

УДК 629.76/78-027.45:502.17

**С. С. Вениаминов<sup>1</sup>, И. И. Олейников<sup>2</sup>, Е. К. Мельников<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Научно-исследовательский испытательный центр  
Центрального научно-исследовательского института  
Войск воздушно-космической обороны Министерства обороны Российской Федерации  
ул. Осташковская 12а, Москва, Россия, 129327  
sveniami@gmail.com

<sup>2</sup>Баллистический центр Федерального государственного унитарного предприятия  
«Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»  
ул. Пионерская 4, Королев, Московская область, Россия, 141070

## **Показатели роста угрозы космической деятельности со стороны космического мусора и меры обеспечения ее безопасности**

*Интенсивное освоение космоса, часто сопровождавшееся разрушением космических аппаратов (КА), привело к значительному засорению околоземного космического пространства. Столкновение КА, относительные скорости движения которых на околоземных орбитах могут достигать 17.5 км/с, приводит к катастрофическим последствиям, в особенности для функционирующих КА. Особое беспокойство вызывают пилотируемые КА, в частности Международная космическая станция. На примере ее функционирования продемонстрирована интенсивность засорения космического пространства и меры обеспечения безопасности ее полета.*

*ПОКАЗНИКИ РОСТУ ЗАГРОЗИ КОСМІЧНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ З БОКУ КОСМІЧНОГО СМІТТЯ І ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇЇ БЕЗПЕКИ, Веніамінов С. С., Олейников І. І., Мельников Є. К. — Інтенсивне освоєння космосу, часто пов'язане з руйнуванням космічних апаратів (КА), призвело до значного засмічення навколоземного космічного простору. Зіткнення КА, відносні швидкості яких на навколоземних орбітах можуть сягати 17.5 км/с, призводить до катастрофічних наслідків, особливо для діючих КА. Особливе занепокоєння викликають пілотовані КА, зокрема Міжнародна космічна станція. На прикладі її функціонування продемонстровано інтенсивність засмічення космічного простору і заходи забезпечення безпеки її польоту.*

*INDICES OF GROWTH OF DANGER FOR SPACE ACTIVITIES FROM ORBITAL DEBRIS AND THE RELATED MITIGATION MEASURES, by Veniaminov S. S., Oleynikov I. I., Melnikov E. K. — Intensive mastering of near-earth space often followed by breakups of spacecraft has led to its significant and progressive contamination. Investigation of this problem seems to be of current importance. Collision of space objects (SO), their relative velocities reaching up to 17.5 km/s, implies catastrophic consequences, especially for active SOs. A special trouble is caused concerning the piloted spacecraft, in particular for International Space Station (ISS). In this paper, taking ISS as an example, the dangerous progressive growth of near space is shown.*

В феврале 2009 г. на высоте 800 км столкнулись действующий американский спутник связи «Иридиум-33» и нефункционирующий российский КА «Космос-2251». В результате соударения КА распались более чем на 2500 фрагментов космического мусора (КМ) размером свыше 10 см [1], которые в последующие годы явились причиной десятков нарушений зоны безопасности МКС и других КА. В ближайшие годы произошли и другие аналогичные катастрофические события, информация о которых представлена на рис. 1—3.

Современные средства контроля космического пространства (СККП) обеспечивают, как правило, каталогизацию объектов размером не менее 10 см, хотя наблюдать и отслеживать могут и более мелкие объекты. Модули МКС, используемые для работы экипажа, имеют защитные экраны, позволяющие парировать столкновения с частицами размером до 1—2 см. Во избежание столкновения с объектами (КО риска) размером более 10 см проводятся маневры уклонения МКС.

Количество фрагментов разрушенных КА размером от 1 до 10 см оценивается величиной от 100000 до 600000. Эти объекты представляют наибольшую опасность для МКС, поскольку в настоящее время

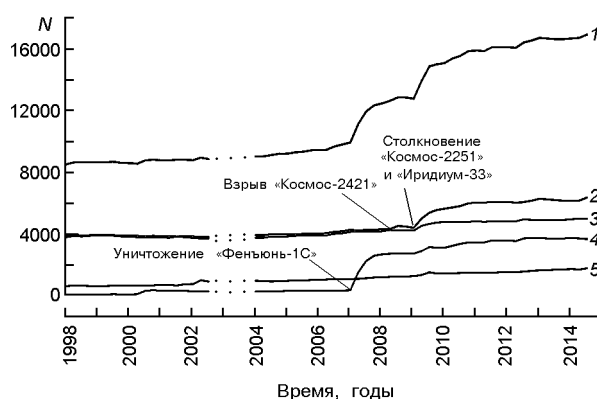


Рис. 1. Изменение количества  $N$  каталогизированных космических объектов в течение периода функционирования МКС

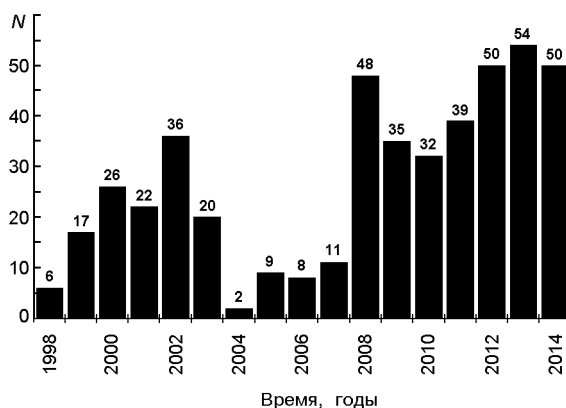


Рис. 2. Динамика количества  $N$  поступивших в ЦУП уведомлений о нарушении зоны безопасности МКС со стороны космического мусора

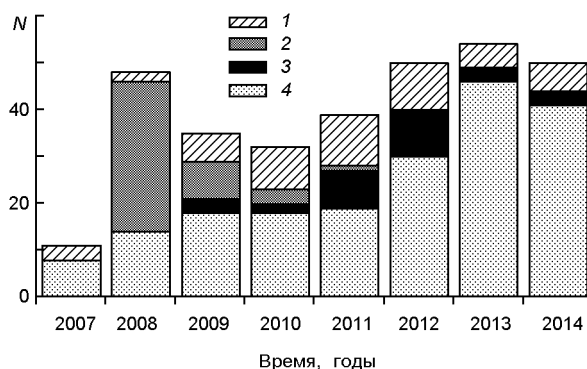


Рис. 3. Корреляция количества  $N$  опасных сближений МКС с космическим мусором и известных разрушений КА: 1 — разрушение КА «Феньюнь-1С» в январе 2007 г. ( $H = 850$  км, 3428 фрагментов), 2 — разрушение КА «Космос-2421» в июне 2008 г. ( $H = 390$  км, 509 фрагментов), 3 — разрушение КА «Иридиум» и «Космос-2251» в феврале 2009 г. ( $H = 600$  км, 628 + 1668 фрагментов), 4 — остальные КО

нет эффективных мер защиты от них, а современные СККП пока не в состоянии их обнаруживать и устойчиво сопровождать [1, 2].

**Безопасность полета МКС и вероятность столкновения с космическим мусором.** В настоящее время МКС является практически единственным космическим объектом, в интересах безопасности полета которого в условиях техногенного засорения околоземного космического пространства (ОКП) отрабатываются принципы экстренного взаимодействия между группами управления объектом, включая зарубежных партнеров.

К началу функционирования МКС в Центре имени Л. Джонсона был накоплен десятилетний опыт оценок угрозы соударения космического мусора при полётах шаттлов, который был с некоторыми коррекциями распространён на программу полёта МКС. В частности, для МКС была принята зона безопасности размерами  $\pm 2 \pm 25 \pm 25$  км

**Оценки снижения риска столкновения при проведении манёвров уклонения**

Порог уклонения, $P_c$	Годовой показатель количества уклонений	Годовой показатель вероятности столкновения	Сокращение годового показателя риска
—	0	$6.5 \cdot 10^{-4}$	—
$10^{-3}$	0.2	$1.5 \cdot 10^{-4}$	78 %
$3 \cdot 10^{-4}$	0.4	$10 \cdot 10^{-4}$	82 %
$10^{-4}$	1.2	$8 \cdot 10^{-5}$	86 %
$10^{-5}$	3	$6 \cdot 10^{-5}$	89 %

(по нормали, по трансверсали и по бинормали соответственно относительно центра масс станции).

По состоянию засоренности космического пространства в конце восьмидесятых годов в НАСА на основе статистического анализа были проведены исследования по сокращению риска столкновения [3]. Результаты оценок снижения риска, позволившие выбрать пороговое значение вероятности столкновения, представлены в таблице.

Как следует из таблицы, без проведения манёвров уклонения годовой показатель вероятности столкновения МКС с отслеживаемым мусором составляет приблизительно  $6.5 \cdot 10^{-4}$ . Указанную вероятность столкновения можно сократить приблизительно до  $8 \cdot 10^{-5}$  за счёт выполнения уклонения примерно один раз в год. Этого можно добиться, выбрав в качестве порога уклонения значение вероятности  $10^{-4}$  («красная зона»).

Расчёты показали, что при данном значении порога устраняются 86 % от общегодового показателя риска столкновения с отслеживаемыми объектами.

С 1991 г. по настоящее время НАСА проводит работы по развитию программных средств, форматов обмена информацией, усовершенствованию процесса обслуживания каталога космических объектов риска и оценке опасных сближений [3].

***Правила полета для обеспечения безопасности полета МКС.***

Безопасность экипажа и конструкций станции занимает особое место при реализации программы полета МКС. Встречи с КО риска, пересекающими траекторию движения МКС, способны не только вывести МКС из строя, но и привести к катастрофическим последствиям. В настоящее время единственным способом избежать столкновения является проведение упреждающего маневра уклонения.

В рамках решения этой проблемы российской и американской сторонами с привлечением специалистов стран-участниц были разработаны и постоянно уточняются организационные, методологические и технические вопросы, детали которых отражены в соответствующих документах, согласно которым ответственность по контролю нарушения зоны безопасности станции возложена на американскую сторону. Российская сторона обеспечивает техническую реализацию маневра

уклонения средствами российского сегмента, в составе которого имеются двигательные установки и который постоянно снабжается топливом. Основными задачами российского Центра управления полетами в Москве (ЦУП-М) и американского Центра управления полетами в Хьюстоне (ЦУП-Х), ответственных за безопасность полета МКС, являются:

- анализ степени риска в опасных ситуациях сближений;
- сбор и систематизация информации по опасным сближениям космического мусора с МКС;
- разработка оперативного плана проведения маневра уклонения, графика взаимодействия и обмена информацией между оперативными группами ЦУП-М и ЦУП-Х;
- проведение баллистических расчетов и отработка программы управления на средствах наземного комплекса;
- реализация манёвра уклонения.

Для отслеживания космического мусора, проходящего вблизи МКС, в настоящее время принята зона безопасности  $\pm 2 \pm 25 \pm 25$  км (иногда зона может немного корректироваться в каждом ЦУПе). В случае, если КО риска, согласно прогнозу орбитального движения, нарушает зону безопасности МКС  $\pm 0.75 \pm 25 \pm 25$  км (упредительная зона), ЦУП-Х должен уведомить о ее нарушении руководителя полетов и ЦУП-М.

Понятие порога вероятности соударения учитывает не только прогнозируемые параметры движения МКС и КО риска, но и возможные погрешности их определения, и является одним из основных факторов при принятии решений о необходимости проведения маневров уклонения. В настоящее время используются следующие пороги вероятности:

- «желтый» порог — достаточно высокая вероятность столкновения (от  $10^{-5}$  до  $10^{-4}$ ), при которой желательно проведение маневра уклонения;
- «красный» порог — очень высокая вероятность столкновения (выше  $10^{-4}$ ), при которой обязательно проведение маневра уклонения, если это не влечет повышения риска для экипажей или МКС;
- рассматривается необходимость введения «черного» порога — критической вероятности столкновения (выше  $10^{-2}$ ).

***Критерии принятия решения о проведении маневра уклонения.***

Принятие решения об уклонении должно основываться на анализе степени и последствий нарушения порогов вероятности по сравнению с последствиями выполнения маневра. В соответствии с Правилами полета манёвры уклонения выполняются при следующих условиях:

1) нарушение «жёлтого» порога, если выполнение маневра не влечет за собой значительных последствий для проведения операций или реализации задач полета.

2) нарушение «красного» порога, если в результате выполнения манёвра не произойдёт повреждения оборудования МКС, не потребу-

ется проведения дополнительного выхода в открытый космос и не будет других значительных последствий для выполнения операций, которые повышают общий риск для присутствующих или будущих экипажей или кораблей.

Если нарушается «красный» порог, но уклонение не проводится, то экипаж должен перейти в корабль-спасатель.

**Требования к маневру уклонения.** В случае необходимости проведения маневра уклонения его параметры должны быть выбраны исходя из следующих требований.

1. Манёвр уклонения от КО риска оказывает значительное воздействие на планируемые операции МКС, поэтому должна быть определённая гарантия, что следующий подобный манёвр не придётся выполнять немедленно за ним. При уклонении необходимо обеспечить в течение последующих 48 ч отсутствие нарушений зоны безопасности МКС. Как правило, все маневры уклонения проводятся в направлении на разгон, за исключением случаев, когда проведение такого маневра нарушает баллистические правила и ограничения на орбиту или разгонный импульс запрещён из-за ограничений, связанных с операциями.

2. Во избежание дублирования операций, а также ограничения вторжения в операции, связанные с полезной нагрузкой в условиях микрогравитации, желательно совместить задачи уклонения и формирования орбиты для будущих полетов транспортных кораблей (ТК) в случае, если ближайший маневр формирования орбиты планируется вскоре после маневра уклонения.

**Режимы уклонения МКС от космического мусора.** Безопасность орбитального движения пилотируемой МКС в условиях техногенного засорения ОКП относится к наиболее важным задачам, решаемым баллистико-навигационной службой.

Подготовка к проведению маневра уклонения станции осуществляется при тесном взаимодействии специалистов российского и американского Центров управления с выполнением следующей последовательности операций:

1) операторы Стратегического командования Вооруженных Сил США (USSTRATCOM) выявляют случаи нарушения зоны безопасности МКС объектами «КО риска» за двое-трое суток до сближения и периодически передают в ЦУП-Х моменты сближения, векторы состояния и ковариационные матрицы для МКС и «КО риска»;

2) ответственный по траекторным операциям в ЦУП-Х (ТОРО) вычисляет вероятность соударения и извещает группы управления полетом ЦУП-Х и ЦУП-М о прогнозируемом нарушении зоны безопасности станции, если величина промаха соответствует попаданию «КО риска» внутрь зоны  $\pm 0.75 \pm 25 \pm 25$  км или если вероятность столкновения  $P_c > 10^{-6}$ ;

3) баллистики ЦУП-М (Баллистический центр Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-ис-

следовательский институт машиностроения») разрабатывают схему уклонения станции от «КО риска» и передают ТОРО параметры маневра уклонения, способ реализации и вектор состояния скорректированной орбиты (номинальное время включения двигателей — за 1.5 витка до момента опасного сближения (ТСА — Time of Closest Approach));

4) ТОРО проводит контроль безопасного движения станции в следующие 48 ч после уклонения и готовит запрос на перепланирование программы полета (PPCR — Planning Product Change Request), если вероятность соударения  $P_c > 10^{-5}$ ;

5) баллистики ЦУП-М передают согласованные с ТОРО данные на уклонение станции в оперативную группу планирования не позднее, чем за ТСА — 15 ч.

Приведенная последовательность операции подготовки к уклонению станции соответствует «номинальному» оповещению об опасном сближении, при котором запрос PPCR поступает в ЦУП-М не позднее чем за 28.5 ч до ТСА. Описанный режим уклонения получил наименование DAM (Debris Avoidance Maneuver).

Режим уклонения DAM имеет существенный недостаток: длительный процесс подготовки к реализации импульса, включающий перепланирование программы полета, вследствие чего решение о подготовке к уклонению должно быть принято не позднее чем за 28.5 ч до ТСА.

В условиях роста засоренности ОКП в конце 2012 г. был дополнительно разработан новый режим уклонения — PDAM (Predetermined Debris Avoidance Maneuver), т. е. заранее определенный маневр уклонения МКС. Реализацию данного маневра можно осуществить, если заявка PPCR поступит в ЦУП-М не позднее, чем за 5 ч 20 мин до ТСА. Снижение времени подготовки к уклонению станции в данном режиме достигается за счет максимальной унификации параметров маневра уклонения. В частности, значения величины импульса строго определены и внесены в бортовое программное обеспечение, направление коррекции должно быть близким к «дежурной» ориентации станции. На борт закладывается только время включения двигателей, которое определяется в ЦУП-Х после проведения контроля безопасности, поэтому требуются минимальные изменения программы полета в рассматриваемые сутки. Недостатком режима уклонения PDAM является ограниченная возможность реализации произвольного по величине импульса, что в общем случае требуется для сопряжения маневра увода с процессом формирования рабочей орбиты станции, необходимым для успешного проведения операций сближения и посадки российских ТК.

Независимо от американской СККП за безопасностью полета МКС наблюдают и российские средства контроля. В 2012 г. в Роскосмосе введена в опытную эксплуатацию и успешно функционирует автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях

в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП) первой очереди.

***Влияние уклонений на реализацию программы полета МКС.***

Баллистическое обеспечение программ полета станций включает в себя формирование рабочей орбиты (ФРО) станции. Параметры такой орбиты должны удовлетворять оптимальным условиям сближения российских ТК со станцией и условиям спуска возвращающихся со станции экипажей в заданные районы.

В условиях влияния сопротивления атмосферы планирование управления движением станции предусматривает решение двух независимых задач — поддержание орбиты и формирование определенных значений орбитальных параметров, удовлетворяющих требованиям программы полета станции к элементам ее орбиты. С учетом ограничения высоты полета станции, случайных вариаций плотности атмосферы и возможных уклонений МКС от космического мусора целесообразно использовать продолжительные интервалы ФРО, а управление движением станции представлять как многоэтапную задачу последовательных коррекций орбиты.

Решение задачи выбора схемы ФРО МКС сводится к определению числа коррекций орбиты и их расположения относительно операционных дат, а также распределению характеристической скорости, необходимой для поддержания орбиты станции между коррекциями.

Поскольку задача ФРО является многовариантной, исследуется все множество возможных решений задачи. Целью исследования является выбор варианта, наилучшим образом обеспечивающего поддержание орбиты МКС, требуемую точность реализации ее параметров, а также устойчивого к возмущениям орбиты, таких как маневры уклонения станции от КО риска.

Использование многоэтапной задачи ФРО позволяет реализовать маневры уклонения станции, не нарушая целевого управления ее движением.

В течение 16-летнего функционирования МКС в ЦУП-М поступило свыше 460 предупреждений о нарушении ограниченной зоны безопасности станции, из которых порядка шестидесяти КО риска в процессе их сопровождения имели вероятность столкновения больше  $10^{-4}$ .

Всего же за указанный период было реализовано двадцать уклонений МКС, причем четыре из них проводились в режиме РДАМ. Часть уклонений совмещалась с плановыми коррекциями орбиты станции. В ряде случаев после маневра уклонения использовалось дополнительное аэродинамическое торможение МКС, позволяющее «сдвинуть» положение восходящего узла орбиты станции в восточном направлении. Благодаря своевременным принятым мерам реализованные уклонения станции от КО риска не оказывали влияния на операционные даты программы полета. Однако в десятках случаев при подготовках к уклонению в режиме ДАМ, которые оказывались не востребо-



ванными в результате уточнения вероятности столкновения, осуществлялось перепланирование суточных программ полета для дат уклонения МКС и проводился анализ возможного изменения дальнейшей схемы ФРО.

**Выводы.** Увеличение частоты проведения маневров уклонения от столкновений МКС с КМ свидетельствует о росте техногенного засорения ОКП, по крайней мере в области функционирования МКС. В последние годы при проведении коррекций орбиты МКС обострились проблемы поиска безопасных орбит движения, что косвенно также указывает на значительную «захламленность» ОКП в области функционирования станции и что, в конечном счете, может привести к потере независимости космической деятельности.

1. *Вениаминов С. С.* Космический мусор — угроза человечеству. — 2-е изд., испр. и доп. / Под ред. О. Ю. Аксенова, Р. Р. Назирова. — М.: ИКИ РАН, 2013.—207 с.
2. *Мельников Е. К.* Строительство Международной космической станции (планирование и реальное состояние). — Королёв: ЦНИИмаш, 2009.—162 с.
3. *Orbital Debris: A Technical Assessment.* — Washington, D.C.: National Academies Press, 1995.—210 p.

Статья поступила в редакцию 01.12.15