеквадратические ошибки для всех астероидов с малыми перигелийными расстояниями. По данным центра малых планет на январь 2021 года известно 50 таких астероидов. В процессе улучшения их орбит параметры  $A_2$  и  $k_s$  включались в число оцениваемых, наряду с координатами и компонентами скорости. Наблюдения были взяты с сайта центра малых планет.

Оценка точности определения параметра светового давления  $k_s$  показала, что, для большинства астероидов среднеквадратическая ошибка  $k_s$  совпадает по порядку с самим значением, а для 8 недавно открытых астероидов порядок ошибки превышает таковой для  $k_s$ . Только для 3200 Phaethon погрешность на порядок меньше значения параметра. На примере астероидов с известными физическими параметрами (3200 Phaethon, 137924 2000 BD19, 276033 2002 AJ129, 386454 2008 XM, 394130 2006 HY51, 394392 2007 EP88) показано, что использование улучшенного значения  $k_s$  несущественно влияет на значение среднеквадратической ошибки представления наблюдений, что, по-видимому, обусловлено малым влиянием светового давления на движение изучаемых астероидов. Оценка влияния светового давления на движение этих объектов позволила сделать вывод, что световое давление влияет меньше, чем сжатие Солнца и релятивистские эффекты от Солнца.

Полученные значения параметра эффекта Ярковского и его среднеквадратической ошибки для астероидов с малыми перигелийными расстояниями позволили сделать следующие выводы. Подобно коэффициенту светового давления  $k_s$  значения параметра  $A_2$  и его среднеквадратической ошибки для большинства объектов имеют один порядок. Анализ результатов определения параметра  $A_2$  для исследуемых астероидов показал, что с увеличением наблюдательного интервала точность определяемого параметра значительно улучшается. Данный вывод подтвердился и в случае с экспериментами с модельными

и реальными наблюдениями: на примере астероидов 3200 Phaethon и 137924 2000 BD19 был проведен эксперимент по уменьшению числа реальных наблюдений от настоящего времени в прошлое, а на примере астероидов 2008 MG1 и 2020 BU13 – эксперимент по увеличению мерного интервала путем использования модельных наблюдений. Однако для каждого астероида есть предельный мерный интервал, при достижении которого точность определения параметра перестает улучшаться. Также анализ результатов показал, для объектов с длиной мерного интервала меньше 30 суток определение значения параметра эффекта Ярковского из наблюдений является недостаточно надежным и для его применения стоит дожидаться новых наблюдений астероидов.

С использованием программного комплекса «ИДА» построена вероятностная орбитальная эволюция астероидов 3200 Phaethon и 2007 PR10 с учетом эффекта Ярковского и без него. Для обоих астероидов выявлены многократные и тесные сближения с Меркурием, Венерой, Землей и Марсом и получена оценка хаотичности их орбит с помощью параметра OMEGNO (Orthogonal Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbit). Учет эффекта Ярковского в обоих случаях привел к значительным изменениям в эволюции большой полуоси, что отразилось на количестве сближений астероидов с планетами и расстоянии до них. Вероятностные области движения астероидов в результате таких изменений ведут себя по-разному без учета эффекта и с ним. Поиск резонансов в движении астероидов показал, что 3200 Phaethon движется в окрестности орбитального резонанса  $3/7$  с Венерой, и без учета эффекта Ярковского астероид дольше находится в резонансе с планетой, что говорит о необходимости его учета для более правильной картины. Резонансов в динамике астероида 2007 PR10 выявлено не было.