УДК 629.7

А. П. АЛПАТОВ, Ю. М. ГОЛЬДШТЕЙН

БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ РАЗЛИЧНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина;
e-mail: aalpatov@ukr.net; jura_gold@meta.ua

Целью публикации является разработка методики и анализ результатов баллистического исследования заполненности околоземного космического пространства (ОКП) орбитами космических аппаратов (КА) связи, навигации и дистанционного зондирования Земли. В работе приведена классификация околоземных орбит. Для проведения анализа на основе данных актуальной динамической базы космических объектов предложено использовать составные гистограммы распределений количества орбит КА по кеплеровским элементам орбит. Проведенный баллистический анализ заполненности ОКП орбитами КА позволил выявить характерные особенности и различия в их пространственном распределении. Полученные результаты могут найти применение при выявлении областей повышенной вероятности конфликтов между уже существующими и проектируемыми КА, формулировании требований к выполнению межорбитальных маневров, а также при планировании и осуществлении других видов космической деятельности.

Метою публікації є розробка методики й аналіз результатів балістичного дослідження заповнення навколоземного космічного простору (НКП) орбітами космічних апаратів (КА) зв'язку, навігації й дистанційного зондування Землі. У роботі наведено класифікацію навколоземних орбіт. Для проведення аналізу на основі даних актуальної динамічної бази космічних об'єктів запропоновано використовувати складові гістограми розподілів кількості орбіт КА за кеплеровськими елементами орбіт. Проведено балістичний аналіз заповнення НКП орбітами КА, що дозволило виявити характерні риси й відмінності в їхньому просторовому розподілі. Отримані результати можуть знайти застосування при виявленні зон підвищеної ймовірності конфліктів між уже існуючими й проектованими КА, формулюванні вимог до виконання міжорбітальних маневрів, а також при плануванні й здійсненні інших видів космічної діяльності.

The paper focusses on the procedure and analysis of the results of ballistic studies on near-Earth space filling with orbits of communications satellites, navigational satellites, and Earth remote sensing satellites. The study presents the near-Earth orbits classification. In the present work, composed histograms of spacecraft orbits distributions on Keplerian orbital elements have been used to analyze from the data of an actual dynamic base of space objects. The ballistic analysis of near-Earth space filling with spacecraft orbits emerged the special features and variations in their space distribution. The research results can be used to emerge the regions of an increased probability of conflicts between the existing and designed spacecraft, to formulate requirements for inter-orbital maneuvers, as well as to schedule and perform alternative space activities.

Ключевые слова: *околоземное космическое пространство, космический аппарат, каталог космических объектов, космическая деятельность.*

Активное освоение околоземного космического пространства (ОКП) привело к росту его заполненности орбитами космических аппаратов (КА) различного назначения. Дальнейшее освоение ОКП затруднено без объективного анализа его текущего состояния. Особенно важен этот анализ для низких и геостационарных орбит, где количество КА максимально. В связи с этим, к настоящему времени возникла потребность в детальном баллистическом анализе состояния ОКП.

Наличие собственного каталога или доступ к иному открытому и обновляемому каталогу параметров орбит КА позволяет осуществлять баллистический анализ заполненности ОКП орбитами КА различного функционального назначения.

К сожалению, Украина не располагает поддерживаемым в актуальном состоянии динамическим каталогом параметров орбит КА.

В настоящее время полноценно функционируют и поддерживают в актуальном состоянии динамические каталоги объектов искусственного происхождения только две системы средств наблюдения и контроля космического пространства (СККП) в США и в России. Они создавались для обнаружения космических объектов (КО), представляющих опасность с военной точки зрения. Для решения этой задачи организованы обнаружение и контроль движения не только действующих КА, но и всех остальных крупных КО.

Большая часть каталога США NORAD находится в открытом доступе, но есть информация, к которой нет свободного доступа. Часть данных по КО преднамеренно немного изменена, чтобы скрыть их точное местоположение. Информация в NORAD закрывается не только по военным КА и КА двойного назначения США, но и по аналогичным КА союзников США. Основной причиной этого является то, что космическая деятельность тесно связана с вопросами обеспечения национальной безопасности и информация о КА военного и двойного назначения является закрытой, неполной и часто недостоверной.

Каталог NORAD ежедневно публикует параметры орбит более 15000 КО. Кроме того он публикует параметры орбит КА различного функционального назначения, сгруппированные в отдельные файлы. Эта информация доступна в сети Интернет в виде текстовых файлов (см., например, http://www.space-track.org), обновляемых иногда несколько раз в сутки.

Доступные данные актуального каталога параметров орбит NORAD (объединённой системы аэрокосмической обороны США и Канады) позволили провести баллистический анализ заполненности околоземных орбит КА различного назначения.

Классификация орбит КА. При проведении анализа воспользуемся следующей [1] классификацией околоземных орбит КА:

- низкие орбиты (LEO);
- солнечно-синхронные орбиты (SSO);
- средневысотные орбиты (MEO);
- круговые полусинхронные (полусуточные) орбиты (CSO);
- высокоэллиптические орбиты (HEO);
- геостационарная орбита (GEO);
- геосинхронные орбиты (GSO);
- высокие орбиты (HO);
- сверхвысокие орбиты (SHO);
- орбиты захоронения (DO).

Категория орбит LEO включает диапазон высот от 100 (иногда немного ниже) до 2000 км (стандарт NASA и IADC). У некоторых экспертов верхний предел этого диапазона колеблется от 1500 до 3000 км.

Солнечно-синхронная орбита – низкая орбита с обратным движением, в котором плоскость орбиты прецессирует с той же скоростью, с какой Земля обращается вокруг Солнца.

Средневысотные орбиты присутствуют не во всех классификациях экспертов и могут охватывать диапазоны высот от 5000 до 10000 км, от 1500 или от 2000 до 20000 км или до геостационарной орбиты (ГСО), иногда это некоторая область около 20000 км .

Круговые полусинхронные орбиты (CSO) исторически используются навигационными системами GPS, GLONASS, Galileo и характеризуются периодом обращения искусственного спутника Земли (ИСЗ), равным ~12 ч.

Средняя высота такой орбиты – 20200 км. В некоторых классификациях эти орбиты включают в состав средневысотных.

Высокоэллиптические орбиты имеют эксцентриситет более 0,5...0,6 (в разных классификациях), и они включают такие подклассы, как орбиты типа «Молния» и переходные эллиптические (GTO).

Орбиты типа «Молния» – высокоэллиптические орбиты с наклонением 63...65°, периодом обращения около 12 ч. и апогеем в северном полушарии. Они всегда использовались для обеспечения связи и раннего предупреждения о ракетном нападении.

Переходные эллиптические орбиты (GTO) с апогеем в геостационарном поясе и перигеем в области низких орбит используются для перевода КА с низкой орбиты на геосинхронную, в частности геостационарную.

Сверхвысокие орбиты (SHO) – орбиты с высотой апогея, значительно превышающей высоту геосинхронных орбит и всех орбит захоронения.

Геостационарная орбита (GEO) – орбита с периодом обращения близким к 24 ч и наклонением и эксцентриситетом, близкими к нулю.

Геосинхронные орбиты (GSO) – близкие к круговым орбиты с периодом обращения приблизительно 24 ч и любым наклонением.

Рассматриваются и используются орбиты захоронения (DO) для КА, действующих на верхних орбитах, низких, и для класса полусинхронных орбит. Для каждого из этих трех классов орбиты захоронения свои и расположены вне рабочих областей функционирования КА.

На рис. 1 представлена блок-схема классификации околоземных орбит КА. Пунктирные линии указывают на неоднозначность определения принадлежности к группам для некоторых классов орбит.

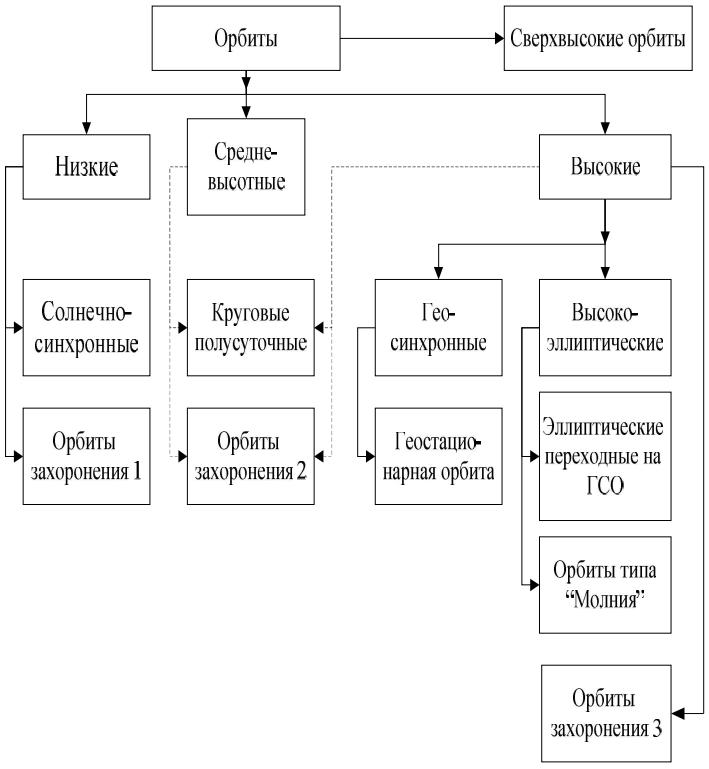

Рис. 1 – Блок-схема классификации околоземных орбит

Баллистический анализ заполненности ОКП орбитами КА. Для проведения баллистического анализа заполненности ОКП орбитами КА различного функционального назначения использовались актуальные на 15.12.16 г. данные каталога общедоступной базы данных сайта www.space-track.org NORAD министерства обороны США.

Распределение количества наборов элементов орбит в каталоге по типам анализируемых КА приведено в таблице 1.

Таблица 1

Наименование	Количество
КА связи	355
Навигационные КА	38
КА ДЗЗ	67

Необходимо отметить, что информация по КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) не может считаться полной ввиду ограниченности доступа к информации о КА военного и двойного назначения.

Орбитальные параметры КА в каталоге представлены в виде списка двухстрочных наборов элементов TLE [2]. Такой формат представления информации удобен для распространения данных, но неудобен для проведения анализа.

Анализ заполненности ОКП КА различного назначения целесообразно проводить после пересчета наборов орбитальных элементов каталога КА к кеплеровским элементам орбиты и визуализации с использованием составных гистограмм распределений количества орбит КА. При проведении анализа рассматривались КА связи, навигации и ДЗЗ. Составные гистограммы, представленные на рис. 2 – рис. 5, изображают распределения частот количества орбит КА связи, навигации и ДЗЗ в зависимости от кеплеровских элементов орбиты. Частоты количества орбит КА откладываются по вертикальной оси, а значения кеплеровских элементов орбиты – по горизонтальной оси.

На рис. 2 – рис. 5 используются следующие обозначения: – КА связи,  – навигационные КА,  – КА ДЗЗ.

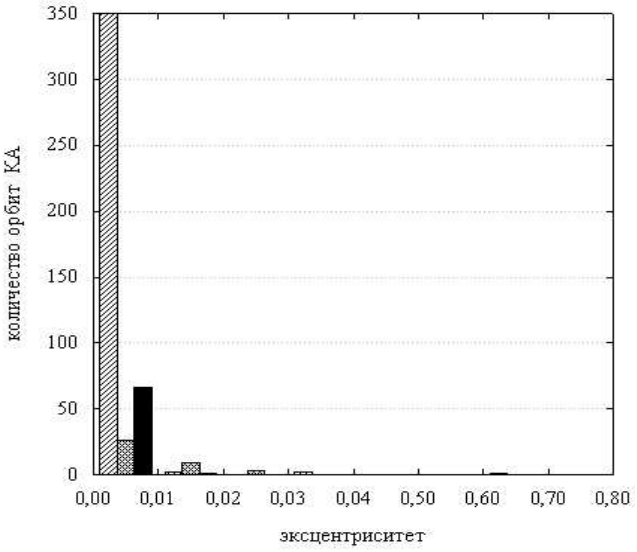

Рис. 2 – Распределение количества орбит КА по эксцентриситету

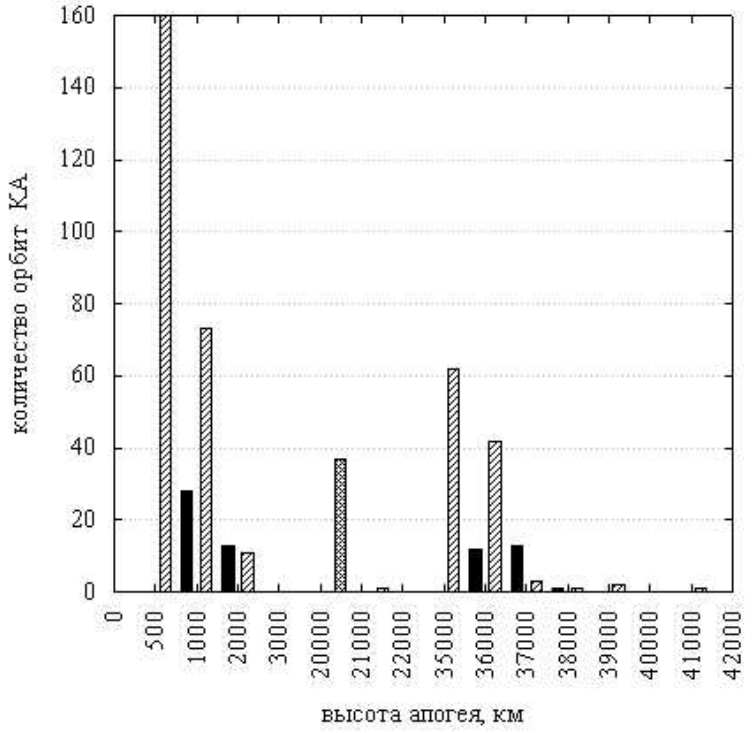

Рис. 3 – Распределение количества орбит КА по высоте апогея

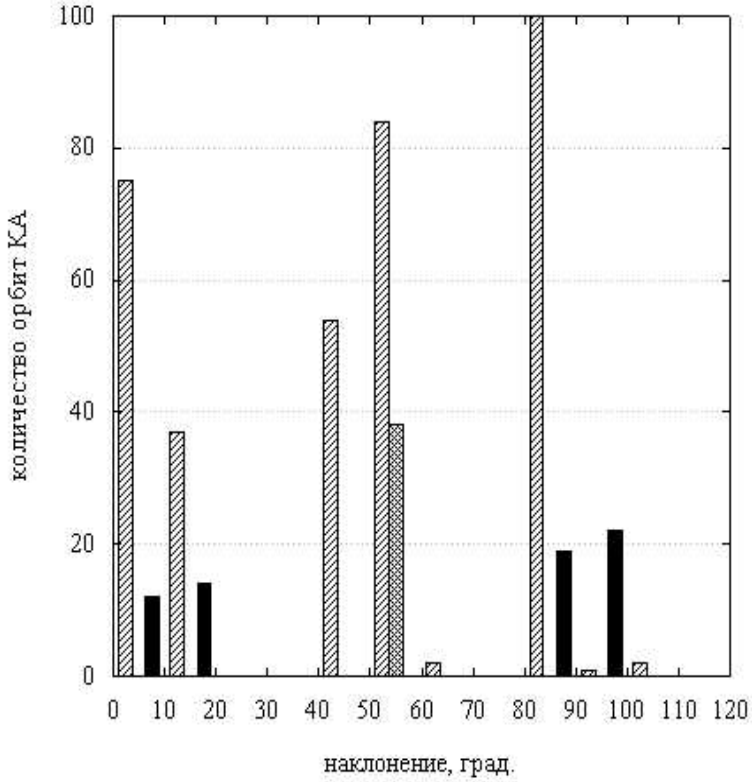

Рис. 4 – Распределение количества орбит КА по наклонению

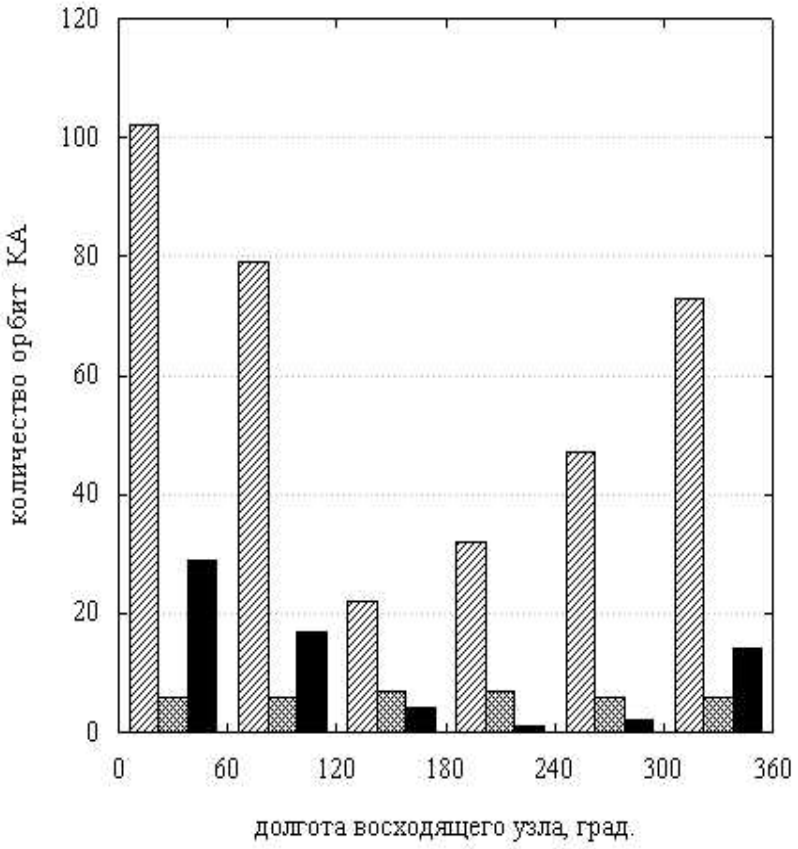

Рис. 5 – Распределение количества орбит КА по долготе восходящего узла

Общая картина заполненности ОКП орбитами КА различного функционального назначения наглядно характеризуется представленными на рис. 2 – рис. 5 составными гистограммами распределений КА.

Из приведенной на рис. 2 гистограммы распределения количества орбит КА в зависимости от эксцентриситета следует, что более 99 % рассматриваемых типов КА имеют близкие к круговым орбиты. Высокоэллиптические орбиты с эксцентриситетом более 0,6 наблюдаются только у КА связи в количестве не превышающем 1 %.

На рис. 3 приведена гистограмма распределения количества КА по высоте апогея. Из рис. 3 следует, что 68 % КА связи и 61 % КА ДЗЗ сконцентрированы в области низких орбит на высотах ниже 3000 км, а в области геосинхронных орбит наблюдается 31 % КА связи и 39 % КА ДЗЗ. Причем в области низких орбит распределение орбит КА неравномерное. Выше геостационарного кольца, в области высокоэллиптических орбит, наблюдается менее одного процента КА связи. Навигационные КА интенсивно используют только область круговых полусинхронных орбит в окрестности 20000 км.

На рис. 4 приведена гистограмма распределения количества КА по наклонению орбиты. Из рис. 4 следует, что КА связи распределены по наклонению следующим образом: 0°..20° – 30 %, 40°..60° – 41 % и 80°..90° – 28 %. В интервалах наклонениий 60°..70° и 100°..110° наблюдается 1 % КА связи. Распрелеление количества КА ДЗЗ по наклонению имеет следующий вид: 0°..20°– 40 % и 80°..100° – 60 %. Причем строго полярных орбит у КА

связи и ДЗЗ мало, поэтому над полюсами Земли плотность КА низкая. Навигационные КА полностью концентрируются в диапазоне изменения наклонений 50°..60°.

Анализ распределений количества орбит КА по аргументу перицентра не представляет интереса ввиду близости большинства орбит КА к круговым.

Рис. 5 иллюстрирует распределение количества орбит КА различного функционального назначения по долготе восходящего узла. Распределение количества КА связи убывает на интервале изменения долготы восходящего узла 0°… 180° и возрастает на интервале 180°… 360°. Распределение количества КА ДЗЗ убывает на интервале изменения долготы восходящего узла 0°… 240° и возрастает на интервале 240°… 360°. Навигационные КА распределены по долготе восходящего узла приблизительно равномерно.

Из [3 – 5] известно, что гравитационные возмущающие силы, вызванные полярным сжатием Земли, являются основным возмущающим фактором для траекторий рассматриваемых КА. Они приводят к вековому уходу восходящего узла траектории. Оценим эту величину с использованием представленной на рис. 6 составной гистограммы распределения количества КА ДЗЗ по долготе восходящего узла. При построении гистограммы использовались данные каталога СКПП NORAD от 15.12.16 г. и от 15.03.17 г.

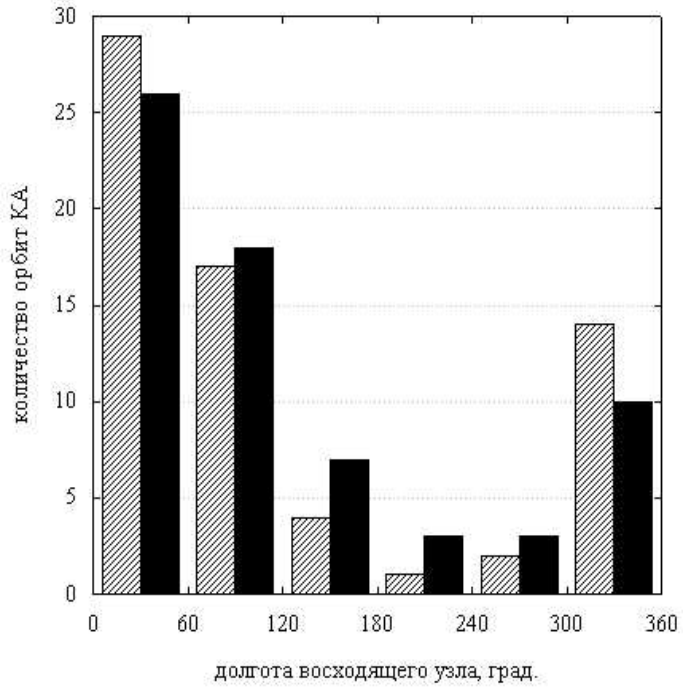

Рис. 6 – Изменение распределения количества орбит КА ДЗЗ по долготе восходящего узла в зависимости от времени

На рис. 6 используются следующие обозначения:

– гистограмма по данным от 15.12.16 г.,

– гистограмма по данным от 15.03.17 г.

Рис. 6 наглядно иллюстрирует изменение распределения количества КА ДЗЗ по долготе восходящего узла в зависимости от времени.

Выводы. Представленные результаты анализа заполненности ОКП орбитами космических аппаратов различного функционального назначения по-

зволяют получить достаточно полную картину их распределения в различных областях ОКП. Проведенный анализ показал, что большинство орбит рассмотренных КА являются околокруговыми. Наиболее заполнены орбитами КА связи и ДЗЗ область низких орбит на высотах ниже 3000 км и область геосинхронных орбит. В области низких орбит КА связи и ДЗЗ распределены неравномерно по высоте апогея и наклонению. Навигационные КА заполняют область круговых полусинхронных орбит в окрестности 20000 км с изменением наклонения в интервале 50°..60°.

Результаты анализа могут найти применение при обосновании, планировании и осуществлении космической деятельности по организации освоения ОКП и его эффективной и безопасной эксплуатации.

1. *Вениаминов С. С., Червонов А. М.* Космический мусор – угроза человечеству. М.: ИКИ РАН. 2013. 207 с.
2. Назаренко А. И. Моделирование космического мусора. М.: ИКИ РАН. 2013. 216 с.
3 Эльясберг П. Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. М.: Наука. 1965. 540 с.
4. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. *Г. С. Нариманова и М. К. Тихонравова.* М.*:* Машиностроение. 608 с.
5. Инженерный справочник по космической технике / Под ред. *А. В. Солодова.* М.: Воениздат. 1977. 430 с.

Получено 06.04.2017,
в окончательном варианте 23.06.2017