

Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2022 г. по 30.06.2023 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

С момента запуска первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) прошло 65 лет, и за это время на околоземные орбиты было выведено 15430 объектов, из которых 10290 все еще находятся в космосе, и только 7600 аппаратов являются функционирующими. Произошло более 640 фрагментаций околоземных объектов, что значительно увеличило число наблюдаемых единиц космического мусора. На данный момент на регулярной основе отслеживается порядка 33 тыс. околоземных космических объектов искусственного происхождения. Освоение космического пространства продолжается, и оно становится технически сильно загруженным. В связи с этим исследование его динамической структуры и поиск орбит, пригодных для захоронения отслуживших свой срок аппаратов (полной утилизации или долговременного стабильного размещения), являются весьма актуальными задачами, что и было сделано в рамках настоящего проекта РНФ.

В рамках текущего этапа проекта также было проведено исследование динамики каталогизированного космического мусора с целью поиска областей, имеющих наибольшую степень замусоривания. Показано, что максимальная плотность распределения объектов характерна для трех областей околоземного пространства: низкоорбитальные ИСЗ (большая полуось до 8 тыс. км), в области размещения навигационных спутников (большая полуось около 26 тыс. км плюс-минус 3 тыс. км), в геостационарной области (большая полуось равна 42164 км плюс-минус 150 км) и ее окрестности (42164 км плюс-минус 2 тыс. км). И, если в области низкоорбитального космического пространства существует естественный механизм самоочистки (атмосфера Земли), то для средневысокой и высокой областей поиск орбит утилизации – более сложная задача. Как показали результаты исследования, для высоких орбит существует зона с естественным механизмом самоочистки в области приполярных орбит, в этой зоне спутники падают на Землю за счет наложения влияний вековых резонансов. Однако перевод спутников после отработки в эту зону оптимален только для ИСЗ с наклонениями и так близкими к приполярным, поскольку изменение наклонения весьма энергозатратно. На основе проведенного анализа резонансной структуры околоземного пространства выработаны критерии пригодности зон для утилизации и паркинга. Был составлен набор зон, удовлетворяющих данным критериям. Проведено исследование методами компьютерного моделирования долговременной орбитальной эволюции объектов, размещенных в выбранных в соответствии с данными критериями зонах, с целью обоснования выбора зон утилизации. Поиск общих свойств зон, пригодных к

утилизации или паркингу, показал, что общим является только отсутствие или минимизация пересечений с орбитами других объектов.

Исследования проводились с помощью программного обеспечения, разработанного и усовершенствованного в ходе выполнения проекта, включая текущий этап. Так была проведена адаптация программы для машинного анализа резонансной структуры с использованием ИНС (искусственных нейронных сетей) под последнюю комбинированную методику выявления резонансов (для почти круговых орбит и орбит с большими эксцентриситетами необходимо применять различные методики). Программа-классификатор с ИНС служит для выявления наличия резонанса и определения его типа (устойчивый/неустойчивый). Разработан интерфейс для «Численной модели движения ИСЗ», предназначенной для прогноза движения ИСЗ, в том числе высокоточного, и исследования устойчивости движения спутников. Ранее все управление программой осуществлялось с помощью входного файла, что нередко служило причиной случайного неверного заполнения входных данных. Поэтому такой способ управления был неудобным для взаимодействия с «Численной моделью движения ИСЗ».

Помимо исследования динамики космического мусора и связанных с этим задач, не теряют свою актуальность и исследования в области динамики астероидов, сближающихся с Землей.

На примере астероидов с разными эксцентриситетами, в том числе на объектах с малыми перигелийными расстояниями представлено исследование эффективности интегратора Lobbie по сравнению с интегратором Гаусса-Эверхарта. Показано, что при решении задачи двух тел (возмущенной и невозмущенной) при использовании смешанных систем уравнений интегратор Lobbie имеет более высокую эффективность. В случае решения возмущенной задачи двух тел эффективность интегратора Lobbie по сравнению с интегратором Гаусса-Эверхарта не так значительна, но тем не менее применение интегратора Lobbie позволяет расширить интервал интегрирования для исследования резонансного поведения некоторых объектов. Проведенное исследование эффективности использования сглаженных эфемерид больших планет показало, что в случае их применения наблюдается лишь незначительное увеличение эффективности.

При построении орбитальной эволюции астероидов с малыми перигелийными расстояниями применение интегратора Lobbie позволило увеличить интервал исследования, что особенно важно при рассмотрении резонансных взаимодействий астероидов с большими планетами. С использованием нового интегратора на расширенном интервале времени 4000 лет был получен обновленный перечень астероидов, движущихся в окрестности орбитальных резонансов с планетами. Показано, что среди 60 астероидов с малыми перигелийными расстояниями, известных на момент исследования, 33 движутся в окрестности орбитальных резонансов с одной или несколькими планетами одновременно. Всего выявлено 50 соизмеримостей, 16 из которых являются устойчивыми.

Детально исследована резонансная динамика астероидов 3200 Phaethon, 137924 2000 BD19, 394130 2006 HY51, 431760 2008 HE, 2011 KE, 2013 YC и получены оценки влияния эффекта Ярковского (ЭЯ) и светового давления (СД) на поведение характеристик выявленных резонансов с большими планетами. Влияние СД получилось оценить лишь для трех астероидов (Phaethon, 2000 BD19 и 2006 HY51), так как только для них известны такие физические параметры, как масса, диаметр и альбедо.

Увеличение интервала исследования существенно повлияло на анализ резонансного взаимодействия $3/7$ Phaethon и $3/4$ 2000 BD19 с Венерой. Анализ результатов показал, что световое давление практически не влияет на характер резонанса, в то время как эффект Ярковского приводит к разрушению устойчивых участков для 2000 BD19 и появлению новых для Phaethon. Резонансное поведение астероидов 2008 HE, 2011 KE и 2013 YC на расширенном интервале времени осталось практически неизменным, а влияние ЭЯ оказалось незначительным.

Исследование хаотичности движения проводилось с помощью параметра OMEGNO (Orthogonal Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbits). Результаты показали, что использование различных моделей сил (с учетом или без учета ЭЯ и СД) практически не влияет на время предсказуемости движения. Однако применение нового интегратора позволяет сократить время интегрирования смешанных уравнений.