

РАКЕТНАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

УДК 629.78

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭВОЛЮЦИИ ТЕХНОГЕННОГО ЗАСОРЕНИЯ НИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ С УЧЕТОМ ВЗАИМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ И АКТИВНОГО УДАЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Усовик И.В. *, Дарных В.В. **, Малышев В.В. ***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

** e-mail: usovikiv@mail.ru*

*** e-mail: darnopykh@mail.ru*

**** e-mail: VeniaminMalyshev@yandex.ru*

Специалисты во всем мире приходят к выводу о необходимости очистки околоземного космического пространства (ОКП) от космического мусора (КМ). Однако в настоящее время нет достаточного обоснования эффективности влияния активного удаления КМ на эволюцию техногенного засорения, поэтому в рамках работ Межагентского координационного комитета по космическому мусору ведутся исследования по оценке эффективности влияния активного удаления крупных объектов КМ на долгосрочную устойчивость техногенного засорения области низких околоземных орбит (НОО). В рамках данной работы представлены результаты использования разработанной методики, описываемой в статье.

Рассмотрены: текущее состояние техногенного засорения ОКП; методы управления его будущим состоянием; перспективные методы очистки; постановка задачи оценки эффективности влияния активного удаления КМ на техногенное засорение области НОО объектами размером более 10 см; методика оценки эволюции техногенного засорения НОО с учетом взаимных столкновений и активного удаления КМ на основе статистической модели КМ, а также результаты использования разработанной методики и результаты сравнительного анализа.

Ключевые слова: космический мусор, модель, прогноз техногенного засорения, взаимные столкновения, активное удаление космического мусора.

Введение

Космический мусор создаёт всё больше проблем для космических аппаратов (КА), функционирующих на низких околоземных орбитах. Вращающиеся вокруг Земли КА стали неотъемлемой частью нашей жизни. Мы зависим от них, получая услуги спутниковой связи, метеорологическую информацию, проводя научные исследования, обеспечивая

национальную безопасность и т.д. Реальное и всё более возрастающее беспокойство относительно безопасности и надёжности этих аппаратов вызывает угроза их столкновения с другими орбитальными объектами, включая КМ. Характерной особенностью всей деятельности по освоению космического пространства является неуклонное его засорение объектами искусственного происхождения [1].

За последнее десятилетие произошел значительный скачок техногенной засоренности ОКП, связанный с двумя катастрофическими событиями:

1) преднамеренное разрушение китайского спутника «Fengyun-1C» 11.01.2007 в области НОО, в результате каталогизировано более 2500 фрагментов КМ;

2) 10.02.2009 на высоте около 780 км столкновение американского действующего спутника связи «Iridium 33» и российского неактивного КА «Космос-2251», каталогизировано более 2000 фрагментов КМ.

Число объектов, образовавшихся вследствие столкновения КА «Космос-2251» и «Iridium 33», значительно больше того, которое образуется в результате одного взрыва составных частей КА или разгонных блоков (баков, аккумуляторов). Количество подобных столкновений будет только увеличиваться и существенно влиять на техногенное засорение области НОО.

Можно выявить всего два фундаментальных средства управления будущей техногенной засоренностью: предотвращение образования и удаление КМ. С принятием международных руководящих принципов предотвращения образования КМ, таких, как принципы Межагентского координационного комитета по космическому мусору и Комитета по космосу Организации Объединенных Наций, с реализацией мер по снижению образования КМ, были сокращены темпы роста количества нового КМ из многих ключевых источников. Национальным механизмом решения задачи ограничения техногенного засорения является введенный в действие с 1 января 2009 г. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 52925-2008 «Изде-

лия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства». Требования этого стандарта гармонизированы с требованиями «Руководящих принципов ООН по предупреждению образования космического мусора» [1]. Однако последние исследования свидетельствуют о недостаточности данных мер в долгосрочном периоде, поэтому многие специалисты во всем мире приходят к выводу о необходимости очистки ОКП [4–6].

1. Актуальность работы

В настоящее время в каталогах систем контроля космического пространства России и США находится более 17000 объектов. Общая масса объектов в ОКП оценивается в 7000 тонн. В области НОО располагается 77% от общего числа каталогизированных объектов, в области геостационарной орбиты сосредоточено 6% каталогизированных объектов, около 10% — в области высокоэллиптических орбит (ВЭО) и 7% — на других орбитах, в том числе в области навигационных спутниковых систем. 20% каталогизированных объектов составляют КА, из которых активно функционируют только 6%; 11% составляют ступени ракет-носителей (РН) и разгонные блоки (РБ); 5% операционные элементы, образовавшиеся в процессе выведения КА на рабочие орбиты. Основная часть каталогизированных космических объектов (64%) является продуктами разрушения КА, РН, РБ [1]. На рис. 1 представлена зависимость концентрации каталогизированных объектов по высоте. Как видно из графика, максимальное значение концентрации достигается в области НОО.

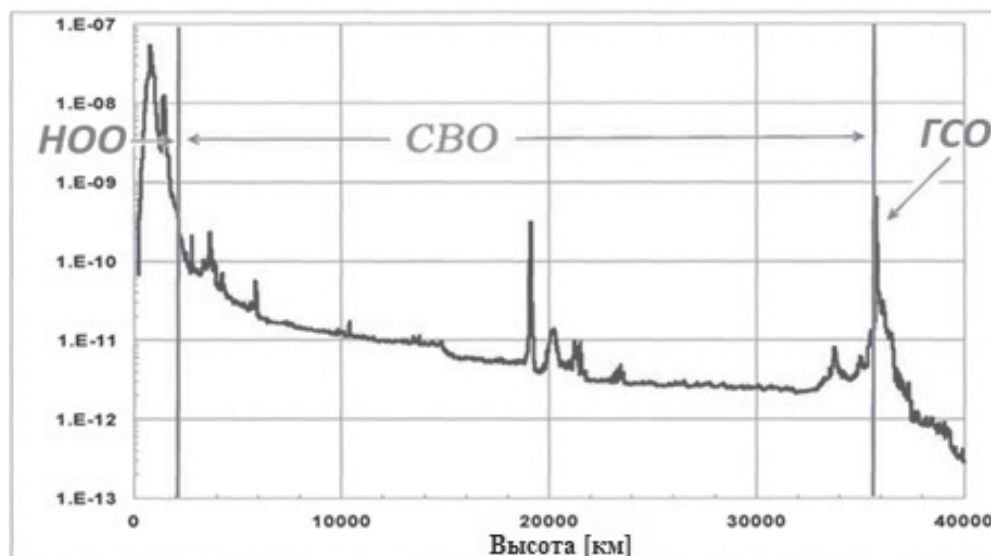


Рис. 1. Распределение концентрации каталогизированных объектов в различных областях ОКП

Теоретические исследования по методам «принудительного» увода нефункционирующих объектов из ОКП в разных странах ведутся уже более десяти лет. На сегодняшний день все способы очистки космического пространства от объектов КМ можно условно разделить на три большие группы:

- торможение объектов космического мусора с низким перигеем орбиты с последующим сторанием КМ в атмосфере Земли или падением в малонаселённых районах;

- разгон или изменение направления вектора скорости КМ на орбитах с высоким перигеем для увода его на орбиту захоронения;

- уничтожение или дробление КМ различными техническими средствами (без угрозы техногенного засорения).

В настоящее время проводится большое количество работ по исследованию различных методов очистки [1], однако перед началом реализации данных операций необходимо обоснование эффективности влияния применения активного удаления КМ на долгосрочную устойчивость и снижение техногенного засорения. Решение данной задачи проводится в рамках работы Межагентского координационного комитета по космическому мусору. Цель исследования: анализ эффективности влияния активного удаления крупных объектов на техногенное засорение области НОО космическим мусором размером более 10 см.

2. Модель и методика

Для решения поставленной задачи была разработана методика, основным элементом реализации которой является статистическая модель КМ, разработанная А.И. Назаренко [2].

В качестве исходной информации используются следующие параметры всех объектов размером более 10 см в заданный момент времени: тип объекта: РБ, КА, крупный операционный мусор (ОМ), КМ; масса объекта; диаметр объекта; характерная площадь объекта; большая полуось; эксцентриситет; наклонение.

Основной проблемой использования статистической модели КМ для оценки эволюции техногенного засорения с учетом активного удаления является то, что техногенное засорение полностью описывается с помощью статистических распределений. Так как в качестве объектов для удаления выступает относительно малое, по сравнению с общей популяцией КМ, количество объектов, соответствующих определенным требованиям, то согласно критерию удаления целесообразным является выделение из общего множества рассматриваемых в исследовании объектов X подмножества объектов ADR ,

к которым может применяться операция активного удаления. Аналогичным образом из множества всех объектов можно выделить подмножество новых запускаемых объектов NEW , к которым применяются меры по ограничению техногенного засорения. Таким образом, все множество объектов X будет состоять из трех подмножеств: D — космический мусор; ADR — объекты, к которым может быть применена операция активного удаления; NEW — новые запущенные объекты, относительно которых рассматриваются меры по ограничению техногенного засорения:

$$X = D \cup ADR \cup NEW. \quad (1)$$

Множество X будем описывать с использованием статистической модели КМ и предусмотренных в ней распределений для решения задач оценки количества взаимных столкновений и последствий столкновений [2,3].

Подмножества ADR и NEW будем описывать дополнительно с использованием полной информации о каждом объекте, аналогично подходу с «поштучным» описанием [4, 6].

Прогнозирование орбитальной эволюции объектов из подмножества D будем осуществлять с использованием методики статистической модели КМ [2].

Прогнозирование эволюции по времени подмножеств ADR и NEW будем осуществлять с использованием «поштучного» описания, т.е. каждый объект из данных подмножеств будет описываться полным набором параметров, и его орбитальная эволюция будет рассчитываться с использованием численного прогнозирования [4, 6]. Учет активного удаления и мер по ограничению КМ происходит при удалении объектов из подмножеств ADR и NEW и как следствие — из общего множества X .

То есть особенность методики заключается в разделении всего множества объектов на три группы таким образом, чтобы в процессе моделирования по времени можно было использовать статистическую модель КМ, что позволит сократить трудоемкость вычислений и учитывать активное удаление КМ. Данная методика была реализована в виде программно-математического комплекса с использованием моделей, представленных в работах [1–3, 6].

3. Результаты и сравнительный анализ

В рамках Межагентского координационного комитета по космическому мусору в 2013 г. была утверждена работа по оценке эффективности влияния активного удаления космического мусора на состояние техногенного засорения в области НОО,

в которой принимают участие девять космических агентств.

Основной целью исследования являются количественная оценка эффективности использования активного удаления КМ для управления будущим состоянием техногенного засорения в области НОО и разработка технических основ для обоснования требований по активному удалению КМ.

В рамках данной работы были утверждены основные исходные данные. Используются три базовых сценария, в которых учитываются регулярные запуски новых объектов и соответствие 30 %, 60 %, 90 % из них правилу 25 лет (новые запускаемые объекты должны быть уведены из области НОО либо сразу по окончании функционирования, либо должны быть переведены на орбиты со сроком орбитального существования не более 25 лет; далее по тексту будем обозначать этот факт П25, англ. — PMD). Для оценки эффективности активного удаления КМ (англ. — ADR) выбраны три значения количества уводимых в год объектов: два, пять, восемь объектов в год с наибольшим значением произведения массы объекта на вероятность столкновения.

Базовый сценарий включает в себя следующие положения:

1) исходные данные о количестве объектов размером более 10 см, представлены Европейским Космическим Агентством (ЕКА) на 1 января 2013 г.;

2) запуски новых объектов дублируют 8-летний цикл запусков с 1 января 2005 г. по 1 января 2013 г., который повторяется циклически при прогнозе; данные об объектах представлены ЕКА;

3) для новых запущенных КА задано время функционирования — 8 лет;

4) 30%, 60 %, 90 % из новых запускаемых объектов соответствуют правилу 25 лет;

5) взрывов не происходит;

6) маневры уклонения от столкновений не производятся;

7) в столкновениях участвуют все объекты размером более 10 см;

8) за исключением положений, описанных в сценарии, могут применяться любые модели, которые будут сочтены нужными;

9) прогноз осуществляется на 200 лет.

Сценарий активного удаления КМ:

1) активное удаление КМ начинается с 2025 года;

2) критерий выбора объектов для удаления:

А) исключаются функционирующие КА;

Б) исключаются объекты с высотой перигея более 2000 км;

В) исключаются объекты со значением эксцентриситета более 0,5;

Г) исключаются фрагменты;

Д) исключаются РБ и КА со сроком орбитального существования менее 25 лет;

Е) выбираются объекты с максимальным значением произведения массы на вероятность столкновения;

Ж) удаляются два, пять, восемь объектов в год.

Всего с учетом изложенных выше положений рассматривается 12 сценариев:

— без удаления 30%; 60%; 90% PMD;

— с удалением:

ADR 2 объекта + 30%; 60%; 90% PMD;

ADR 5 объектов + 30%; 60%; 90% PMD;

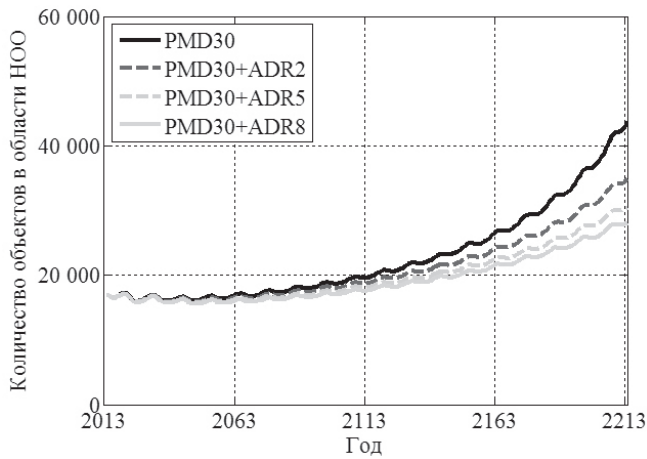
ADR 8 объектов + 30%; 60%; 90% PMD.

В качестве результатов моделирования выступают: зависимость математического ожидания количества объектов в области НОО размером более 10 см по годам на интервале прогнозирования, с разбиением его по типам объектов (все, текущий КМ, РБ+РН+ОМ, новый КМ) и оценкой среднеквадратическое отклонение данного количества, оценка концентрации КМ по высоте для определенных моментов времени, оценка количества взаимных столкновений, произошедших к заданному году, оценка районов взаимных столкновений, оценка областей увода КМ из области НОО.

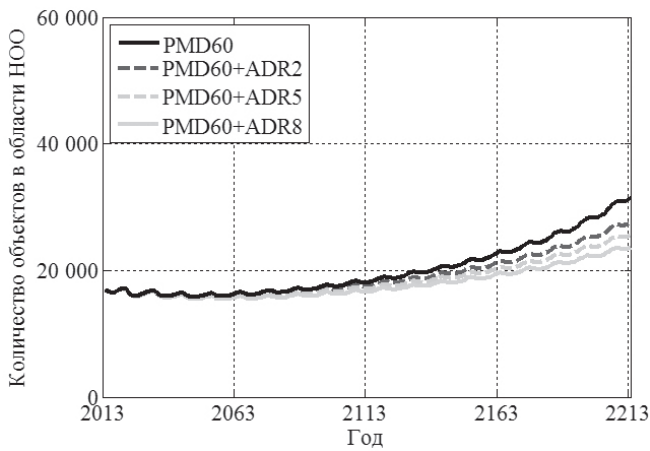
Далее рассмотрим основные результаты расчетов, полученные с использованием разработанной методики по 12 сценариям данного исследования. На рис. 2—4 представлены зависимости средних значений количества объектов размером более 10 см, столкновений, произошедших к заданному году, концентрации объектов размером более 10 см по высоте в конечный момент времени прогноза для всех сценариев.

Из графиков рис. 2—4 видна явная зависимость изменения среднего количества объектов и количества столкновений в долгосрочной перспективе в зависимости от принимаемых мер по ограничению техногенного засорения и количества удаляемых объектов. Из данных результатов можно сделать следующие выводы: соблюдение мер ограничения в чистом виде не позволит стабилизировать уровень техногенного засорения, удаление пяти и более объектов позволит снизить и стабилизировать уровень техногенного засорения объектами размером более 10 см в долгосрочной перспективе.

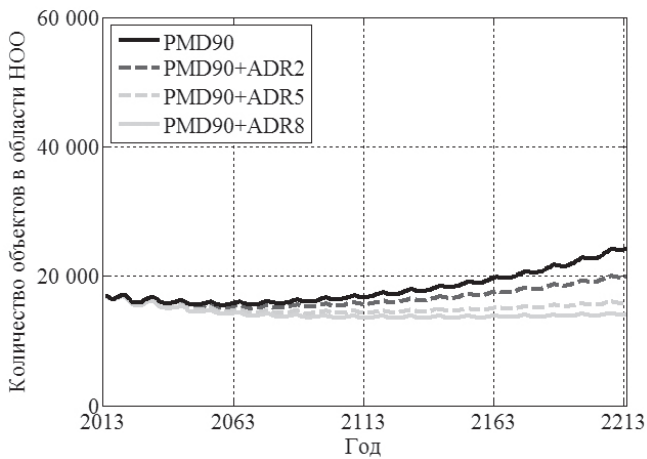
На рис. 5 представлены результаты моделирования других участников работы. Результаты расчетов по разработанной методике с использованием статистической модели КМ хорошо согласуются с полученными по другим методикам, однако



А)



Б)

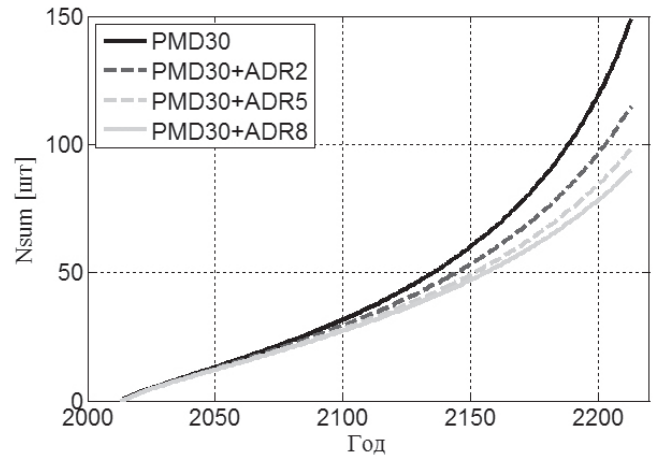


В)

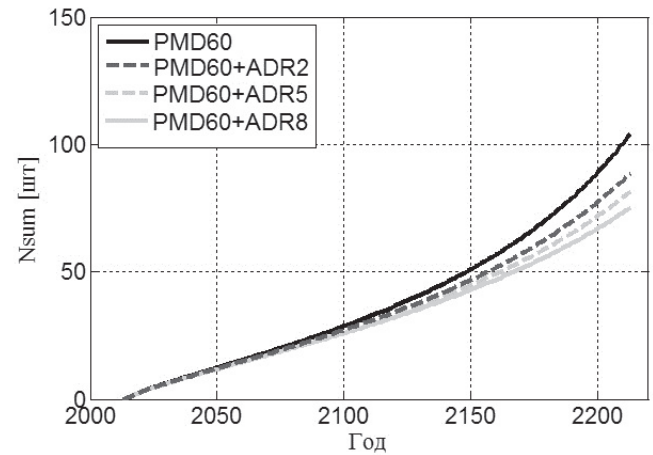
Рис. 2. Результаты оценки эволюции техногенного засорения области НОО по годам для 12 сценариев

следует отметить достаточно большой разброс полученных результатов.

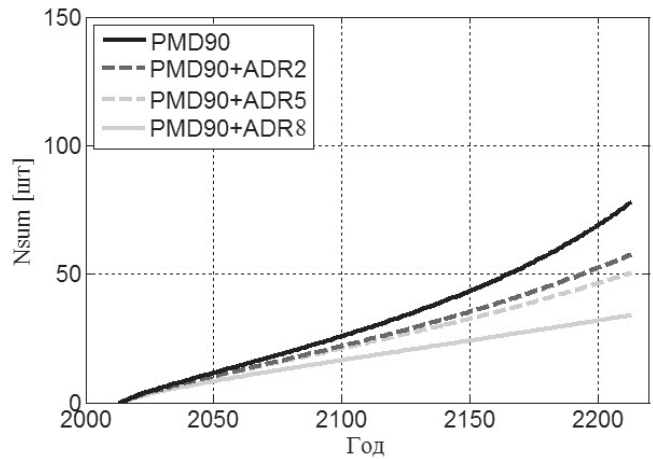
На рис. 6 представлены результаты прогнозирования, полученные с использованием только статистической модели КМ [2] для двух сценариев: с запусками на исторически среднем уровне и без



А)



Б)



В)

Рис. 3. Суммарное количество столкновений, произошедших к заданному году, для 12 сценариев

запусков. Как видно из сравнения с графиками на рис. 2, результаты, полученные с учетом различных мер по ограничению и снижению КМ, лежат в промежутке между двумя граничными сценариями, что говорит о хорошей согласованности проведенных расчетов.

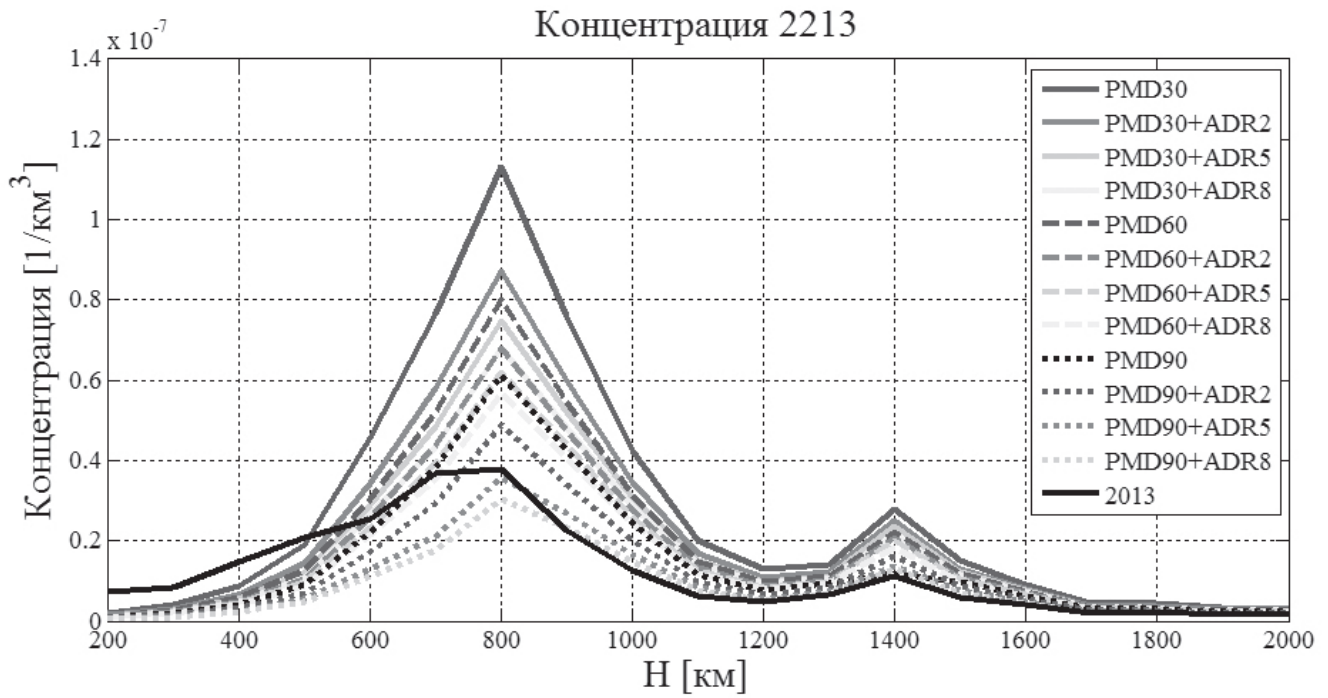


Рис. 4. Зависимость концентрации космических объектов размером более 10 см в 2213 г. от высоты для 12 сценариев

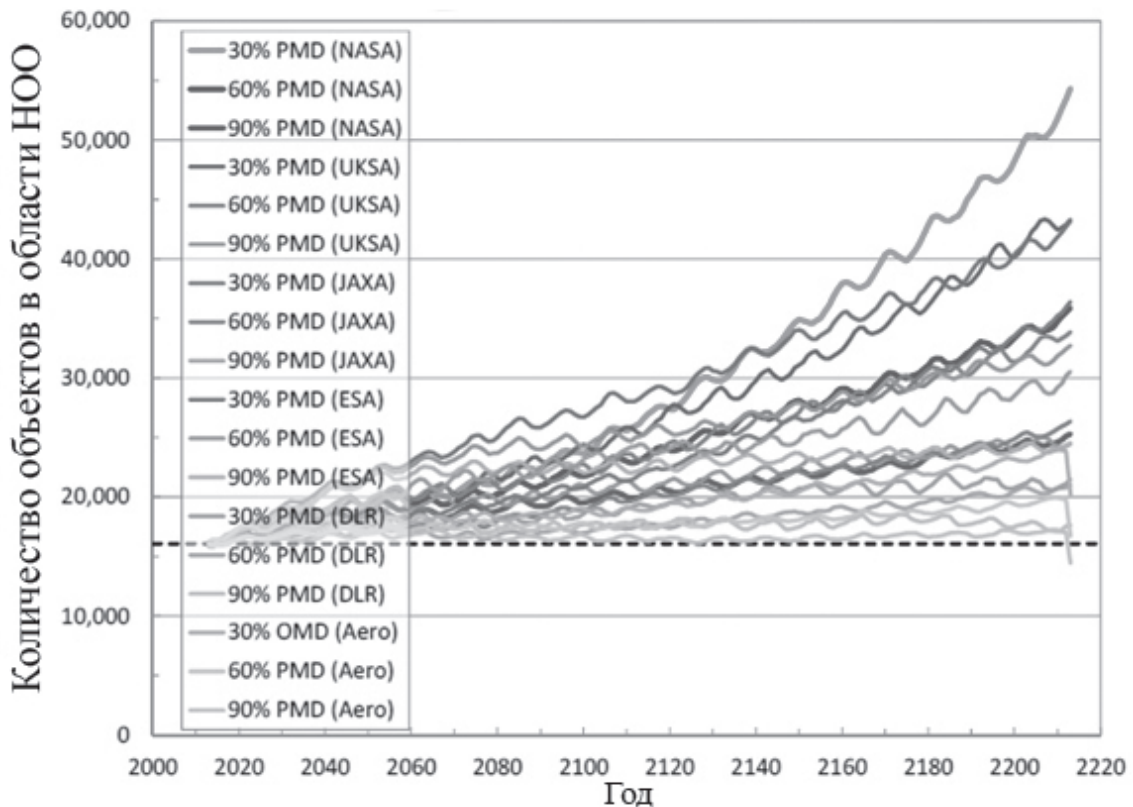


Рис. 5. Результаты оценки эволюции техногенного засорения НОО по годам для сценариев без активного удаления, полученные другими участниками работы

В каждом расчете, с учетом активного удаления, для разных сценариев сохранялась информация об удаляемых объектах на всем интервале моделирования. С использованием данных об удаляемых

объектах был проведен их анализ на предмет выявления потенциальных районов для активного удаления КМ. На рис. 7 представлена нормированная зависимость количества удаленных на интер-

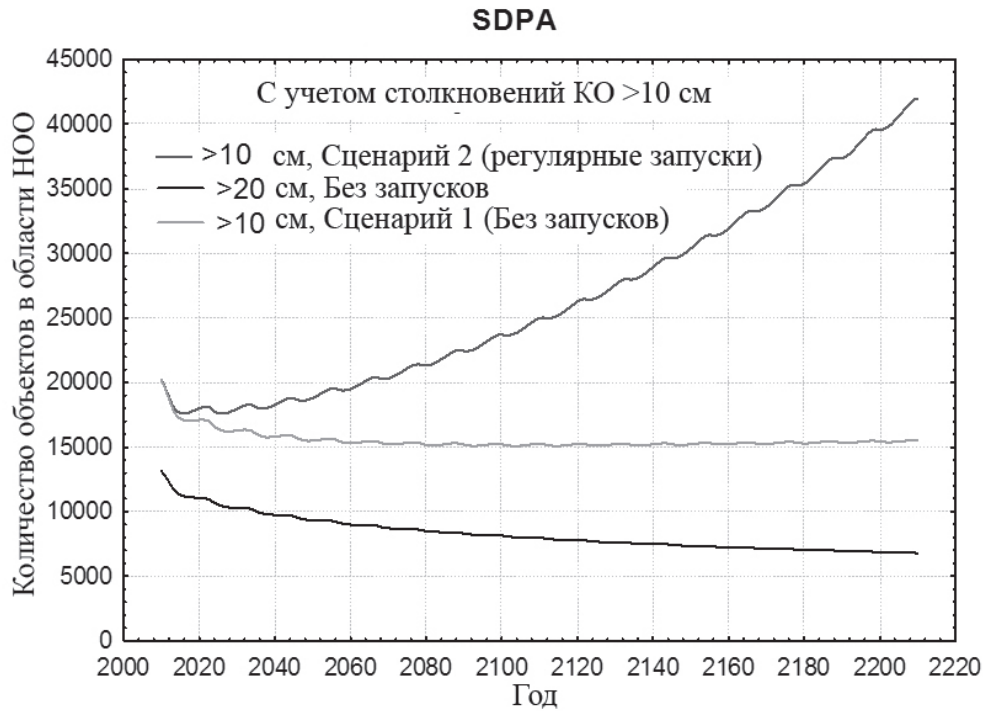


Рис. 6. Результаты прогноза по статистической модели КМ

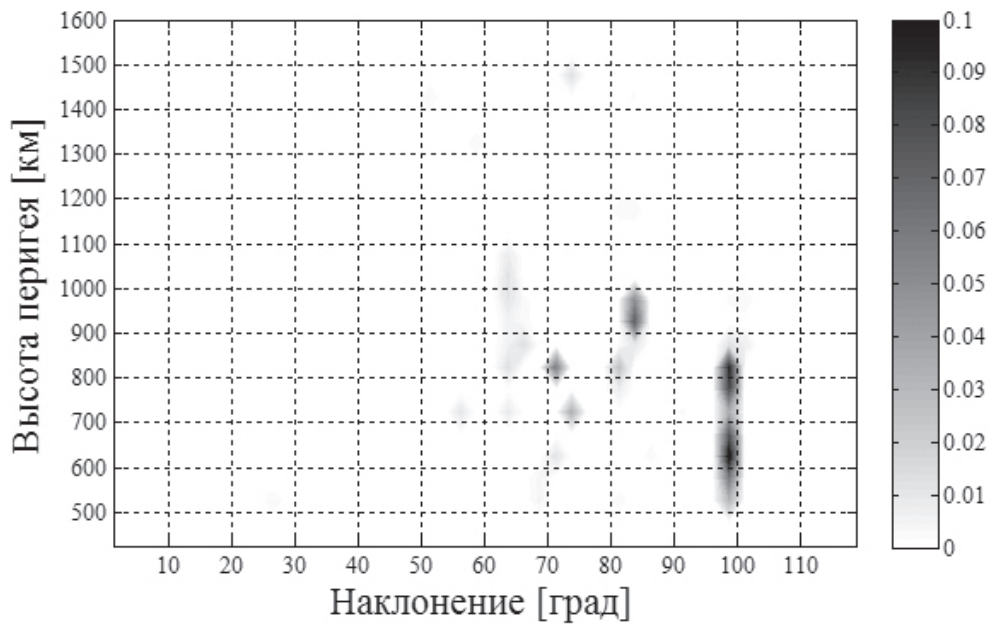


Рис. 7. Нормированная зависимость среднего количества удаленных на интервале прогноза объектов от высоты перигея и наклоения по сценариям с активным удалением

вале прогноза объектов от высоты перигея и наклоения по всем сценариям с активным удалением.

Можно выделить несколько областей, в которых необходимо в первую очередь проводить активное удаление КМ. Высота и наклонение удаляемых объектов зависят от мер по ограничению техногенного засорения и количества уводимых в год объектов, однако на основании результатов расчета по исследуемым сценариям можно выделить три об-

ласти по высотам и наклоениям, для которых активное удаление КМ наиболее актуально в настоящее время:

- 1) $h = 800 \div 850$ км, $i = 71,25^\circ$;
- 2) $h = 650 \div 800$ км, $i = 98,75^\circ$;
- 3) $h = 900 \div 950$ км, $i = 83,75^\circ$.

На рис. 8 представлены результаты анализа 500 объектов с наибольшим значением произведения массы на вероятность столкновения по данным

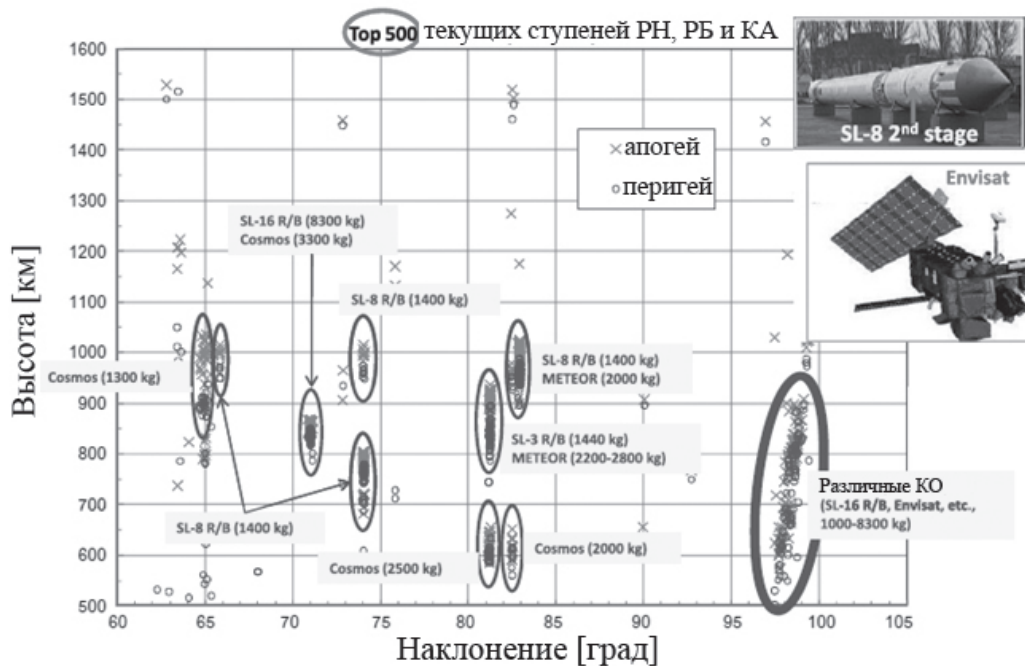


Рис. 8. Результаты анализа 500 объектов с наибольшим произведением значений массы на вероятность столкновения

работы [4]. Сравнение графиков на рис. 7 и 8 показывает хорошее соответствие полученных результатов с результатами аналогичных исследований.

Выводы

В результате проведенных исследований разработаны методика оценки эволюции техногенного засорения области НОО с учетом активного удаления КМ и программно-математическое обеспечение для решения данной задачи. Проведены оценка эволюции техногенного засорения области НОО объектами размером более 10 см с учетом активного удаления КМ и сравнение разработанной методики с аналогами в рамках Межагентского координационного комитета по космическому мусору. Анализ результатов показал, что для снижения техногенного засорения области НОО в долгосрочном периоде необходимо удалять не менее пяти крупных объектов в год, однако об эффективности влияния активного удаления КМ на долгосрочную эволюцию КМ можно будет судить спустя десятки лет.

Выявлены области, в которых необходимо проводить операции активного удаления КМ в первую очередь:

- 1) $h = 800 \div 850$ км, $i = 71,25^\circ$;
- 2) $h = 650 \div 800$ км, $i = 98,75^\circ$;
- 3) $h = 900 \div 950$ км, $i = 83,75^\circ$.

Следует отметить, что продолжением представленной работы должны стать расширение исследуемых сценариев и оценка влияния неопределенностей на результаты прогнозирования.

Библиографический список

1. Райкунов Г.Г. Космический мусор. — М.: Физматлит, 2014. — Кн. 1. — 284 с., кн. 2. — 187 с.
2. Назаренко А.И. Моделирование космического мусора. — М.: ИКИ РАН, 2013. — 216 с.
3. Смирнов Н.Н. Эволюция «космического мусора» в околоземном космическом пространстве // Успехи механики МГУ. 2002. Т. 1. № 2. С. 37-104.
4. Liou J.-C., Johnson Nicholas L. A sensitivity study of the effectiveness of active debris removal in LEO // Advances in Space Research, 2011, no. 47, pp. 1865-1876.
5. Kessler D.J. Collisional cascading the limits of population growth in low Earth orbit // Advances in Space Research, 1991, vol. 11, no. 12, pp. 63-66.
6. Klinkrad H. Space debris. Models and risk analysis. — Springer, UK, 2006. — 430 p.

METHODOLOGY OF EVOLUTION OF TECHNOGENIC POLLUTION ASSESSMENT OF LOW EARTH ORBITS WITH REGARD TO MUTUAL COLLISIONS AND ACTIVE SPACE DEBRIS REMOVAL

Usovik I.V.*, Darnopykh V.V.***, Malyshev V.V.***

Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

* e-mail: usovikiv@mail.ru

** e-mail: darnopykh@mail.ru

*** e-mail: VeniaminMalyshev@yandex.ru

Abstract

Space debris (SD) creates more and more problems for the spacecraft operating in low earth orbits (LEO). At present experts worldwide come to the conclusion that there the need to «clean up» near-Earth space environment from space debris becomes urgent. However, now there is no adequate substantiation of active SD removal effectiveness impact on technogenic pollution evolution. Thus, the efforts concerning the evaluation of active removal of large SD objects effectiveness impact on long-term technogenic pollution of LEO region are carried out within the framework of Inter-Agency Coordination Committee on Space Debris activities. The paper presents the results of the developed methodology as a part of these activities

The major element of the methodology is a statistical model of SD developed by A. I. Nazarenko. We suggest to describe the whole set of objects X as a set of objects described by three subsets: D - debris, ADR - the objects that can be subjected to the operation of the active removal, NEW - new launched objects with respect to which we consider technogenic pollution limitation measures. To solve the problems of mutual collisions and impacts of the collisions we shall describe the set X using a statistic SD model and multitudes specified in it. The subsets ADR and NEW will be described additionally using complete information on every object with a “single-piece” description. Prediction of orbital evolution of objects from the subset D will be carried out using methodologies of statistical model SD, the subsets ADR and NEW with prediction of the orbital parameters of each object. Accounting of active removal and SD limiting measures occurs while deleting objects from the subsets ADR and NEW, and as a consequence from the total set X.

Analysis of the results of implementation of the developed methodology showed that for technogenic pollution of LEO region reduction in the longer term at least 5 large objects a year should be removed. However, the impact of the effectiveness of the SD active

removal on long-term evolution of SD would be estimated in the decades to come. The obtained results agree well with those of other researchers.

We identified the areas in which it is necessary to carry out the operation of the SD active removal in the first place:

- 1) $h = 800 \div 850$ km, $i = 71,25^\circ$;
- 2) $h = 650 \div 800$ km, $i = 98,75^\circ$;
- 3) $h = 900 \div 950$ km, $i = 83,75^\circ$.

Keywords: space debris, modeling, prediction of space debris, mutual collisions, active debris removal.

References

1. Raikunov G.G. *Kosmicheskii musor* (Space debris), Moscow, FIZMATLIT, 2014, vol. 1 - 284 p., vol. 2 - 187 p.
2. Nazarenko A.I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora* (Space debris modeling), Moscow, IKI RAN, 2013, 216 p.
3. Smirnov N.N. *Uspekhi mekhaniki MGU*, 2002, vol.1, no. 2, pp. 37-104.
4. Liou J.-C., Johnson Nicholas L. A sensitivity study of the effectiveness of active debris removal in LEO, *Advances in Space Research*, 2011, no. 47, pp. 1865-1876.
5. Kessler D.J. Collisional cascading the limits of population growth in low Earth orbit, *Advances in Space Research*, 1991, vol. 11, no. 12, pp. 63-66.
6. Klinkrad H. *Space debris. Models and risk analysis*. Springer, UK, 2006, 430 p.