

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА С ЦЕЛЬЮ ПОИСКА ОРБИТ, ПРИГОДНЫХ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ИСЗ

Е. В. Блинкова, И. В. Томилова, А. Г. Александрова, Т. В. Бордовицына
Национальный исследовательский Томский государственный университет

В работе представлены результаты исследования динамической структуры околоземного пространства, расположенного в диапазоне больших полуосей от 8 000 до 45 000 км, методом численного моделирования. Выявлены зоны подверженные наибольшему влиянию вековых резонансов. Показано расположение реальных объектов из каталога NORAD и влияние на них резонансов различных типов. Выделены области наиболее подходящие для утилизации отработавших ИСЗ.

PRELIMINARY ANALYSIS OF THE DYNAMIC STRUCTURE OF NEAR-EARTH SPACE AND ORBITAL DEBRIS LOCATION WITH THE AIM OF FINDING THE POSSIBLE UTILIZATION ORBIT OF ARTIFICIAL EARTH SATELLITES

E. V. Blinkova, I. V. Tomilova, A. G. Aleksandrova, T. V. Bordovitsyna
National Research Tomsk State University

The paper presents the results of a study of the dynamic structure of the near-Earth orbital space located in the semi-major axes range from 8 000 to 45 000 km using the numerical simulation method. The zones subject to the greatest influence of secular resonances are revealed. The location of real objects from the NORAD catalog and the influence of different types of resonances on them is shown. The most suitable areas for the disposal of defunct satellites are identified.

Введение

Активное освоение околоземного космического пространства (ОКП), связанное с разрыванием новых или преобразованием/дополнением уже существующих спутниковых систем, ставит перед нами задачу по детальному изучению динамической структуры этого пространства для оптимального размещения в ОКП таких систем и решения проблемы утилизации отработавших объектов. При помощи усовершенствованной численной модели движения искусственных спутников Земли был проведен обширный эксперимент для составления карт распространенности резонансов и времени жизни объектов на околоземных орбитах, расположенных во внеатмосферной части ОКП вплоть до сферы действия Луны относительно Земли. В рамках настоящей работы проведен предварительный анализ с целью выбора зон космического пространства, пригодных для утилизации и паркинга, полученный в результате совместного анализа динамической структуры околоземного орбитального пространства и результатов исследования динамики каталогизированного космического мусора, представленного в каталоге NORAD.

© Блинкова Е. В., Томилова И. В., Александрова А. Г., Бордовицына Т. В., 2023

Таблица 1. Типы апсидально-нодальных резонансов низких порядков

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

Методика исследования и описание эксперимента

В настоящей работе внимание было сосредоточено на модельных объектах с начальным эксцентриситетом, равным 0.001, равномерно распределенных по наклонению от 0 до 180°, с шагом 5°, в диапазоне больших полуосей от 8 000 и до 45 000 км с шагом 200 км и реальных объектах из каталога NORAD, попадающих в данную область ОКП.

Выбор нижней границы исследуемой области ОКП обусловлен действием атмосферы, из-за действия которой расположенные ниже объекты имеют короткое время жизни, в силу чего данная область ОКП имеет естественные механизмы самоочистки. Кроме того, именно в диапазоне больших полуосей от 8 000 км и до 45 000 км расположена значительная часть объектов, представленных в каталоге NORAD. Динамическая эволюция выбранных модельных объектов исследовалась путем численного моделирования на столетнем интервале времени при помощи программного комплекса «Численная модель движения систем ИСЗ» на кластере «СКИФ Cyberia» ТГУ [1]. При моделировании учитывались возмущения от гармоник геопотенциала до 10 порядка и степени, возмущения от Луны и Солнца.

В данной работе мы не рассматривали влияние светового давления (СД) на объекты, т. к. его сила способна кардинально менять орбитальную эволюцию объектов с большой парусностью и является вторым по величине воздействием возмущающим фактором после гравитационного поля Земли для таких объектов [2]. В случае малой парусности динамическая структура с учетом светового давления и без него совпадает [3]. Как показали наши исследования на примере ряда вековых резонансов [3], учет СД меняет границы влияния резонансов при разных значениях парусности объектов. Анализ динамической структуры ОКП с учетом СД планируется посвятить отдельную работу.

Исследование структуры вековых резонансов основано на изучении эволюции во времени резонансных соотношений и критических аргументов в соответствии с методикой, описанной в [4].

С использованием данной методики были получены сведения о распределении в рассматриваемой области ОКП вековых апсидально-нодальных резонансов 1–6 порядков, связанных с прецессией орбит Луны и Солнца (табл. 1) и полuveковых резонансов со скоростью движения возмущающего тела, Луны или Солнца (табл. 2).

В табл. 1, 2 приняты следующие обозначения: $\dot{\Omega}$, $\dot{\omega}$, $\dot{\Omega}'$, $\dot{\omega}'$ – вековые частоты в движении спутника и возмущающих тел; $\bar{n}'_{S,L}$ – среднее движение третьего тела, обозначения элементов орбит стандартные; штрих говорит о том, что элементы относятся к третьему телу. Индексы L и S относятся к возмущениям от Луны и Солнца соответственно.

Результаты численного эксперимента

Исследование результатов численного эксперимента на наличие в динамике объектов вековых апсидально-нодальных резонансов, связанных с прецессией орбит Луны и Солнца

Таблица 2. Типы вековых резонансов со скоростью движения возмущающего тела

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

и полuveковых резонансов со средним движением третьего тела (Луны, Солнца), позволило построить карты распределения указанных в табл. 1 и 2 резонансов в рассматриваемой области ОКП (рис. 1 и 2 соответственно). Здесь же цветными крестиками показано распределение в исследуемой области объектов из каталога NORAD. Разнообразие эксцентриситетов у объектов каталога не принципиально, т. к. действие вековых резонансов определяется большой полуосью и наклоном.

На рис. 1 в каждой точке плоскости показано количество одновременно действующих на объект устойчивых (либрация) и неустойчивых (либрация/циркуляция) апсидально-нодальных резонансов. На рис. 1 и 2 использованы разные способы обозначения областей резонансов в связи с тем, что наложений полuveковых резонансов не встречается и можно показать каждый резонанс отдельно, в отличие от апсидально-нодальных резонансов. Кроме того, на рис. 2 желтыми линиями помечены зоны действия орбитальных резонансов со скоростью вращения Земли.

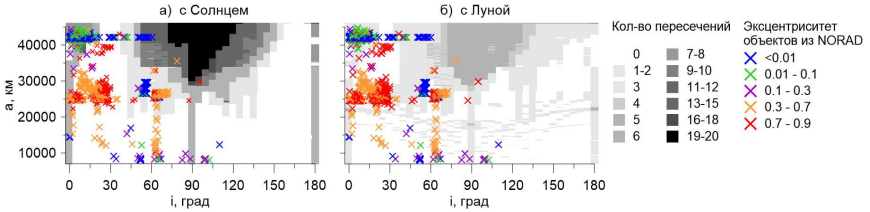


Рис. 1. Распределение апсидально-нодальных вековых резонансов, связанных с прецессией орбиты Солнца (а), Луны (б) и каталогизированного космического мусора из каталога NORAD

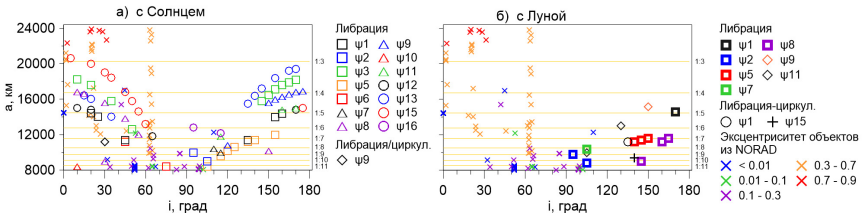


Рис. 2. Распределение полuveковых резонансов, связанных со средним движением Солнца (а), Луны (б) и каталогизированного космического мусора из каталога NORAD

Сопоставляя данные, представленные на рис. 1 и 2, можно заметить, что в рассматриваемой области околоземного пространства действует большое количество вековых резонансов. Большая часть апсидально-нодальных резонансов сконцентрирована в диапазоне

наклонений от 45 до 150° , начиная с примерно $20\,000$ км по большой полуоси. Кроме того, всю рассматриваемую область пронизывают нодальные резонансы, которые оказывают влияние на объекты, расположенные на орбитах с наклонениями 0 , 90 и 180° .

Вековые резонансы со средним движением третьего тела появляются в нижней части рассматриваемой области. При этом, несмотря на широкий спектр встречающихся резонансов, совместное влияние нескольких вековых резонансов со средним движением третьего тела встречается крайне редко.

Следует отметить, что, помимо вековых резонансов, в рассматриваемой области ОКП действует большое количество орбитальных резонансов, связанных с вращением Земли, отмеченных на рис. 2 желтыми линиями.

Известно [4], что наложение устойчивых и неустойчивых резонансов различных типов приводит к хаотизации движения. Следовательно, при выборе областей для утилизации отработавших ИСЗ стоит избегать областей с наложением большого числа резонансов.

В области ОКП, ограниченной большими полуосями от $8\,000$ до $45\,000$ км можно выделить следующие области свободные от резонансов или их наложений. Наиболее свободной от вековых резонансов областью является область до $20\,000$ км встречаются лишь единичные апсидально-нодальные вековые резонансы, связанные с прецессией орбиты Луны и полuveковые резонансы, связанные со средним движением Луны и Солнца. В диапазоне от $20\,000$ до $35\,000$ км по большой полуоси свободна от резонансов только область обратного движения с наклонениями от 145 до 175° .

Заключение

Таким образом, в работе рассмотрена область ОКП, расположенная в диапазоне больших полуосей от $8\,000$ до $45\,000$ км, с наклонениями от 0 до 180° . Показано, что рассматриваемой области околоземного орбитального пространства оптимальной в качестве зоны для утилизации отработавших ИСЗ является область, расположенная ниже $20\,000$ км. При этом стоит избегать областей, в которых действуют орбитальные резонансы со скоростью вращения Земли.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-72-10022, <https://rscf.ru/project/19-72-10022/>.

Библиографические ссылки

- [1] Александрова А. Г., Авдошев В. А., Попандотуло Н. А., Бордовицына Т. В. Численное моделирование движения околоземных объектов в среде параллельных вычислений // Изв. вузов. Физика. — 2021. — Т. 64, № 8. — С. 168–175.
- [2] Кузнецов Э. Д., Захарова П. Е., Гламазда Д. В. и др. О влиянии светового давления на орбитальную эволюцию объектов, движущихся в окрестности резонансов низких порядков // Астрон. вестн. — 2012. — Т. 46, № 6. — С. 480–488.
- [3] Александрова А. Г., Бордовицына Т. В., Томилова И. В. Исследование влияния светового давления на динамику околоземных объектов на резонансных орбитах // Астрон. вестн. — 2018. — Т. 52, № 5. — С. 447–462.
- [4] Александрова А. Г., Блинкова Е. В., Бордовицына Т. В. и др. Вековые резонансы в динамике объектов, движущихся в областях ЛЕО–МЕО околоземного орбитального пространства // Астрон. вестн. — 2021. — Т. 55, № 3. — С. 272–287.