

УДК 629.78

ФОРМИРОВАНИЕ ЕДИНОГО КЛАССИФИКАТОРА ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

© 2021 г. Е. А. Павлова¹ *, М. В. Захваткин¹, А. И. Стрельцов¹, В. А. Воропаев¹, Л. В. Еленин¹

¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

*elena312@gmail.com

Поступила в редакцию 08.04.2020 г.

После доработки 25.04.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

В статье обобщен практический опыт выполнения работ по предотвращению опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве (ОКП), включающий математическую постановку задачи расчета вероятности опасного сближения, работы по обнаружению потенциально опасных астероидов и общие принципы выявления опасных сближений космических объектов. Рассмотрены подходы к формированию единого классификатора опасных ситуаций в ОКП. Представлено описание составных частей классификатора в форме отдельных блоков.

DOI: 10.31857/S0023420621020084

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве (ОКП) – важный элемент при реализации целевого назначения осуществляемых космических миссий.

Интенсивное использование околоземного космоса и неразрывно связанный с этим рост числа объектов космического мусора приводит к неизбежным процессам засорения ОКП, и, как следствие, создает предпосылки к возникновению различного рода опасных ситуаций, нуждающихся в своевременном выявлении и предотвращении.

В истории зафиксированы случаи возникновения опасных ситуаций различного рода. К примеру, 10.11.2009 года один из спутников низкоорбитальной системы связи *Iridium 33* столкнулся с неработающим российским космическим аппаратом *Космос-2251*. В результате этого столкновения образовалось долгоживущее облако фрагментов космического мусора [5].

Другое событие, произошедшее 15.11.2013 года в районе Челябинска, показало, что при входе в атмосферу над густонаселенными районами Земли даже небольшого объекта (размером 15–20 м), возможны серьезные последствия для населения в виде увечий от воздействия ударной волны, причинение ущерба постройкам, а также возникновение паники из-за необъявленного события, внешне сходного с техногенной аварией либо применением ядерного оружия.

Особенностью техногенного засорения ОКП является то, что наиболее плотно объекты космического мусора локализованы в области рабочих орбит функционирующих космических аппаратов. Объекты космического мусора, перемещаясь в пределах данных орбит в разных направлениях, создают реальную опасность столкновения с действующими космическими аппаратами, пилотируемыми кораблями и *Международной космической станцией*.

В настоящее время в Российской Федерации не существует единого классификатора видов, критериев опасности, методов выявления и прогнозирования опасных ситуаций в ОКП. Практический опыт обеспечения безопасности космических полетов диктует необходимость разработки “единого формата” общения участников космической деятельности.

Для успешной организации безопасности космической деятельности в ОКП, направленной, в том числе, на предотвращение опасных ситуаций, важна систематизация возможных событий, которые могут возникнуть в околоземном космосе. По мнению авторов, упорядоченное представление о полном спектре возможных космических опасностей, способных нанести вред космической деятельности, позволит рассчитывать на появление и эффективное применение методов их парирования.

ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ В ОКП

Практические работы по анализу ситуационной обстановки в высокоорбитальной области ОКП более пятнадцати лет проводятся в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН – головной академической организации по космическому мусору [6]. Начиная с 2011 года функционирует Сегмент мониторинга опасных ситуаций в области геостационарных, высокоэллиптических и средневысоких орбит (далее – Сегмент) Автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП), созданной Госкорпорацией по космической деятельности “Роскосмос” совместно с Российской академией наук.

Сегмент предназначен для автоматизированного сбора, предварительной обработки и передачи в главный информационно-аналитический центр (ГИАЦ) системы первичной информации о событиях в ОКП, полученной от оптико-электронных средств мониторинга космического пространства. Методы и средства решения задач Сегмента направлены на обеспечение безопасности полетов т.н. “защищаемых” высокоорбитальных космических аппаратов Роскосмоса, состоящей из орбитальных группировок *ГЛОНАСС*, *Экспресс*, *Ямал*, *Электро*, *Луч*, *Спектр*. Применение специальных математических алгоритмов и современных технических решений позволило создать аппаратно-программные комплексы, обеспечивающие решение задач централизованного планирования работы оптических телескопов, получения и первичной обработки измерительной информации, прогнозирования траекторий движения космических объектов (КО), выявления опасных ситуаций и оперативного доведения информации до ГИАЦ АСПОС ОКП в АО “ЦНИИмаш”.

К настоящему времени база данных ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, хранящая первичную измерительную и баллистическую информацию, содержит записи о более чем десяти тысячах высокоорбитальных космических объектах, сопровождаемых Комплексом специализированных оптико-электронных средств АСПОС ОКП, средствами Международной сети оптических телескопов (МСОТ), координируемой ИПМ им. М.В. Келдыша РАН [9], телескопами учреждений РАН, обсерваторий-партнеров и предприятий промышленности. Ежегодный прирост числа таких объектов в базе данных отражает динамику техногенной засоренности ОКП.

Практическими основами для проведения комплексной работы по систематизации опасных ситуаций в ОКП служат наработки специалистов

ИПМ в области применения специализированных методик выявления опасных сближений, решения задач оценки вероятности столкновения космических объектов и обнаружения потенциально опасных астероидов.

Далее авторами рассматриваются общие принципы решения таких задач.

Принципы выявления опасных сближений космических объектов

Одной из ключевых задач обеспечения безопасности полетов является предупреждение событий опасных сближений функционирующих КА с объектами “риска” – действующими и нефункционирующими аппаратами, разгонными блоками, верхними ступенями ракет-носителей, операционными фрагментами и прочим космическим мусором. Проведение многолетних работ по выявлению опасных сближений позволило специалистам получить необходимый практический опыт, позволяющий сформировать основные принципы получения высокоточных решений данной задачи.

Сближение двух КО в ОКП определяется орбитами объектов с учетом погрешностей (ошибка) определения и прогнозирования параметров движения каждого из них.

Выявление потенциально опасных сближений происходит поэтапно. На первом этапе определяются все события, в которых пары КО при движении по своим прогнозируемым траекториям на интересующем интервале времени сближаются на расстоянии менее порогового значения. К примеру, для космических объектов на ВЭО и ГСО устанавливается пороговое значение в 100 км, превышение которого не позволяет классифицировать сближение, как опасное, даже в том случае, если область неопределенности относительного положения КО на момент сближения сопоставима с величиной порога, а характерные размеры сближающихся объектов не превышают 50 м (справедливо для высокоорбитальных КО техногенного происхождения).

Сближения, выявленные на первом этапе, анализируются с использованием предположений о распределении и свойствах распределения ошибок знания параметров орбиты каждого из пары сближающихся КО, спрогнозированных на расчетный момент достижения минимального расстояния между ними. Сближение классифицируется, как потенциально опасное, при превышении пороговых значений вероятности столкновения КО, а также меры расстояния между векторами случайных величин (т.н. “расстояния Махаланобиса”) [3] для кинематических векторов положения КО.

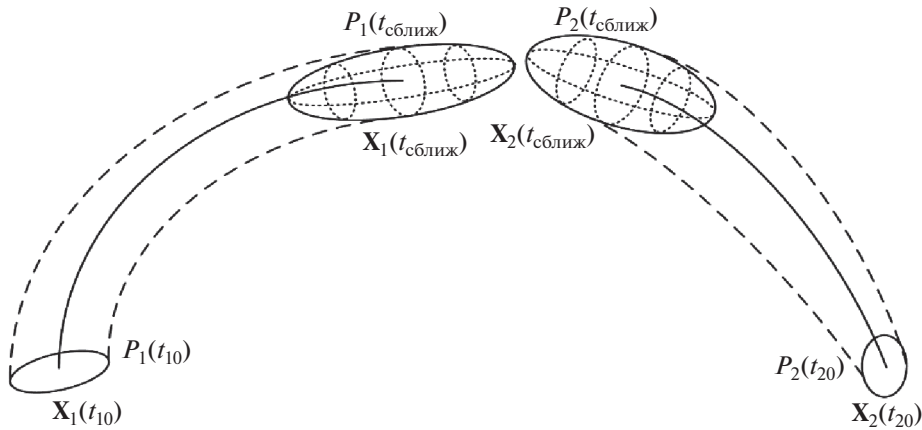


Рис. 1. Графическое представление решения задачи расчета вероятности опасного сближения КО в ОКП.

Оценка вероятности наступления опасного события

Надежное определение вероятности наступления опасного события необходимо для объективной оценки рисков, востребованной операторами спутниковых группировок, потребителями космических услуг и страховыми компаниями. Кратко опишем один из математических методов получения такой оценки.

Расчетный фазовый вектор положения и скорости (далее – вектор состояния) $\mathbf{X}_1(t_{10})$ и начальная ковариационная матрица ошибок $P_1(t_{10})$ одного из сближающихся КО (называемого КО-1) известны на момент времени t_{10} ; расчетный вектор состояния $\mathbf{X}_2(t_{20})$ и начальная ковариационная матрица ошибок $P_2(t_{20})$ КО-2 известны на момент времени t_{20} . Закон движения (или векторы состояния) и ковариационные матрицы ошибок каждого КО рассчитываются с использованием аналитической или численной модели движения. При помощи метода наименьших квадратов вычисляется момент максимального сближения между двумя КО $t_{\text{сближ}}$, относительные векторы состояния $\mathbf{X}_1(t_{\text{сближ}})$, и ковариационные матрицы ошибок $P_1(t_{\text{сближ}})$, $P_2(t_{\text{сближ}})$.

На рис. 1 схематически представлены траектории движения двух КО с эллипсоидами погрешностей определения их текущих координат (как правило, продольная ошибка определения положения больше ошибки в поперечном направлении).

Для определения вероятности столкновения P_c двух КО при их опасном сближении можно пользоваться формулой (1), выведенной из математического решения, показанного в работе З.Н. Хуторовского [2].

$$P_c = \frac{S \cdot v_{\text{отн}}}{\sqrt{4\pi^2 |\mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2 \mathbf{K}_1^{-1} + \mathbf{K}_1| \cdot (\delta v^T (\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2)^{-1} \delta v)} \cdot \exp(-0.5 \delta \mathbf{r}^T (\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2)^{-1} \delta \mathbf{r}), \quad (1)$$

где: $\delta \mathbf{r}$, $\delta \mathbf{v}$ – векторы относительного положения и скорости объектов в момент $t_{\text{мин}}$ их сближения на минимальное расстояние; \mathbf{K}_1 , \mathbf{K}_2 – ковариационные матрицы ошибок определения положения обоих КО в момент $t_{\text{мин}}$; $v_{\text{отн}}$ – модуль относительной скорости сближения; $^{-1, T}$ – знаки обращения и транспонирования матрицы; S – площадь поперечного сечения области столкновения, величина которой зависит от формы и размера сближающихся объектов. Например, для объектов сферической формы с диаметрами d_1 и d_2 величина площади поперечного сечения области столкновения определяется по формуле (2).

$$S = \frac{\pi(d_1 + d_2)^2}{4}. \quad (2)$$

Формула (1) получена в следующих предположениях:

1. на временном интервале возможного столкновения двух сближающихся КО их относительное движение прямолинейно;
2. скорости обоих объектов известны с малыми относительными ошибками;
3. ошибки определения положения одного из двух сближающихся объектов намного больше их размеров.

Как видно из (1), вероятность столкновения зависит от размеров сближающихся объектов, ковариационных матриц ошибок определения их положения в момент $t_{\text{мин}}$ и ориентации вектора относительной скорости.

Обнаружение потенциально опасных астероидов

Практический опыт поиска и обнаружения опасных астероидов в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН насчитывает более десяти лет. Для решения задачи обнаружения астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), в том числе, потенциально опас-

ных [10], задействованы широкоугольные оптические телескопы с апертурой 40 см.

Технология поиска АСЗ заключается в следующем. Оптические телескопы, оснащенные фотоприемными устройствами на основе ПЗС-матриц, получают серию снимков участка небесной сферы. Как правило, в течение наблюдательной ночи выполняются до четырех проходов каждой области небесной сферы. За время, прошедшее между первым и последним снимком серии, опорные звезды фона не меняют своего положения, а малые тела Солнечной системы, напротив, успевают сместиться от кадра к кадру. Это движение выявляется специализированными программами обработки изображений. После обнаружения программой движущегося объекта наблюдатель верифицирует кандидата (отсеивая возможные артефакты) и отправляет типовое сообщение на электронный адрес Центра малых планет (ЦМП) Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики (США). В ЦМП проводится сравнение измеренных положений кандидата с предварительно вычисленными координатами уже известных объектов Солнечной системы. Если кандидат не идентифицируется с каталогизированными объектами, он считается новым космическим объектом (астероидом или кометой, в зависимости от типа гелиоцентрической орбиты и наличия кометных признаков в виде газовой оболочки). Для уточнения параметров движения и определения физической природы новых объектов сотрудниками обсерваторий проводятся дополнительные наблюдения по эфемеридам, рассчитанным сервисом ЦМП.

За обнаружением следует построение первичной орбиты и оценка риска его столкновения с Землей. Критерием оценки является минимальное расстояние между орбитами объекта и Земли, составляющая 0.05 а. е. Астероид, соответствующий данному критерию, классифицируется, как “потенциально опасный”.

Астрометрические и фотометрические данные по астероидам, сближающимся с Землей (включая потенциально опасные) хранятся специализированной базе данных ИПМ. Содержимое базы данных обрабатывается прикладными программами, реализующими алгоритмы решения различных статистики и небесной механики в интересах предупреждения и парирования космических угроз.

КЛАССИФИКАЦИЯ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В целях систематизации опасных событий в околоземном космосе в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН ведется разработка единого классификатора опасных ситуаций в ОКП [7] с использованием

собственных практических наработок и анализа зарубежного опыта [4].

Возрастающая активность участников космической деятельности, в том числе, по разворачиванию многоспутниковых орбитальных группировок, увеличение доли частных космических акторов, реализации не апробированных принципов управления космическим движением создает предпосылки для возникновения новых видов опасных ситуаций, возникающих в ОКП. Выявление и парирование новых угроз выходит за рамки технических возможностей действующих систем контроля космического пространства.

Неучтенные опасные ситуации могут представлять серьезную угрозу для действующих космических аппаратов и объектов наземной инфраструктуры. Отдельную опасность представляют объекты естественного происхождения и неконтролируемые объекты космического мусора, входящие в плотные слои земной атмосферы и способные достичь поверхности земли.

Событие в ОКП классифицируется, как “опасная ситуация”, в том случае, если его наступление создает угрозу безопасному выполнению космических операций, препятствует штатному функционированию космических аппаратов и орбитальных систем, подвергает опасности объекты наземной инфраструктуры и население в целом.

К опасным ситуациям авторы относят следующие виды, представленные на рис. 2. Ниже подробно рассматриваются отдельные структурные блоки классификатора.

Блок классификатора “Опасные сближения”

Наиболее распространенным видом опасных ситуаций являются опасные сближения космических объектов. Данный вид опасной ситуации возникает в результате взаимного движения космических объектов в диапазоне относительных скоростей от метров в секунду (для орбит близким к компланарным) до нескольких километров в секунду (в случае сближения КО на существенно различных орбитах). Как правило, опасность такой ситуации заключается в незнании истинных значений погрешностей определения параметров орбиты каждого из сближающихся объектов, приводящего к разнице между фактическим и расчетным значениями минимального расстояния между объектами от сотен метров до двух километров в большую или меньшую сторону. На практике применяются два пороговых значения оценки сближений на уровне 10 и 5 км; минимальный уровень вероятности столкновения при этом полагается равным 10^{-4} [1]. События сближений, прогнозируемые на расстоянии десяти и более километров, не считаются опасными, и в большинстве случаев игнорируются операторами КА.

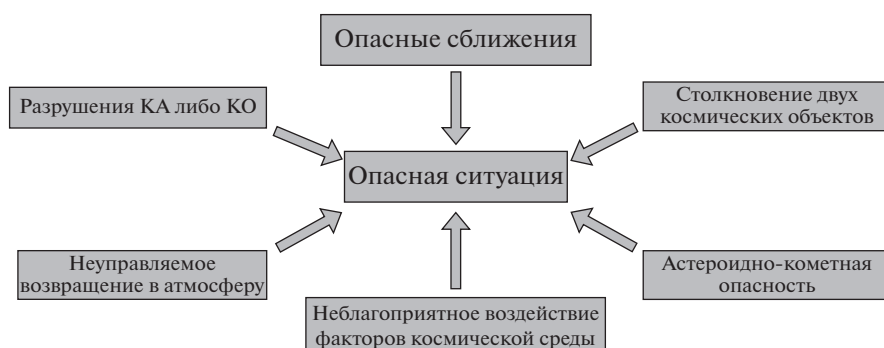


Рис. 2. Общая схема классификации опасных событий в ОКП.

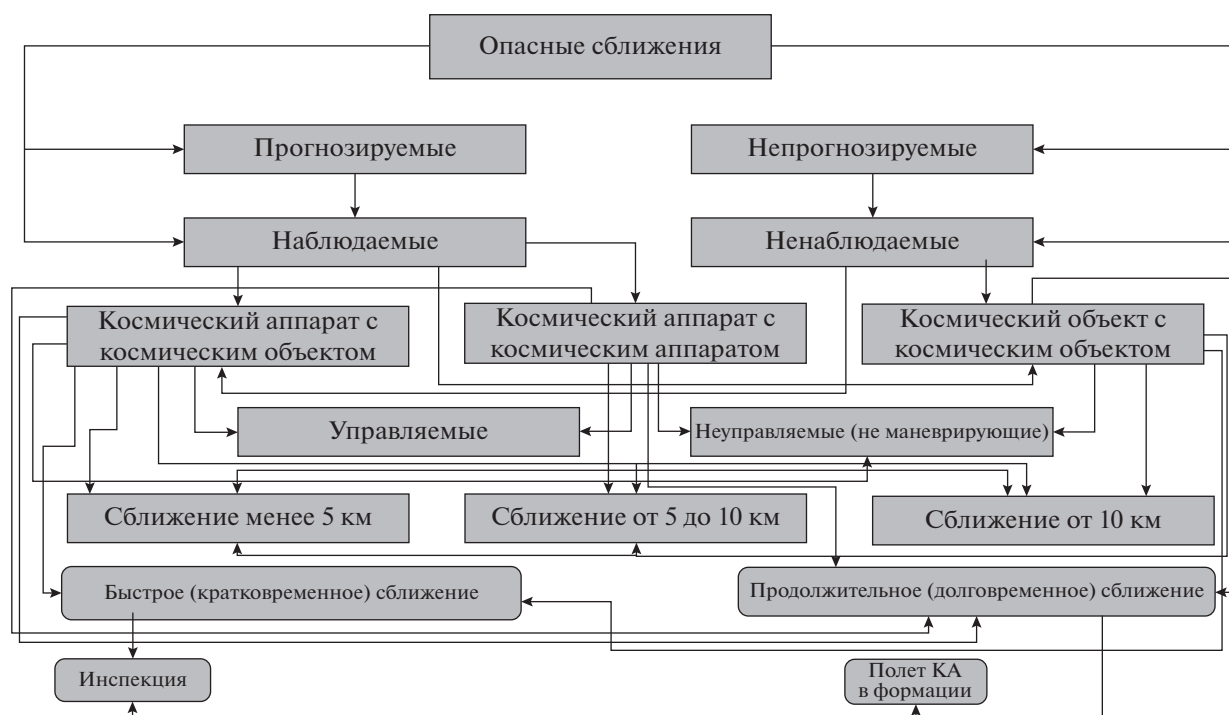


Рис. 3. Классификация опасных сближений.

При решении задачи определения траектории движения космического объекта в гравитационном поле Земли он рассматривается в качестве материальной точки с известным отношением площади к массе (ОПМ). При этом учитываются возмущения от несферичности гравитационного поля, влияния светового давления, сопротивления верхних слоев атмосферы, притяжения Луны и Солнца. На практике ОПМ является переменной величиной, имеющей сложный, трудно прогнозируемый характер изменения во времени и постоянно уточняется наблюдениями за самим объектом.

Подробную классификацию опасных сближений можно представить в виде блока объектов, событий и связей между ними (рис. 3).

К примеру, событие инспекции (преднамеренное маневрирование вблизи космического аппарата (как правило, принадлежащего другому государству) с целью выявления его технических характеристик, контроля активности в радиодиапазоне или противодействия выполнению им целевых задач) классифицируется, как продолжительное (долговременное сближение).

В свою очередь, продолжительное (долговременное сближение) относится к классу сближения космического аппарата с космическим аппаратом. Данный класс относится к наблюдаемому (поскольку речь идет об активных аппаратах, орбиты которых уточняются радиотехническими измерениями) подклассу прогнозируемых опасных сближений.

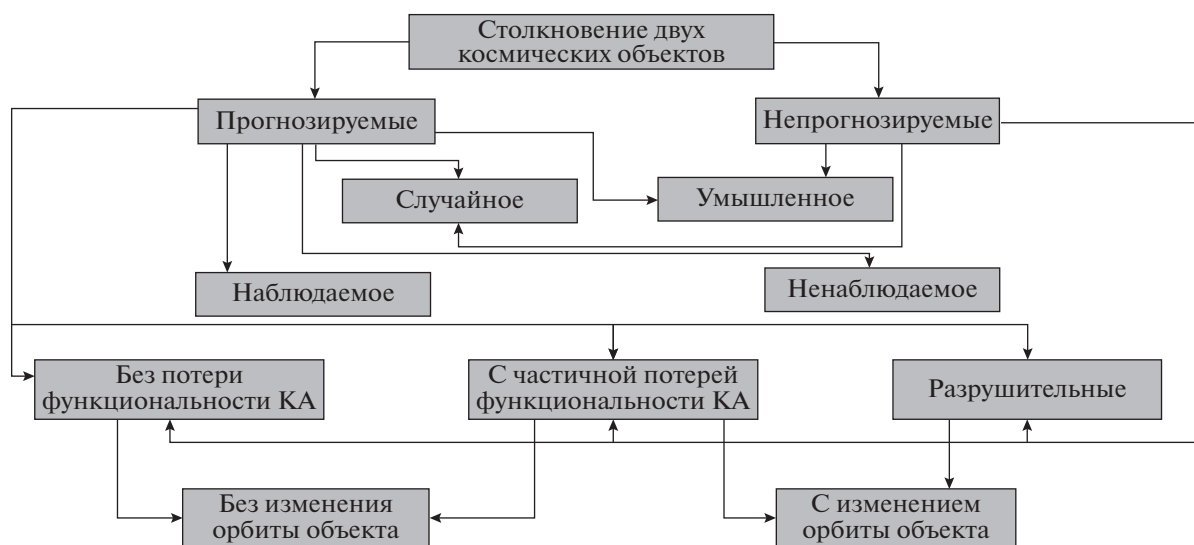


Рис. 4. Классификация столкновения двух космических объектов в ОКП.

Отнесение событий к прогнозируемым и непрогнозируемым зависит от возможности априорного определения параметров движения обоих объектов, участвующих в сближении. Наблюдаемость сближения зависит от возможности применения методов оптического, радиолокационного, лазерного или радиотехнического контроля КО (к примеру, технические ограничения существующих возможностей комплексов наземных электронно-оптических систем могут препятствовать регулярному сопровождению малоразмерных КА на высоких орбитах). Управляемость и неуправляемость сближения, в терминологии данного классификатора, определяется наличием конструктивной возможности КА к уклонению от опасного сближения путем проведения коррекции траектории своего орбитального движения.

*Блок классификатора
“Столкновение двух космических объектов”*

Событие столкновения двух космических объектов, как вид опасной ситуации в космосе, может быть классифицирован при помощи схемы, представленной на рис. 4.

Ключевым фактором, определяющим последствия столкновения, является суммарная кинетическая энергия каждого из объектов, пропорциональная квадрату относительной скорости и массе конструкции КА, попадающей в область разрушения.

Блок классификатора “Разрушение космического аппарата либо космического объекта”

Данный вид опасной ситуации может произойти в следствие разрушения конструктива КА

или разгонного блока из-за детонации остатков топлива в баках, взрыва шар-баллонов, содержащих газ для наддува и работы системы ориентации, электролита в аккумуляторных батареях (рис. 5).

Наиболее вероятными причинами возникновения таких ситуаций являются: нарушение правил пассивации аппарата, деградация конструктива под действием космической среды, тепловой нагрев от сопротивления атмосферы, разряд статического электричества, внутренние химические реакции либо механическое разрушение элементов конструкции для быстровращающегося КА.

*Блок классификатора
“Неуправляемое возвращение в атмосферу”*

Данный вид опасной ситуации описывает последствия вхождения космического объекта в плотные слои атмосферы Земли с возможным достижением ее поверхности.

Термин “неуправляемый” подразумевает отсутствие возможности воздействия на объект внутренних реактивных или аэродинамических сил с целью приведения его в заданный район земной/океанской поверхности.

Классификация события неуправляемого возвращения в атмосферу Земли представлена на рис. 6.

Рассматриваемый вид опасной ситуации подразделяется на наблюдаемый и ненаблюдаемый (средствами контроля ОКП). Предсказуемость неуправляемого возвращения в атмосферу Земли аппарата на низкой околоземной или высокоэллиптической орбите с низким перигеем зависит,

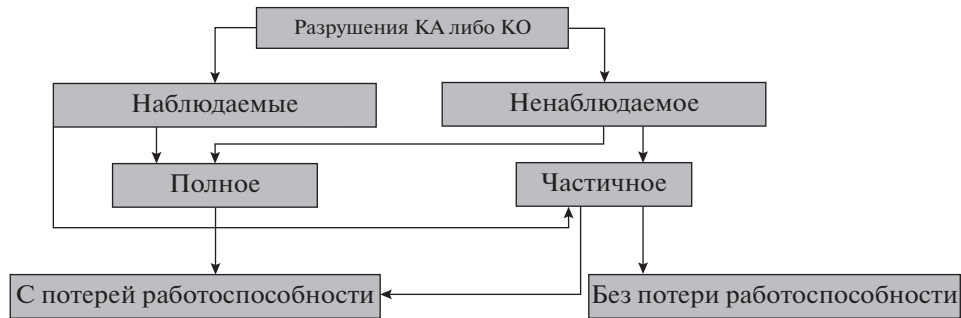


Рис. 5. Классификация разрушения космического аппарата либо космического объекта в ОКП.

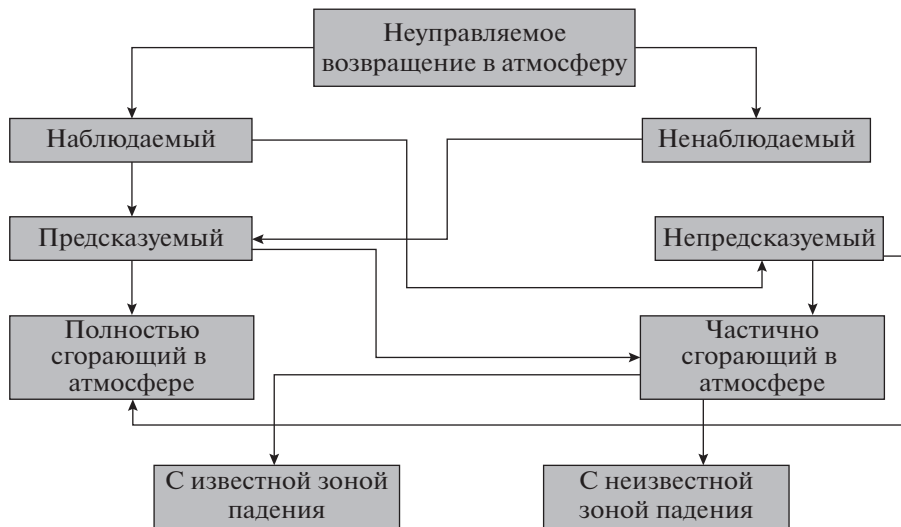


Рис. 6. Классификация неуправляемого возвращения в атмосферу Земли.

среди прочих факторов, от степени деградации систем служебного борта КА.

Во избежание такого сценария операторами космических аппаратов проводятся заключительные операции по их управляемому возвращению атмосфере (для посадки или затопления) либо уходу на орбиту “захоронения” с большим сроком баллистического существования.

В условиях воздействия существенных негравитационных возмущений, вызванных аэродинамическим напором, представляется невозможным моменты координаты падения КО точнее 5–10% от оставшегося значения.

Блок классификатора “Неблагоприятное воздействие факторов космической среды”

Одним из важных факторов, определяющих обстоятельства возникновения опасных ситуаций в ОКП, являются параметры космической погоды, т.е. совокупности явлений, происходящих в верх-

них слоях земной атмосферы, ионосфере и магнитосфере Земли. Космическая погода влияет на события в ОКП путем воздействия солнечного излучения (прежде всего, в ультрафиолетовом диапазоне спектра), высокоэнергичных заряженных частиц солнечного и галактического происхождения. Опасность неблагоприятного воздействия заряженных частиц на бортовые системы низкоорбитального КА многократно усиливается в ходе его пролета над районом Южной Атлантической магнитной аномалии. Влияние ультрафиолетового излучения Солнца на ионосферу Земли приводит к изменению плотности газовой среды вдоль траектории полета КА, существенно влияя на точность прогнозирования его движения.

Классификация неблагоприятного воздействия факторов космической среды представлена на рис. 7.

Попадание тяжелой заряженной частицы может вызвать нарушение работы бортовых систем КА. Воздействие атомарного кислорода и ультра-



Рис. 7. Классификация неблагоприятного воздействия факторов космической среды.

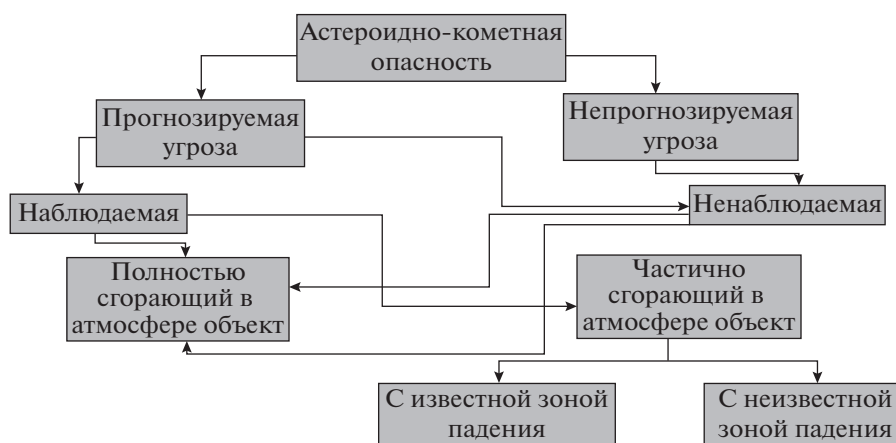


Рис. 8. Базовая классификация угрозы АКО.

фиолетового излучения приводит к деградации фотопреобразователей (обугливание) панелей солнечных батарей, вызывает потемнение лакокрасочных покрытий, расслоение тонкопленочной экранно-вакуумной теплоизоляции, снижение оптических характеристик иллюминаторов и различных бортовых приборов.

В течение своего полета космический аппарат может попадать в области микрометеоритных потоков, частицы которых характеризуются скоростями от 11.5 до 72 км/с. Микрометеоритные частицы, наряду с фрагментами космического мусора, представляют опасность для функционирующих космических аппаратов.

*Блок классификатора
“Астероидно-кометная опасность”*

В качестве отдельного вида космических угроз следует отметить астероидно-кометную опасность (АКО) столкновения малого тела (астероида или кометы) с Землей. В настоящее время не существует средств активного парирования таких угроз. Для оценки риска АКО используется Туринская шкала [8]. Базовая классификация данного вида угроз представлена на рис. 8.

Опасные события, вызванные АКО можно подразделить на прогнозируемые и непрогнозируемые (в зависимости от достоверности баллистического прогноза движения, интервала упреждения), наблюдаемые и ненаблюдаемые (в зависимости от контроля оптическими или радиолокационными средствами наблюдения). Объекты, полностью сгорающие в тропосфере Земли несут угрозу поражения ударной волной, а частично сгорающие в атмосфере можно разделить на объекты с расчетной зоной падения либо с нерасчетной (в зависимости от траектории движения).

Таким образом, при объединении отдельных блоков рассматриваемых опасных ситуаций в ОКП (опасных сближений, столкновений на орбите, событий разрушений, направляемого возвращения в атмосферу Земли, неблагоприятного воздействия факторов космической погоды и астероидно-кометной опасности) в общую схему классификатора возникает цельное представление о возможных космических “происшествиях”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье обосновывается необходимость формирования единого классификатора опасных си-

туаций в ОКП. При формировании такого классификатора широко используется научно-технический задел ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Отмечено разнообразие ситуаций, создающих угрозу космической деятельности. Предложен метод систематизации наиболее распространенных видов опасных событий.

Разработка единого классификатора должна способствовать:

– выявлению случаев, создающих угрозу безопасное проведение космических операций;

– разработке математических, программно-алгоритмических методов и средств прогнозирования опасных ситуаций;

– поиску новых методов контроля и мониторинга околоземного космического пространства;

– разработке мер по предотвращению различных космических угроз;

– расширению научных знаний об объектах и событиях в ближнем космосе.

В перспективе классификатор поможет сформировать методики комплексной оценки рисков возникновения опасных ситуаций, а также выработать критерии для принятия решений по парированию неблагоприятных последствий, учитывающие различные сценарии космической деятельности.

Внедрение принципов единой классификации в технологии управления космическим движением, в условиях постоянно нарастающего уровня техногенной засоренности ближнего космоса и возрастающей интенсивности его использования позволит обеспечить безопасное и устойчивое развитие российской космонавтики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Klinkrad H.* Space Debris. Models and Risk Analysis. Praxis Publishing Ltd: Chichester. 2006.
2. *Khutorovsky Z., Boikov V., Kamensky S.* Direct Method For The Analyses Of Collision Probability Of Artificial Space Objects In LEO: Techniques Results And Applications // 1st European Conference on Space Debris. 1993. V. 1.
3. *Mahalanobis P.* On the generalised distance in statistics // Proceedings of the National Institute of Sciences of India. 1936. V. 2. № 1. P. 49–55.
4. *Rovetto J.* Ontology For Europe's Space Situational Awareness Program // 7th European Conference on Space Debris. ESA SD-05. 2017.
5. *Вениаминов С.С., Червонов А.М.* Космический мусор – угроза человечеству. М.: ИКИ РАН, 2012.
6. *Павлова Е.А., Захваткин М.В., Стрельцов А.И. и др.* Обеспечение безопасности полетов высокоорбитальных космических аппаратов // Всероссийская научная конференция “Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы”. М.: ИКИ РАН. 2019. С. 132.
7. *Павлова Е.А., Стрельцов А.И., Еленин Л.В. и др.* Формирование единого классификатора опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2020. № 23. С. 22.
8. Российская астрономическая сеть. URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1178699>
9. Центр коллективного пользования “Международная сеть телескопов для научных и прикладных задач”. URL: <https://keldysh.ru/ckpmsot/>
10. *Шустов Б.М., Рылова Л.В.* Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2010.