2. КОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИБОРЫ: СЕРВЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГИС И ГЕОПОРТАЛЫ

УДК 51–71

DOI: 10.23885/2500-123X-2019-2-4-58-63

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

А.Е. Панич, Д.П. Олишевский

Южный федеральный университет
aepanich@yandex.ru, olidp@sfedu.ru

Аннотация. Рассмотрены основные понятия космической среды, описаны динамика появления объектов космического мусора и его основная угроза, изложена информация о современном состоянии засорения космического пространства. Рассмотрено программное обеспечение для моделирования вероятности появления и столкновения космических аппаратов с космическим мусором на заданной орбите. Проведен эксперимент в программе MASTER по оценке влияния космического мусора на спутник в околоземном космическом пространстве.

Ключевые слова: антропогенное влияние, космический мусор, околоземное космическое пространство, моделирование космического мусора

Область, где функционирует большинство искусственных спутников Земли, весьма обширна, её объём около 10^{12} – 10^{13} км³. В последние годы стало очевидно, что активная человеческая деятельность в космическом пространстве имеет ощутимые негативные последствия.

С момента запуска первого советского спутника по настоящее время системами контроля космического пространства было зарегистрировано и каталогизировано более 40 000 космических объектов (КО) искусственного происхождения.

На сегодняшний день большую часть из них составляют объекты размером более 10–30 см, которые и являются техногенным космическим мусором (КМ), оставленным человеком в результате работы на орбите Земли [1].

Основными источниками КМ являются:

- ступени ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов (КА) по завершении их активного функционирования;
- преднамеренные или самопроизвольные разрушения КО на орбите;
- выброс в околоземное космическое пространство операционных элементов (пружин, толкателей, фрагментов пироболтов и др.);
- разрушения КО вследствие их взаимных столкновений с частицами естественного происхождения;
- выбросы несгоревшего топлива двигательных установок;
- эрозия материалов с поверхности КА;
- тросовые системы, отделяющиеся после их использования;

– выбросы в околоземное космическое пространство средств обеспечения жизнедеятельности экипажей пилотируемых КА [2].

По данным системы контроля космического пространства ВВС США в результате запусков КА с момента начала космической деятельности (4 октября 1957 года) общее количество каталогизированных КО по состоянию на 01 апреля 2019 года составило более 19 тысяч объектов с общей массой около 8 тысяч тонн (рис. 1) [3].

73 % зарегистрированных КО сосредоточено в области низких околоземных орбит, 8 % – в области геостационарной орбиты, 10 % – в области высокоэллиптических орбит и остальные 9 % – в других областях околоземного космического пространства.

В каталоге Европейского космического агентства по состоянию на 04 июня содержится более 23 тысяч КО, общей массой более 8 тысяч тонн (рис. 2) [4].

По данным системы контроля космического пространства ВВС США сегодня общее количество КМ составляет:

- 30 тысяч обломков – больше 10 см в поперечнике,
- 670 тысяч обломков – больше 1 см в поперечнике,
- 170 миллионов обломков – больше 1 мм в поперечнике.

Лишь небольшую часть мусора удастся обнаружить, отследить и занести в каталоги.

Достоверные данные о числе объектов, размером менее 25–30 см, отсутствуют. Характерным является резкое увеличение числа объектов по мере уменьшения их размера. Есть основание полагать, что сред-

няя граница космических объектов минимальных размеров, занесённых в каталог, находится в диапазоне 15–20 см. Данные о числе и других характеристиках объектов меньшего размера определяются в процессе статистического моделирования космического мусора.

Основная трудность моделирования КМ вызвана недостатком экспериментальных данных. Имеющаяся измерительная информация получена в относительно небольших районах многомерной области: высота точки – широта точки – размеры космического объекта – время. Поэтому для определения характеристик техногенного загрязнения в различных точках упомянутого пространства привлекается дополнительная информация. Эффективное использование экспериментальных данных и дополнительной информации – основная проблема, которая решается при построении моделей КМ.

В процессе анализа техногенного засорения околоземного космического пространства обычно рассматриваются следующие вопросы: оценка текущего уровня загрязнения объектами разных размеров; моделирование эволюции техногенного загрязнения; оценка вероятности столкновений КА с КО разных размеров и возможных последствий опасных

столкновений; определение характеристик потока КО разных размеров через зоны обзора наземных и бортовых измерительных средств.

В настоящее время для широкого круга пользователей доступны три модели КМ для применения в интересах решения различных прикладных задач. Все они выполнены в виде РС программ для Windows и базируются на большом количестве файлов данных, которые подготовлены разработчиками заранее на основе специализированных программ.

1. Модель NASA «ORDEM 3.0» [4]. На основе эмпирических данных, собранных в Космическом центре имени Джонсона, определяются суммарные характеристики КМ в области низких орбит на высотах от 200 до 2000 км. Рассматриваются объекты размером от 10 микрон до 1 м. Программа имеет две главных ветви. Первая – для проектирования КА и выполнения различных миссий – представляет среду КМ по отношению к спутникам на различных орбитах. Вторая ветвь определяет характеристики КМ по отношению к наземным наблюдателям (телескопам и РЛС). Результирующие данные содержат оценки пространственной плотности, пространственного потока и скоростных данных КМ.

Рис. 1. Ежемесячное количество объектов на околоземной орбите по типам

Рис. 2. Изменения количества объектов и их массы на околоземной орбите

2. Модель ESA «MASTER-8» [5]. Эта модель описывает искусственный и естественный КМ в околоземном пространстве и его поток относительно заданных пользователем орбит. Рассматриваются частицы размером более 1 микрона, образовавшиеся в результате проявления различных источников загрязнения: КА, ракет-носителей, фрагменты разрушений в результате взрывов и столкновений, шлаковые образования, результаты деградации поверхности и нарушения герметичности емкостей. Для каждого из источников разработаны соответствующие модели образования и распространения КМ. Модель содержит трехмерное распределение КМ в области высот от низких околоземных орбит ($r > 6564$ км) до геостационарных орбит ($r < 45164$ км). Результаты расчета потока относительно заданного КА или некоторой области могут быть «привязаны»

к конкретному источнику и различным характеристикам КМ (размеры, параметры орбит, величина и направление относительной скорости).

3. Российские модели SDPA2007 и SDPA-E [1]. SDPA2007 – это полуаналитическая стохастическая модель для среднесрочного и долгосрочного прогнозирования техногенного КМ размером более 1 мм в областях низких околоземных орбит и геостационарных орбит, для построения пространственных распределений концентрации и характеристик скорости, а также для оценки риска столкновений. Последняя версия модели состоит из отдельных модулей, относящихся к перечисленным выше задачам. Рассматриваются суммарные данные о КМ различных размеров (без «привязки» их к конкретным источникам загрязнения). Текущее состояние загрязнения околоземного пространства характеризуется:

- а) зависимостью концентрации КМ от высоты и широты точки;
- б) статистическими распределениями величины и направления скорости частиц в инерциальной системе координат.

Эти характеристики построены на базе комплексного использования доступной измерительной информации и различных априорных данных.

В дополнение к упомянутым частным модулям разработана инженерная модель (SDPA-E), аналогичная рассмотренным выше моделям NASA и ESA. Так же, как и в них, основные исходные файлы данных инженерной модели подготовлены на основе большого количества расчетов по более сложной модели (SDPA2007). Инженерная модель предназначена для быстрого, удобного и визуального представления характеристик КМ.

Очевидно, что при отсутствии детальных сведений об элементах орбит мелких объектов изучение опасности столкновений КА с ними требует применения статистического подхода. В то же время традиционный подход к изучению движения спутников является детерминированным. Он основан на интегрировании уравнений движения. В большинстве работ в той или иной степени используются идеи детерминированного подхода. В моделях NASA и ESA имитируются последствия всех известных запусков и разрушений спутников, а также возможных будущих аналогичных событий. Для каждого из объектов формируется вектор начальных условий, а прогнозирование выполняется с использованием традиционных моделей движения. Для оценки опасности столкновений пары спутников используется методика Д. Кесслера или ее модификации. Для множества объектов результаты суммируются. Очевидно, что такой подход является с одной стороны очень ресурсоёмким, с другой стороны он не снимает проблемы обеспечения адекватности модели. Точность моделирования последствий разрушений неизвестна, а применяемые в разных моделях оценки могут отличаться на порядок. Весьма сложной задачей является также настройка модели по имеющейся ограниченной измерительной информации.

Модель SDPA основана на следующих принципах статистического описания движения КМ:

- техногенная среда характеризуется пространственными распределениями концентрации объектов, а также величины и направления их скорости;
- применение закономерностей движения объектов как спутников Земли;
- максимальное использование априорных данных о возмущающих факторах;

–усредненное описание источников загрязнения, позволяющее минимизировать число параметров, уточняемых по известным экспериментальным данным.

По результатам рассмотрения пакетов программ моделирования была выбрана программа MASTER-8 Европейского космического агентства, в которой было проведено моделирование вероятности появления КМ на орбите спутника COSMOS 2529 (GLONASS). Параметры орбиты спутника:

- Apogee 19163 km;
- Perigee 19110 km;
- Inclination 64.69°;
- Altitude 19166.98 km;
- Velocity 3.95 km/s;
- Period 675.72 min.

Результаты моделирования распределения потока КМ на орбите спутника COSMOS 2529 приведены на рисунке 3.

Рис. 3 – Результаты моделирования распределения потока КМ на орбите спутника

Количество КМ размером от сотен микрометров до нескольких миллиметров особенно важно знать конструкторам космических аппаратов с точки зрения высоких требований к их надежности.

Поэтому конструкторы космических аппаратов должны улучшить свою оценку риска столкновения с космическим мусором путем совершенствования методов защиты, наблюдения, экспериментов и моделирования.

Одно из решений, которое в настоящее время изучается, заключается в уменьшении различий между моделями окружающей среды путем получения большего количества данных о мусоре в диапазоне от 100 ПМ до 1 мм из измерений на месте, выполняемых системами, расположенными на борту космического аппарата, которые могут давать наземной станции в режиме реального времени данные о количестве мусора для данной орбиты.

Список литературы

1. Назаренко, А. И. Моделирование космического мусора. М.: ИКИ РАН, 2013. 216 с.
2. Orbital Debris Quarterly News, vol.23, issue 1&2, May 2019. URL: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/ODQNV23i1.pdf> (дата обращения: 5.07.2019).
3. ESA's Annual Space Environment Report // European Space Operations Centre URL: https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf (дата обращения: 5.07.2019).
4. Krisko, P. H. The New NASA Orbital Debris Engineering Model ORDEM 3.0 / Krisko, P. H. // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, 2014. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2014-4227> (дата обращения: 7.07.2019).
5. Exploiting orbital data and observation campaigns to improve space debris models / Vitali Braun, Andre Horstmann, Benedikt Reihls, Stijn Lemmens, Klaus Merz, Holger Krag // Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies (AMOS) Conference, 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/325780175_Exploiting_orbital_data_and_observation_campaigns_to_improve_space_debris_models (дата обращения: 5.07.2019)

SYSTEM ANALYSIS AND MODELING OF TECHNOGENIC POLLUTION OF NEAR-EARTH SPACE

A.E. Panich, D.P. Olisheskiy

Southern federal university

aepanich@yandex.ru, olidp@sfedu.ru

Abstract. The basic concepts of the space environment are considered, the dynamics of the appearance of space debris objects and its main threat are described. The article provides information about the current state of space debris. Data on the number and other characteristics of objects smaller than 25–30 cm are determined by statistical modelling of space debris. The main difficulty in modeling space debris is due to the lack of experimental data. The effective use of experimental data and additional information is a major problem that is being addressed in the construction of space debris models. In the process of analysis of technogenic clogging of near-earth space, the following issues are usually considered: assessment of the current level of pollution by objects of different sizes; modeling of the increase in anthropogenic impact; assessment of the probability of collisions of spacecraft with space objects of different sizes and the possible consequences of dangerous collisions; determination of the characteristics of the flow of space objects of different sizes through the viewing zones of ground and onboard measuring instruments. The software for modeling the probability of spacecraft appearance and collision with space debris in a given orbit is considered. An experiment was conducted in the MASTER program to assess the impact of space debris on a satellite in near-earth space.

Keywords: anthropogenic impact, space debris, near-earth space, simulation of space debris

References

1. Nazarenko, A. I. Modelirovanie kosmicheskogo musora [Simulation of space debris]. Moscow: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 2013. 216 p. (In Russian).
2. Orbital Debris Quarterly News, vol.23, issue 1&2, May 2019. URL: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/ODQNv23i1.pdf> (дата обращения: 5.07.2019). (In English).
3. ESA's Annual Space Environment Report // European Space Operations Centre URL: https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf (дата обращения: 5.07.2019). (In English).
4. Krisko P.H. The New NASA Orbital Debris Engineering Model ORDEM 3.0 / Krisko, P. H. //AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, 2014. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2014-4227> (дата обращения: 7.07.2019). (In English).
5. Exploiting orbital data and observation campaigns to improve space debris models / Vitali Braun, Andre Horstmann, Benedikt Reihs, Stijn Lemmens, Klaus Merz, Holger Krag // Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies (AMOS) Conference, 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/325780175_Exploiting_orbital_data_and_observation_campaigns_to_improve_space_debris_models (дата обращения: 5.07.2019). (In English).