

Сведения о выполненных работах
в период с 01.07.2019 г. по 30.06.2020 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

Околоземное космическое пространство (ОКП) все интенсивнее используется в интересах хозяйственной деятельности Человечества. Создаются и разворачиваются в космосе все новые и новые спутниковые системы. Отработавшие объекты этих систем, как правило, остаются на околоземных орбитах и превращаются в космический мусор. В настоящее время в околоземном пространстве по оценкам Европейского космического агентства находится свыше 30 тысяч объектов космического мусора размером более 10 см, порядка 900 тысяч объектов размером в диапазоне от 1 до 10 см, порядка 128 миллионов – около 1 мм и это число постоянно увеличивается. На орбитальную динамику этих объектов оказывают влияние множество различных факторов, которые способны значительно изменять как положение орбиты в пространстве, так и саму орбиту. К таким факторам относятся вековые и орбитальные резонансы. Знание резонансной структуры орбитального пространства позволяет с большой достоверностью прогнозировать возможные катастрофические события, оптимизировать выбор областей для размещения новых спутниковых систем и паркинга отработавших объектов.

Исследование динамической структуры околоземного орбитального пространства требует проведения обширных численных экспериментов, сопровождаемых анализом больших объемов данных. В связи с этим важными задачами проекта являются внедрение автоматизации выполнения ряда этапов исследований, требующих большой обработки данных, в том числе с помощью методов машинного обучения и искусственных нейронных сетей (ИНС), а также разработка и усовершенствование методик и программного обеспечения для исследования динамики околоземных объектов искусственного происхождения. Что и было осуществлено в первую очередь в ходе выполнения первого этапа проекта в соответствии с календарным планом.

В ходе выполнения первого этапа проекта были проведены исследования различных методов применения ИНС для выявления наличия резонансов в ОКП и определения их типа (устойчивые/неустойчивые). В результате была получена обученная ИНС, которая показала точность 99.3% при определении наличия резонанса и его классификации. Был применен алгоритм автоматической кластеризации данных HDBSCAN, который позволил быстро локализовать объекты, демонстрирующие нетипичную и интересную динамику. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение для выявления эффекта Лидова–Козаи и автоматизирован отбор объектов с хаотической динамикой по параметру MEGNO.

Проведена модификация программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ», реализованного на кластере «СКИФ Cyberia» Томского государственного университета. Производительность программного комплекса повышена благодаря замене интегратора на новый и более эффективный интегратор, разработанный в НИИ ПММ ТГУ, и смене алгоритма распараллеливания. Данная модификация численной модели позволила повысить быстродействие расчетов почти в 3 раза при сохранении точности вычислений.

К важным результатам первого этапа по выполнению проекта можно отнести модификацию методики выявления и исследования вековых резонансов в динамике околоземных объектов. Особенность методики в том, что в отличие от традиционно используемых приближенных аналитических методик все частоты в движении спутника, возникающие под действием возмущающих факторов, определяются численно по точным формулам. Такой подход дает более достоверные результаты, чем чисто аналитическая методика при исследовании резонансной структуры движения по орбитам с большим или быстро растущим эксцентриситетом.

С помощью разработанного и модифицированного в ходе выполнения проекта программного обеспечения, в том числе с использованием ИНС, построены карты динамической структуры зон низкоорбитальной части ОКП (где уже не так сильно действие атмосферы, и имеет смысл рассматривать влияние вековых резонансов) и части зоны среднеорбитального пространства до 25500 км по большой полуоси (до зоны функционирования системы ГЛОНАСС). Выявлены области, где на движение объектов оказывают влияние только вековые резонансы. Было показано, что особенности орбитальной эволюции объектов в зоне, не содержащей орбитальных резонансов, определяются, прежде всего, действием вековых апсидально-нодальных резонансов первого порядка: апсидального резонанса Лидова–Козаи и нодального резонанса, связывающего скорости изменения долгот восходящего узла спутника и возмущающих тел. Выявлено, что нодальный резонанс первого порядка проходит через всю рассматриваемую область и проявляет устойчивость при наклонениях 0, 90 и 180 градусов. Результаты исследования показали, что в рассмотренной области орбитального пространства впервые становится заметным действие механизма Лидова–Козаи. Особенности его влияния на динамику объектов зависят от взаимодействия этого механизма с влиянием сжатия Земли. Выявлено, что механизм Лидова–Козаи начинает проявляться на орбитах с большими полуосями около 10000 км и затем проявляется во всех областях зоны МЕО.

Кроме того, показано, что совместное действие нескольких вековых резонансов встречается нечасто в динамике объектов рассматриваемой зоны. Наложение нескольких устойчивых вековых резонансов разных типов не приводит к возникновению хаотичности в движении объектов, а при совместном действии устойчивых и неустойчивых вековых резонансов наблюдается рост хаотичности движения.

Проведено сопоставление особенностей эволюции объектов нерезонансной зоны (не содержащей орбитальных резонансов) с эволюцией объектов, движущихся в зонах орбитального резонанса. Выявлено, что движение в резонансных зонах отличается большей хаотичностью. Если в нерезонансной зоне явление хаотичности движения наблюдается редко, то для резонансных зон оно является характерным свойством. Причем, определяющим фактором в возникновении хаотичности в движении объектов является наличие в динамике неустойчивых компонент орбитального резонанса. Вклад вековых резонансов в возникновение хаотичности в резонансных зонах второстепенен, однако они оказывают влияние на орбитальную эволюцию, которое проявляется ростом амплитуд долгопериодических колебаний позиционных переменных. Это относится, прежде всего, к вековым резонансам первого порядка, о которых говорилось выше.

Наряду с космическим мусором опасность для Земли могут представлять и объекты естественного происхождения, а именно астероиды. Астероиды, сближающиеся с Землей, обладают сложным движением вследствие наличия сближений с большими планетами и возможных неустойчивых орбитальных и вековых резонансов. Исследование динамики таких объектов осуществимо только численными методами, поскольку требует учета влияния множества сил, в частности негравитационных эффектов, таких как световое давление и эффект Ярковского. Изучение вероятностной орбитальной эволюции требует применения многопроцессорных вычислительных систем и обработки больших объемов информации.

В ходе выполнения первого этапа проекта был осуществлен переход к автоматизированной обработке результатов вычислений. В частности, автоматизирован процесс построения графиков с использованием скриптов и их анализ с помощью методов машинного обучения.

Модифицирован программный комплекс «ИДА», предназначенный для исследования динамики астероидов, путем включения алгоритмов определения коэффициента трансверсального ускорения A_2 , создаваемого эффектом Ярковского в движении астероидов. Реализовано и проанализировано два метода получения этого параметра из условия минимума среднеквадратической ошибки представления наблюдений. В первом методе перебираются различные значения A_2 в пределах заданного интервала с определенным шагом. При каждом значении параметра решается задача наименьших квадратов и определяется среднеквадратическая ошибка представления наблюдений. За искомое значение параметра трансверсального ускорения A_2 берется такое, которое соответствует минимальному значению среднеквадратичной ошибки. Данная методика имеет ряд недостатков: она ограничивает исследователя интервалом перебора параметра A_2 и дискретным шагом, и требует решения задачи наименьших квадратов на каждом шаге, что существенно увеличивает время работы программы. Во втором методе параметр включается в число оцениваемых параметров при решении задачи наименьших квадратов. Здесь задача решается однократно, и позволяет, кроме того, получить ошибку определения параметра A_2 . Разработанные алгоритмы были протестированы

на нескольких астероидах, имеющих малые перигелийные расстояния, так как эффект Ярковского может оказывать значительное влияние на их динамику из-за регулярного прохождения объектов вблизи Солнца. В частности, проведено сравнение методик при определении трансверсального ускорения A_2 для астероидов, имеющих малые перигелийные расстояния и различный состав наблюдений. В связи с тем, что часть астероидов имеет радарные наблюдения, в программный комплекс «ИДА» была включена возможность их обработки. На примере астероидов 425755 2011 CP4 и 3200 Phaethon (следует отметить, что эти два астероида имеют радарные наблюдения) показана возможность получать требуемые параметры с помощью разработанного программного обеспечения, с точностью сопоставимой с точностью NASA. Таким образом, на основе проведенных исследований можно сделать вывод о большей эффективности второй методики.

Далее была детально исследована орбитальная эволюция астероидов 504181 2006 TC и 2007 PR10 с учетом и без учета эффекта Ярковского. Выявлены сближения 2006 TC и 2007 PR10 со всеми планетами внутренней группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс), рассмотрена вековая резонансная динамика (выявлен ряд апсидально-нодальных резонансов) и получена оценка времени предсказуемости движения астероидов с помощью параметра OMEGNO. Результаты исследований показали, что эффект Ярковского оказывает существенное влияние на большую полуось орбит астероидов, что приводит к изменениям в числе и расстоянии сближений. Что касается оценки времени предсказуемости с помощью параметра OMEGNO, то движение астероида 504181 2006 TC можно считать регулярным лишь на интервале времени (1440, 2270) гг., а 2007 PR10 – на интервале (1390, 4310) гг. За пределами этих интервалов у орбит проявляются признаки хаотичности, к которым, скорее всего, приводят многократные и тесные сближения астероидов с большими планетами.

Кроме того, в программном комплексе «ИДА» реализована возможность определения параметра светового давления из наблюдений. Методика протестирована на примере астероида 3200 Phaethon. Полученные нами результаты согласуются с данными NASA.

В качестве подготовки к работе по второму этапу построена упрощенная модель численного движения спутников Луны, которая включает в себя основной потенциал (LP150Q) и точечную модель влияния внешних тел (Земли и Солнца). Усложнение модели и доведение ее до уровня высокоточной планируется на втором этапе проекта.