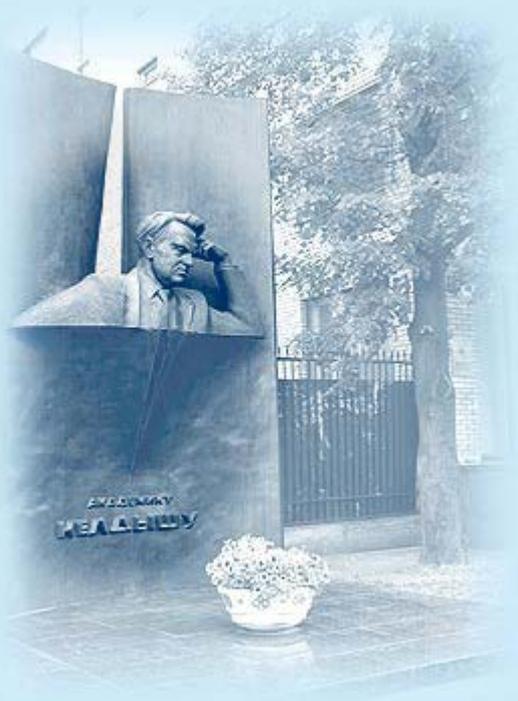




ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • [Электронная библиотека](#)

[Препринты ИПМ](#) • [Препринт № 23 за 2020 г.](#)



ISSN 2071-2898 (Print)  
ISSN 2071-2901 (Online)

[Павлова Е.А.](#), [Стрельцов А.И.](#),  
[Еленин Л.В.](#), [Степаньянц В.А.](#),  
[Захваткин М.В.](#)

Формирование единого  
классификатора опасных  
ситуаций в околоземном  
космическом пространстве

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Формирование единого классификатора опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве / Е.А.Павлова [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2020. № 23. 22 с. <http://doi.org/10.20948/prepr-2020-23>  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2020-23>

**Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
имени М.В. Келдыша  
Российской академии наук**

**Е.А. Павлова, А.И. Стрельцов, Л.В. Еленин,  
В.А. Степаньянц, М.В. Захваткин**

**Формирование единого классификатора  
опасных ситуаций в околоземном  
космическом пространстве**

**Москва — 2020**

*Е.А. Павлова, А.И. Стрельцов, Л.В. Еленин, В.А. Степаньянц,  
М.В. Захваткин*

## **Формирование единого классификатора опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве**

Обобщен практический опыт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по анализу 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. Обоснована необходимость разработки классификатора опасных ситуаций в ОКП. Представлены составные части классификатора в форме отдельных блоков.

**Ключевые слова:** классификация, опасные ситуации, околоземное космическое пространство, космическая деятельность, космический мусор, астероидно-кометная опасность, оценка рисков.

*E. Pavlova, A. Streltsov, L. Elenin, V. Stepanyants, M. Zakhvatkin*

## **Development of the common classification for hazards events in the near-Earth space**

The practical experience of KIAM RAS on the analysis of dangerous situations in near-Earth space, including mathematical problems of conjunction assessment, detection of potentially hazardous asteroids is summarized. The necessity of developing a classifier of dangerous situations in the near-Earth space is justified. The parts of the classifier are presented in the form of separate blocks.

**Key words:** classification, close approaches, near-Earth space, space activities, space debris, dangerous situations, NEO hazard, conjunction assessment.

## **Оглавление**

Введение .....	3
1 Практический опыт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по предупреждению опасных ситуаций в ОКП .....	6
2 Объективные предпосылки необходимости формирования единого классификатора опасных ситуаций в ОКП .....	12
3 Структура единого классификатора опасных ситуаций в ОКП .....	13
4 Выводы.....	21
Библиографический список.....	21

## Введение

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук (ИПМ) ведет многолетнюю работу по анализу высокоорбитальной области ОКП.

Анализ полученных измерительных данных (астрофотометрических, радиотраекторных и др.) позволяет сделать вывод о существенном росте в 2019 г. числа опасных сближений космических аппаратов (КА) с различными объектами, находящимися в ОКП. На рисунках 1, 2 и 3 представлена динамика роста популяции космических объектов (КО), зарегистрированных в течение 2019 года в базе данных ИПМ как движущиеся по геостационарным, средневысоким и высокоэллиптическим орбитам.

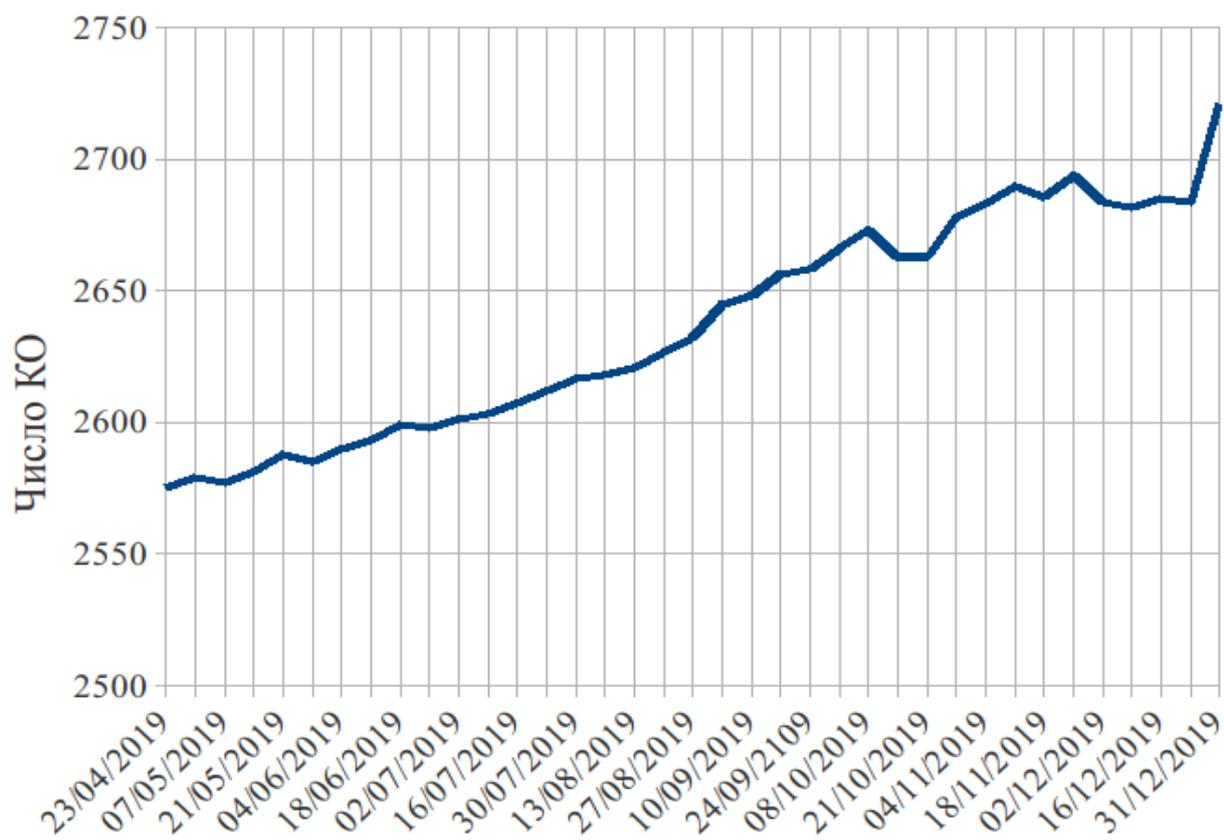


Рис. 1. Изменение числа КО в области геостационарных орбит в 2019 г.

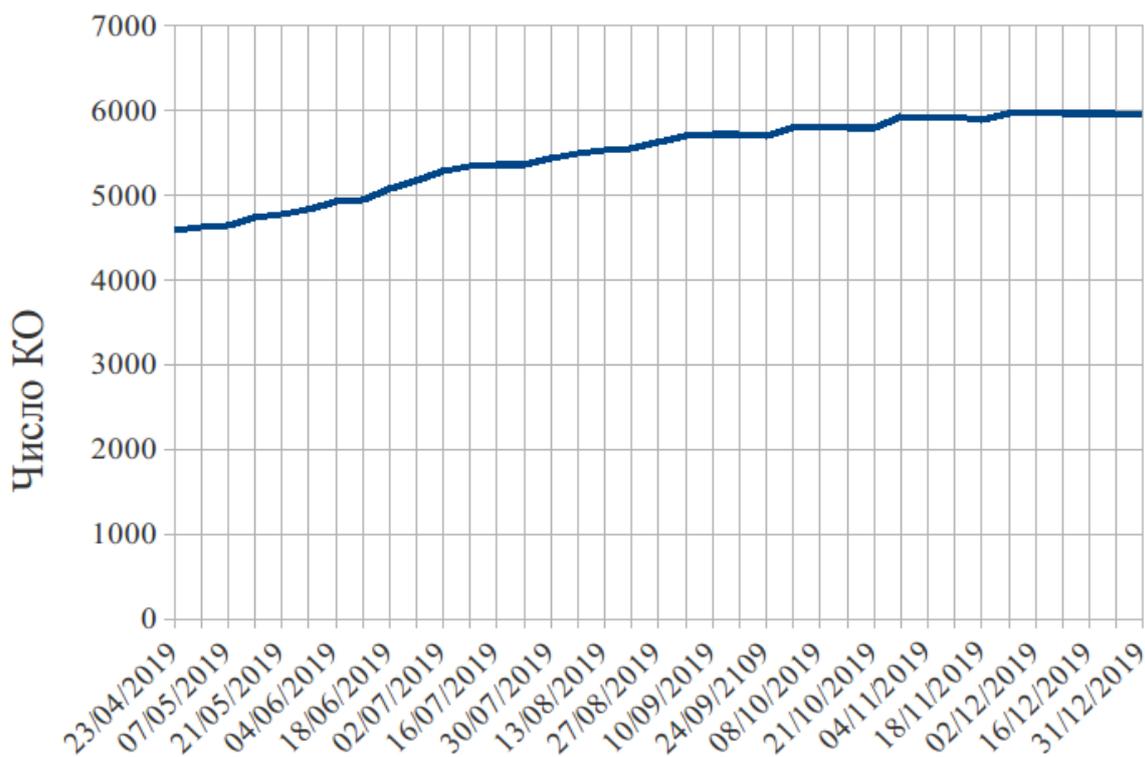


Рис. 2. Изменение числа КО в области высокоэллиптических орбит в 2019 г.

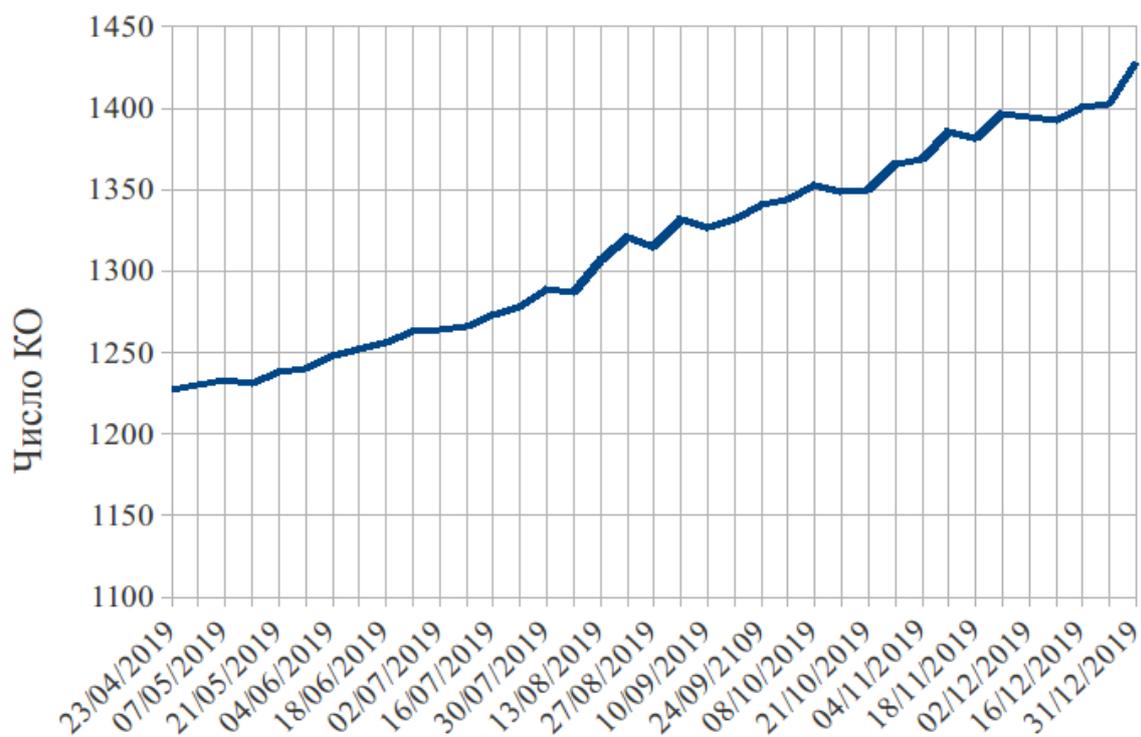


Рис. 3. Изменение числа КО в области средневысоких орбит в 2019 г.

Развитие активности участников космической деятельности (государств, международных межправительственных организаций и неправительственных

субъектов) породило совершенно новые виды неблагоприятных ситуаций, возникающих в ОКП и представляющих серьезную угрозу как для действующих космических аппаратов, так и для объектов наземной инфраструктуры. Наряду с объектами естественного происхождения, особую опасность представляют неконтролируемые, неуправляемые техногенные объекты, входящие в плотные слои земной атмосферы и способные достичь поверхности Земли.

В истории зафиксированы случаи возникновения опасных ситуаций различного происхождения. В качестве примера можно привести событие, произошедшее 10 февраля 2009 года, когда 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 [1].

Возможные последствия неуправляемого возвращения в атмосферу Земли видны на примере прекращения баллистического существования китайской станции «Тяньгун-1» в апреле 2018 года. Для такого космического объекта сложной геометрической формы, совершающего полет на низкой околоземной орбите в условиях воздействия аэродинамического сопротивления, оказалось невозможным определить координаты и время падения на Землю с точностью лучше 10%. Даже за сутки (16 витков), оставшиеся до вхождения объекта в плотные слои атмосферы, неопределенность района падения составляла более 60 тысяч километров вдоль его трассы.

Челябинское событие, произошедшее 15 февраля 2013 года, показало, что при входе в атмосферу над густонаселенными районами Земли даже небольшого объекта размером 15 – 20 метров возможны серьезные последствия для населения в виде увечий от воздействия ударной волны, причинение ущерба постройкам и возникновение паники из-за необъявленной опасности, что сопоставимо с крупной техногенной аварией либо с применением ядерного оружия.

Примером воздействия факторов космической среды на точность прогнозирования времени существования космического объекта является прекращение деятельности орбитальной станции «Скайлэб». Первоначальная оценка времени баллистического существования объекта, основанная на недостоверном среднесрочном (до 10 лет) прогнозе солнечной активности, оказалась завышенной – восемь лет вместо шести фактических.

К прочим негативным факторам, возникающим в ходе выполнения космического полета, следует отнести:

- электромагнитное воздействие (от англ. *radio-frequency interference*) – случайная либо целенаправленная постанковка радиотехнических помех другому космическому аппарату или системам наземного комплекса управления. Данная проблема особенно актуальна на геостационарных орбитах, где зачастую не соблюдаются нормы и правила Международного союза

электросвязи (МСЭ, англ. ITU) относительно разделения орбитально-частотных ресурсов ГСО;

- воздействие наземного или космического источника лазерного излучения на целевую оптическую аппаратуру и системы астроориентации (звездные датчики) другого космического аппарата;

- загрязнение элементов конструкции и датчиков космического аппарата продуктами радиоактивного распада либо продуктами сгорания двигательных установок.

Последствием подобного рода факторов в космосе может стать выход из строя действующего космического аппарата с полной потерей функциональности либо деградация внешних поверхностей элементов конструкции, помехи в работе радиотехнических комплексов, используемых для управления КА.

Чрезмерное засорение рабочих орбитальных областей ОКП космическим мусором может со временем привести к невозможности дальнейшего использования околоземного космического пространства для целей космической деятельности. Астрофизик Дональд Кесслер, занимавшийся исследованиями в области космического мусора в конце 70-х годов прошлого века, предположил, что сохранение тенденции засорения ОКП повлечет лавинообразные негативные последствия. Любое случайное столкновение двух низкоорбитальных объектов приведет к образованию новых фрагментов, запускающих, в свою очередь, каскадную реакцию разрушения остальных космических объектов во всем диапазоне высот ближнего космоса (позднее этот эффект был назван «синдромом Кесслера») [2]. В результате ОКП на долгие годы окажется недоступным для космической деятельности, до тех пор, пока оно не очистится под воздействием естественного фактора – торможения объектов в разреженных слоях земной атмосферы.

Нарастающая космическая активность, порождающая множество видов возможных неблагоприятных событий в ОКП, влечет разнообразие доступных способов их предотвращения и определяет необходимость анализа и систематизации возможных случаев, способных создавать угрозу безопасности космической деятельности.

Виды опасных ситуаций целесообразно сгруппировать по определенным признакам и представить в виде единого классификатора опасных событий.

## **1 Практический опыт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по предупреждению опасных ситуаций в ОКП**

Практические работы по предупреждению и предотвращению опасных ситуаций в высокоорбитальной области ОКП проводятся в разработанном в ИПМ сегменте (далее - Сегмент) мониторинга опасных ситуаций в области геостационарных, высокоэллиптических и средневысоких орбит. Указанный

сегмент входит в состав Автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях (АСПОС) в ОКП, созданной Госкорпорацией «Роскосмос».

Сегмент предназначен для автоматизированного сбора, предварительной обработки и передачи в главный информационно-аналитический центр (ГИАЦ) первичной информации о событиях в ОКП, полученной от оптических и оптико-электронных средств мониторинга космического пространства.

Основными задачами Сегмента являются:

- выполнение заданий ГИАЦ по сбору информации о космических объектах (КО), о сопровождаемых КА и о космической обстановке в ОКП;
- сбор, первичная обработка, систематизация, каталогизация и хранение измерительной информации о КО;
- предварительное определение и прогнозирование опасных сближений сопровождаемых КА с потенциально опасными КО;
- предварительное определение фактов разрушений КО;
- обеспечение информационного обмена со специализированными оптическими и оптико-электронными средствами АСПОС ОКП и с ГИАЦ;
- ведение базы данных о КО и об опасных событиях в ОКП;
- выдача в ГИАЦ информации об уточненных параметрах орбит КО;
- контроль выполнения мероприятий по уводу отработавших КА, верхних ступеней ракет-носителей (РН) и разгонных блоков (РБ) в зоны "захоронения" или на орбиты с ограниченным сроком существования по заданиям ГИАЦ;
- выдача в ГИАЦ предварительной информации о событиях в ОКП;
- выдача в ГИАЦ измерительной информации от специализированных оптических и оптико-электронных средств АСПОС ОКП;
- выдача в ГИАЦ информации о вновь обнаруженных КО;
- выдача в ГИАЦ некоординатной информации о КО;
- по заданиям ГИАЦ планирование работы специализированных оптических и оптико-электронных средств АСПОС ОКП по выполнению наблюдений потенциально опасных КО, сопровождаемых КА и КО риска;
- по заданиям ГИАЦ сопровождение контролируемых уводов отработавших КА, верхних ступеней РН и РБ в зоны "захоронения" или на орбиты с ограниченным сроком существования в области ответственности сегмента;
- по заданиям ГИАЦ контроль КА на этапах выведения.

Для решения перечисленных задач созданы аппаратно-программные комплексы, реализующие программно-алгоритмические методы прогнозирования траектории движения космического объекта, решающие задачи сбора и первичной обработки измерительной информации, осуществляющие информационное взаимодействие с источниками и потребителями информации.

На основе специальных математических алгоритмов и технических решений учеными и инженерами ИПМ разработаны:

- программный комплекс расчета опасных сближений КА;

- программный комплекс расчета оценки вероятности столкновений КА;
- программа обнаружения и сопровождения фрагментов разрушений;
- программа обнаружения новых космических объектов в высокоорбитальной области ОКП;
- программный комплекс планирования наблюдений электронно-оптическими средствами мониторинга ОКП за космическими объектами.

Кроме того, создана база данных, хранящая информацию о текущих параметрах орбитального движения космических объектов и их относительной яркости. Проводятся работы по организации упорядоченного хранения накопителями на жестких магнитных дисках первичных кадров пролета КО на фоне звездного неба, полученных фотоприемными устройствами с зарядовой связью (ПЗС-камерами).

Методы и средства для решения широкого круга задач, связанных с обеспечением безопасности полетов космических аппаратов орбитальной группировки ГК «Роскосмос» (<https://www.roscosmos.ru/21922/>), разработанные в ИПМ, используются прежде всего для выявления опасных сближений т.н. «защищаемых» КА с КО «риска» – действующими и нефункционирующими аппаратами, разгонными блоками, верхними ступенями ракет-носителей, операционными фрагментами и прочими объектами «космического мусора» [3].

Далее представлены общие принципы выявления опасных сближений, описание задачи расчета оценки вероятности опасных сближений КА с КО и обнаружения потенциально опасных астероидов.

### **Общие принципы выявления опасных сближений**

Сближение двух КО в ОКП определяется законами движения КО с учетом ошибок определения и прогнозирования параметров движения каждого КО.

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 расстояние менее порогового значения. К примеру, для космических объектов на ВЭО и ГСО устанавливается порог в 100 км. Если порог превышен, а характерные размеры сближающихся КО не более 100 м, то сближение считается неопасным даже в том случае, когда область неопределенности относительного положения КО на момент сближения сопоставима с величиной порога (справедливо для высокоорбитальных КО техногенного происхождения).

Потенциально опасные 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. Сближение классифицируется как потенциально опасное при превышении пороговых значений вероятности столкновения КО, а

также меры расстояния между векторами случайных величин (т.н. «расстояния Махаланобиса») для кинематических векторов положения КО.

### Расчет вероятности опасного сближения

Пусть расчетный фазовый вектор положения и скорости (далее – вектор состояния)  $\bar{X}_1(t_{10})$  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  $\bar{X}_2(t_{20})$  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  $\bar{X}_1(t_{\text{сближ}})$ ,  $\bar{X}_2(t_{\text{сближ}})$  и ковариационные матрицы ошибок  $P_1(t_{\text{сближ}})$ ,  $P_2(t_{\text{сближ}})$  этих объектов (рис. 4).

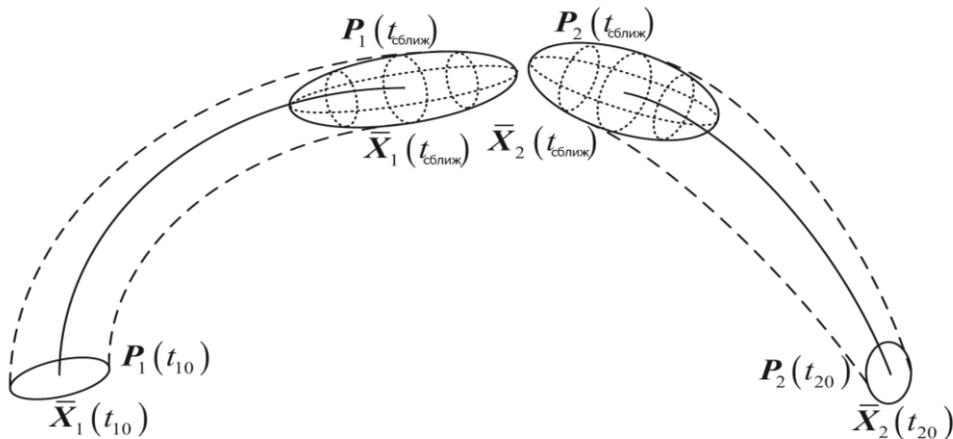


Рис. 4. Графическое представление события опасного сближения КО в ОКП

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

Основной характеристикой, в зависимости от которой принимается решение о возможности столкновения двух КО, является рассчитанное значение вероятности этого события.

Для определения вероятности столкновения  $P_c$  двух КО при их опасном сближении можно пользоваться формулой (1), показанной в работе З.Н. Хуторовского [4].

$$P_c = \frac{S \cdot v_{отн}}{\sqrt{4\pi^2 |K_1 K_2 K_1^{-1} + K_1| \cdot (\delta v^T (K_1 + K_2)^{-1} \delta v)}} \cdot \exp(-0.5 \delta r^T (K_1 + K_2)^{-1} \delta r), (1)$$

где:

$\delta r, \delta v$  – векторы относительного положения и скорости объектов в момент  $t_{min}$  их сближения на минимальное расстояние;

$K_1, K_2$  – ковариационные матрицы ошибок определения положения обоих КО в момент  $t_{min}$ ;

$v_{отн}$  – 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  $t_{min}$  и ориентации вектора относительной скорости.

### **Обнаружение потенциально опасных астероидов**

Практический опыт ИПМ при решении задачи обнаружения астероидов, сближающихся с Землей, в том числе потенциально опасных [5], насчитывает более десяти лет. В работе были задействованы широкоугольные оптические телескопы с апертурой 40 см.

Основные принципы обнаружения новых астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), заключаются в следующем.

Оптические телескопы получают несколько снимков одного и того же участка небесной сферы (обычно 3...4 прохода за наблюдательную ночь). За

время между первым и последним снимком серии опорные звезды фона практически не меняют своего положения, а малые тела Солнечной системы, напротив, успевают сместиться от кадра к кадру. Это движение фиксируют специализированные программные комплексы обработки ПЗС-кадров. После обнаружения движущегося объекта наблюдатель отправляет из ИПМ типовое сообщение на электронный адрес Центра малых планет (ЦМП) Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики (США), где происходит сравнение измеренных положений объекта с расчетными положениями известных малых тел Солнечной системы, каталогизированных специалистами ЦМП. В настоящее время число каталогизированных астероидов превышает миллион единиц. Если объект не идентифицируется с уже известными, он считается потенциально новым космическим объектом (астероидом или кометой, в зависимости от типа гелиоцентрической траектории движения и наличия кометных признаков в виде газовой оболочки). Для уточнения параметров движения и определения физической природы такого объекта проводятся дополнительные наблюдения по эфемеридам (таблицам небесных координат), представленным на сайте ЦМП.

За обнаружением астероида следуют построение его приблизительной орбиты и оценка потенциального риска его столкновения с Землей. Критерием оценки степени риска является минимальное расстояние между траекторией движения объекта и орбитой Земли, пороговым значением которого принимается  $0,05 \text{ а.е.} \approx 7 \text{ млн км}$ .

Достоверность решения задачи вычисления минимального расстояния между траекториями движения объекта и Земли зависит от погрешностей определения параметров траектории объекта. В общем случае величины погрешностей обратно пропорциональны промежутку времени между первым и последним известным положением объекта (т.н. «мерным интервалом»). Для увеличения мерного интервала выполняют дополнительные наблюдения объекта. Новый объект получает постоянный номер в каталоге ЦМП при условии, что он был виден в течение двух и более его прохождений в противостоянии Солнцу.

Результаты наблюдений, полученные в ходе обнаружения и оптического сопровождения потенциально опасных космических объектов естественного происхождения, сохраняются в специализированной базе данных ИПМ. Измерительная информация, хранящаяся в базе данных, извлекается и обрабатывается прикладными программами, реализующими алгоритмы решения задач небесной механики с целью предупреждения и парирования космических угроз.

## **2 Объективные предпосылки необходимости формирования единого классификатора опасных ситуаций в ОКП**

Околоземное космическое пространство активно используется различными участниками космической деятельности уже более шести десятков лет. К настоящему времени база данных ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, хранящая первичную измерительную и баллистическую информацию, содержит записи о более чем десяти тысячах пассивных высокоорбитальных космических объектов, что свидетельствует о значительном техногенном засорении ОКП.

Особенностью техногенного засорения ОКП является то, что наиболее плотно объекты космического мусора локализованы в области рабочих орбит большинства активных 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.

Интенсивное использование околоземного космоса и связанный с этим рост числа объектов космического мусора создают предпосылки к возникновению различного рода опасных ситуаций, нуждающихся в выявлении, предупреждении и предотвращении.

В отечественной технической литературе совокупность космических объектов принято разделять на следующие группы:

- низкоорбитальные, с периодом обращения менее 1100 минут;
- средневысокие, с высотой апогея от 4400 до 31000 км, с периодом обращения по эллиптической орбите не менее 1100 минут;
- высокоэллиптические, с высотой перигея выше 4400 км, периодом обращения не более 14000 минут; при этом траектории движения высокоэллиптических объектов могут пересекать области нахождения КА на средневысоких орбитах;
- близкие к геостационарным, с наклоном менее  $25^\circ$ , периодом обращения в диапазоне от 1100 до 2000 минут и эксцентриситетом эллиптической орбиты менее 0,25;
- дальние космические аппараты, с высотой апогея более 70000 км (КА типа «Спектр-Р»).

Для эффективной организации деятельности по предупреждению аварий в космосе необходимо по возможности заранее проанализировать все виды опасных ситуаций, которые могут возникнуть в ОКП, и выполнить систематизацию событий, способных создавать угрозу безопасности космической деятельности. В качестве метода систематизации предлагается создание классификатора опасных ситуаций в ОКП.

Из трудов зарубежных авторов, близких по теме к разрабатываемому классификатору, следует отметить серию публикаций Роберта Роветто (R.J.

Rovetto), посвященных онтологическому анализу объектов и событий в ОКП [6].

### 3 Структура единого классификатора опасных ситуаций в ОКП

Событие в околоземном космическом пространстве классифицируется как «опасная ситуация» в случае, если его наступление создает угрозу безопасному осуществлению космических операций, функционированию космических аппаратов, целостности космических объектов, штатной эксплуатации оборудования наземной космической инфраструктуры и населению Земли в целом.

Источником опасных ситуаций могут быть космические объекты естественного и техногенного происхождения, участвующие в событии, классифицируемом как опасная ситуация.

В классификаторе предлагается разделение опасных ситуаций в ОКП на виды и категории. Общая схема классификатора представлена в виде структурных блоков (рис. 5.).

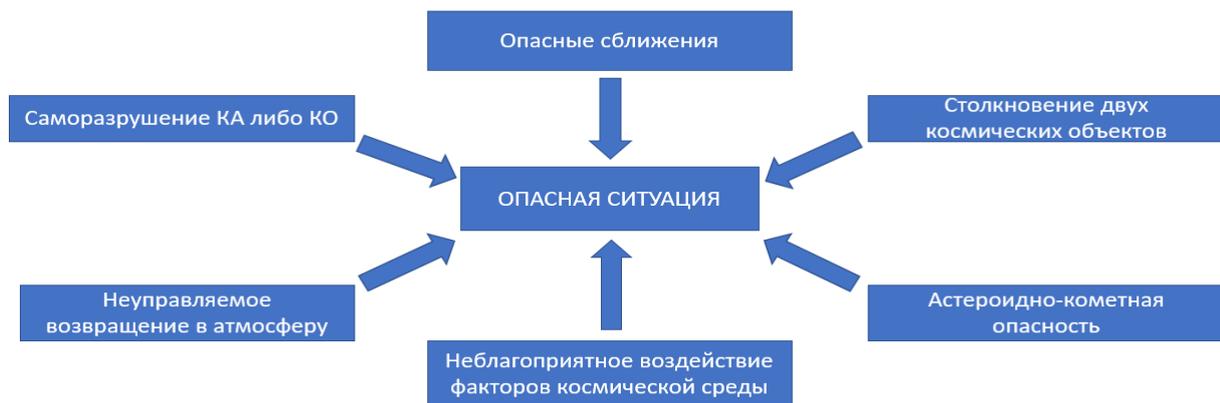


Рис. 5. Общая схема классификации опасных событий в ОКП

Предлагаемый классификатор может стать основой программно-алгоритмического комплекса выявления, предупреждения, оценки возможных последствий и методов парирования опасных событий в ОКП.

Рассмотрим некоторые из структурных блоков классификатора.

#### Блок классификатора «Опасные сближения»

Данный вид опасной ситуации может возникнуть при сближении функционирующего КА с различными космическими объектами. Относительная скорость сближения может варьироваться от метров в секунду (для «догоняющего» объекта) до нескольких километров в секунду (для объектов с большой величиной угла пересечения траекторий движения). Как

правило, опасность такой ситуации усугубляется незнанием истинных параметров траектории движения каждого из сближающихся объектов. Это приводит 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 порога опасных сближений: 10 км или 5 км. При этом минимально допустимый уровень вероятности столкновения полагается равным  $10^{-4}$  [7]. События сближений, прогнозируемые на расстоянии десяти и более километров, не считаются опасными и, как правило, игнорируются операторами космических полетов.

При решении задачи определения траектории движения КА в гравитационном поле Земли с учетом возмущений от несферичности поля тяготения, светового давления, сопротивления верхних слоев атмосферы, притяжении Луны и Солнца космический объект рассматривается в качестве материальной точки с известным отношением его характерной площади к массе. На практике это отношение является переменной величиной, имеющей сложный, зачастую непрогнозируемый характер изменения во времени, и постоянно уточняется наблюдениями за самим объектом. В ходе многолетних наблюдений в космическом пространстве выявлены многочисленные объекты с отношением характерной площади к массе, достигающим значений  $40 \text{ м}^2/\text{кг}$  и более. Надежное прогнозирование траектории движения таких КО требует учета существенных возмущений от светового давления.

Сближения могут быть разделены на два типа:

- кратковременное сближение, при котором относительная скорость объектов в точке с минимальным расстоянием между их траекториями превышает 10% от орбитальной скорости наиболее быстрого КО;
- продолжительное сближение, при котором относительная скорость КО в момент сближения меньше указанного порога. Такой вид сближений является характерным, например, для полетов в формации или для инспекции геостационарных КА.

Подробную классификацию опасных сближений можно представить в виде блок-схемы событий и связей между ними (рис. 6).

Например, событие инспекции (преднамеренное маневрирование вблизи космического аппарата (как правило, принадлежащего другому государству) с целью выявления его технических характеристик, контроля активности в радиочастотных каналах или активного 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, траектории движения которых уточняются радиотехническими измерениями) подклассу прогнозируемых опасных сближений.



Рис. 6. Классификация опасных сближений

Представляется целесообразным события опасных сближений разделить на несколько видов. Отнесение событий к т.н. *прогнозируемым* и *непрогнозируемым* определяется возможностью априорного определения параметров движения обоих объектов, участвующих в сближении. *Наблюдаемость* сближения зависит от возможности применения методов оптического, радиолокационного, лазерного или радиотехнического контроля движения КО. Например, регулярное сопровождение малоразмерных КА типа «кубсат» на высоких орбитах существенно ограничено пропускной способностью наземных оптических средств. *Управляемость* и *неуправляемость* сближения, в терминологии данного классификатора, определяется возможностью КА к активному уклонению от опасного сближения.

#### **Блок классификатора «Столкновение двух космических объектов»**

Столкновение двух космических объектов, как вид опасной ситуации в космосе, может быть классифицировано при помощи схемы, представленной на рис. 7.

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

Столкновения подразделяются на виды, определяющими признаками которых является сохранение работоспособности космического аппарата, его полное либо частичное разрушение с изменением траектории движения сохранившихся элементов его конструкции.

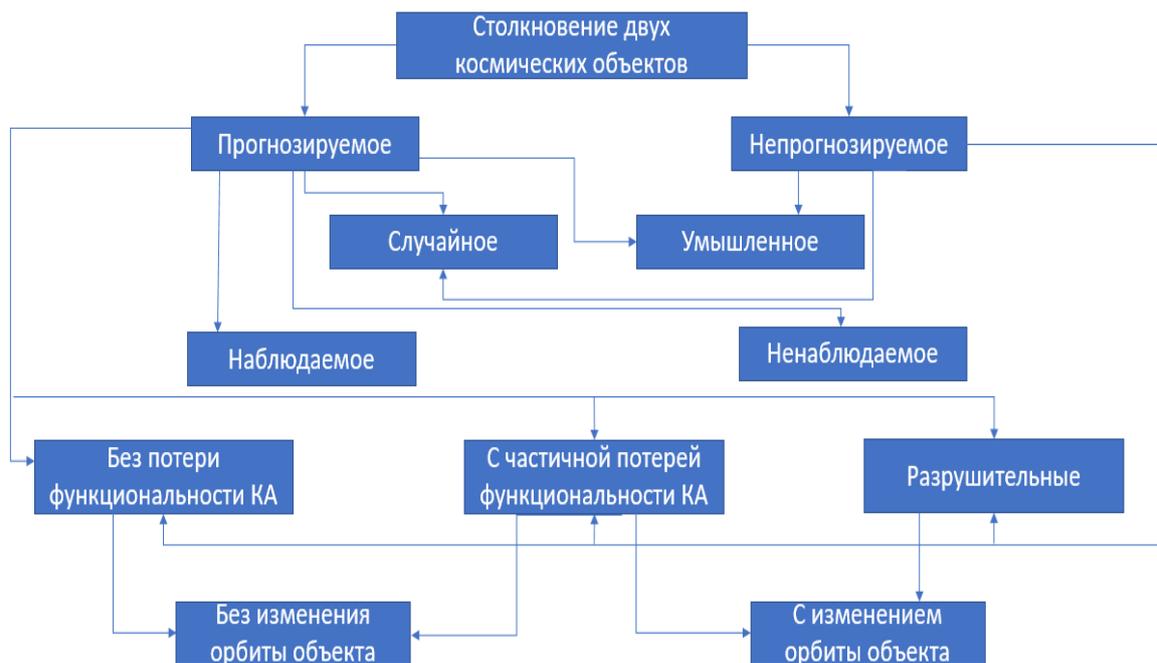


Рис. 7. Классификация столкновений двух космических объектов в ОКП

### **Блок классификатора «Саморазрушение космического аппарата либо космического объекта»**

Данный вид опасной ситуации может произойти в результате взрывной детонации остатков топлива, разрушения конструкции давлением остатков газа наддува в баках и баллонах или электролита в аккумуляторных батареях космического аппарата.

Наиболее вероятными причинами возникновения подобных событий являются:

- несоблюдение технических процедур, приводящих в пассивное состояние космический аппарат, выработавший свой ресурс, или разгонный блок после завершения выведения полезной нагрузки. Конечной целью проведения таких процедур является устранение внутренней энергии, содержащейся в космическом объекте. Данные процедуры включают в себя, например, стравливание остатков топлива и газов наддува, замыкание контактов аккумуляторных батарей и т.п.

- постепенная деградация внешней экранно-вакуумной теплоизоляции аппарата под воздействием неблагоприятных факторов космического полета (вакуум, циклический нагрев солнечным излучением, воздействие заряженных частиц и атомарного кислорода в ионосфере, влияние магнитного поля Земли);

- тепловой нагрев при аэродинамическом торможении объекта в верхних слоях атмосферы Земли;

- электрический пробой вследствие накопления заряда статического электричества элементами конструкции КА;

- химические реакции с участием остатков топлива или электролита аккумуляторных батарей;
- механическое разрушение элементов конструкции из-за быстрого вращения космического аппарата вследствие передачи ему кинетического момента гироскопов либо истечения газов из системы ориентации и орбитального маневрирования.

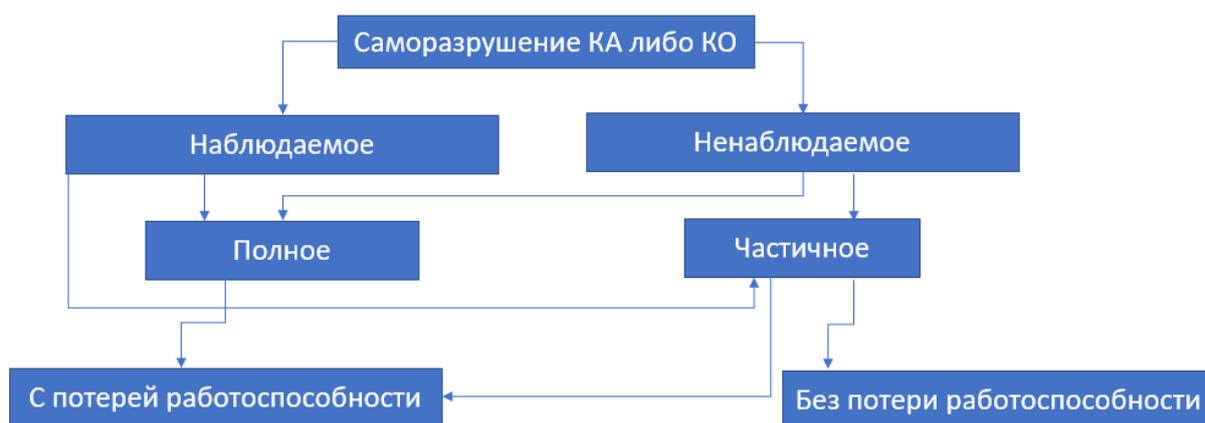


Рис. 8. Классификация видов саморазрушения космического аппарата либо космического объекта в околоземном космическом пространстве

Полным разрушением считается взрыв столкнувшегося КА, когда образуются малоразмерные (ненаблюдаемые) фракции космического мусора.

В результате саморазрушения, помимо возможной потери функциональности космического аппарата, часто образуются долгоживущие фрагменты, которые представляют серьезную опасность для космической деятельности.

### **Блок классификатора «Неуправляемый вход в атмосферу»**

В процессе космического полета на КА действует аэродинамическое сопротивление верхних слоев атмосферы, уменьшающее высоту полета. Термин «неуправляемый» подразумевает отсутствие какой-либо возможности целенаправленного приведения КА в заданный район Земли. Опасность неуправляемого входа состоит в том, что не все элементы конструкции КА сгорают в плотных слоях земной атмосферы. Как правило, детали аппарата, сделанные из тугоплавких материалов и титана (камеры сгорания двигательных установок, шар-баллоны наддува топливных баков и т.п.), достигают поверхности Земли.

Классификация события неуправляемого возвращения в атмосферу Земли представлена на рис. 9.

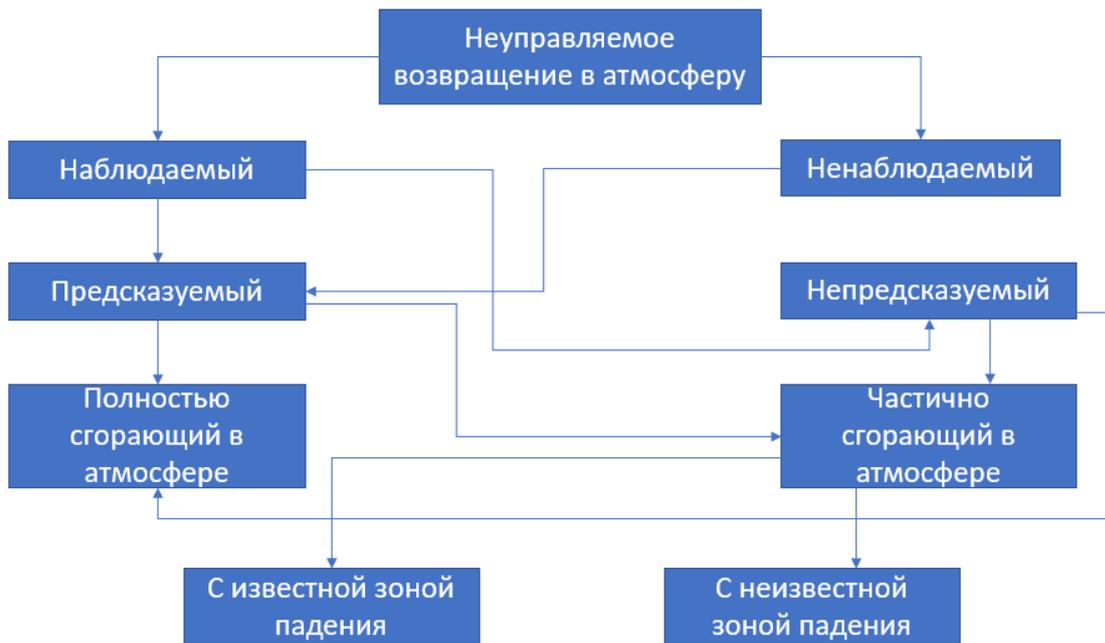


Рис. 9. Классификация неуправляемого возвращения в атмосферу Земли

Указанный вид опасной ситуации подразделяется на т.н. *наблюдаемый* и *ненаблюдаемый* (средствами контроля ОКП). *Предсказуемость* неуправляемого возвращения в атмосферу Земли аппарата на низкой околоземной орбите или высокоэллиптической орбите с низким перигеем зависит, среди прочих факторов, от степени износа систем самого космического аппарата. Чем больше срок его эксплуатации, тем выше вероятность потери аппарата из-за отказа его бортовых систем.

Во избежание такого сценария при проектировании полета должны быть предусмотрены специальные заключительные операции либо по управляемому возвращению космического аппарата в атмосферу, либо по его уводу на орбиту «захоронения» с большим сроком баллистического существования.

### **Блок классификатора «Неблагоприятное воздействие факторов космической среды»**

Как уже было отмечено во введении, погрешность определения оставшегося срока баллистического существования космического объекта составляет 10%. Основным препятствием к улучшению точности определения срока существования КО является сложность прогнозирования «космической погоды», т.е. совокупности явлений, происходящих в верхних слоях земной атмосферы, ионосфере и магнитосфере Земли [8]. Основным формирующим фактором здесь выступает воздействие солнечного излучения (прежде всего в ультрафиолетовом диапазоне спектра), воздействие высокоэнергичных заряженных частиц солнечного, галактического и внегалактического происхождения, в том числе при пролете низкоорбитального КО над районом Южной магнитной аномалии. В частности, воздействие излучения Солнца на

ионосферу Земли приводит к изменению плотности набегающего потока (в целом и в виде «горба» над освещенным полушарием), существенно влияя на точность прогноза движения КО. На (рис. 10) представлен соответствующий блок классификатора.

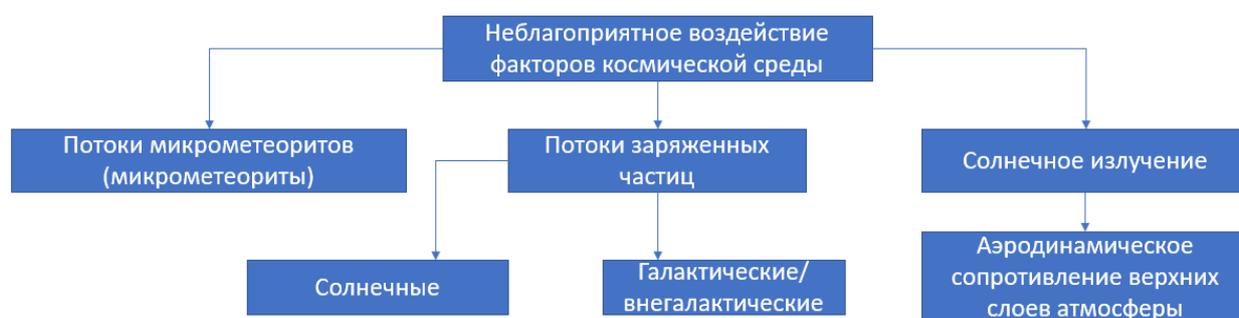


Рис. 10. Классификация неблагоприятного воздействия факторов космической среды

В свою очередь, заряженные частицы представляют собой серьезную опасность для функционирующего космического аппарата. Попадание массивной заряженной частицы может вызвать сбой микроэлектроники КА. Воздействие атомарного кислорода и ультрафиолетового излучения приводит к деградации фотопреобразователей (обугливание) панелей солнечных батарей, вызывает потемнение лакокрасочных покрытий, расслоение тонкопленочной экранно-вакуумной теплоизоляции, снижение оптических характеристик иллюминаторов и космических приборов. Данные факторы надо учитывать при планировании работы космических миссий.

#### **Блок классификатора «Астероидно-кометная опасность»**

В качестве отдельного вида космических угроз следует отметить астероидно-кометную опасность (АКО), включающую угрозу столкновения малого тела (астероида или кометы) с Землей. В настоящий момент реальных средств предупреждения и парирования данной угрозы не существует. Для оценки риска АКО используется так называемая Туринская шкала астероидной опасности [9]. На рис. 11 представлен классификатор АКО.

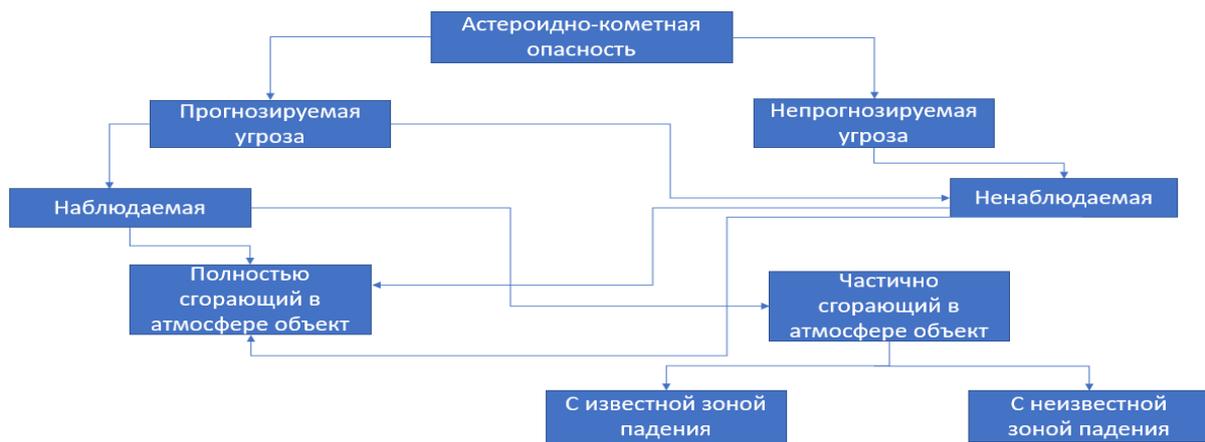


Рис. 11. Классификатор АКО

Объекты АКО подразделяются на прогнозируемые и непрогнозируемые (в зависимости от достоверности баллистического прогнозирования движения объекта, интервала упреждения), наблюдаемые и ненаблюдаемые (в зоне видимости оптических или радиотехнических средств наблюдения, включая визуальные). Когда они невидимы аппаратурой наблюдения, они могут представлять внезапную угрозу. Особую опасность представляют астероиды, приближающиеся к Земле со стороны Солнца, т.к. их невозможно наблюдать с Земли. Небесные тела могут полностью либо частично сгорать в атмосфере Земли (в зависимости от размера и состава объекта). Объекты, полностью сгорающие в тропосфере Земли, не совсем безопасны, т.к. несут угрозу поражения ударной волной. Объекты, частично сгорающие в атмосфере, можно различать как объекты с предсказуемой зоной падения либо с непредсказуемой (зависит от точности прогноза траектории движения).

Астероидно-кометная опасность плохо предсказуема. Минимальное время, необходимое для эффективного развертывания средств её парирования, составляет не менее трех суток для объектов размера 10-50 метров (условно называемых «объектами декаметрового размера»), а для объектов метрового размера – несколько часов.

В настоящее время проводится большая теоретическая работа по созданию средств активного противодействия угрозам из космоса. Они могут быть *оперативные* и *долгосрочные*. К оперативным относятся средства кинетического или гибридного воздействия (ударно-взрывного). К долгосрочным средствам можно отнести воздействие на опасный объект с использованием т.н. эффекта Ярковского–О'Кифа–Радзиевского–Пэддэка, заключающегося в изменении траектории движения центра масс небольших астероидов из-за воздействия светового давления.

## 4 Выводы

Представленный в настоящем препринте классификатор свидетельствует о многочисленности и разнообразии типов обстоятельств, которые могут быть причинами аварийных ситуаций при выполнении космических миссий. Он предназначен для того, чтобы

- выделить причинно-следственные связи событий, которые могут поставить под угрозу безопасность космических операций;
- стимулировать разработку адекватных математических, алгоритмических, программных методов и средств прогнозирования опасных, нежелательных ситуаций;
- стимулировать поиск новых методов контроля и мониторинга ближнего космоса;
- определить совокупность мер по предотвращению опасных ситуаций;
- способствовать расширению научных знаний об объектах и событиях в околоземном космическом пространстве, могущих стать препятствием для успешного выполнения космических проектов.

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 в ОКП.

## Библиографический список

1. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор – угроза человечеству / Под ред. Р.Р. Назирова, О.Ю. Аксенова. – М.: ИКИ РАН, 2012. – 191 с.
2. Kessler D.J., Cour-Palais B.G. Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt // *Journal of Geophysical Research*. 1978. V. 83, No. A6. P. 2637–2646.
3. Павлова Е.А., Захваткин М.В., Стрельцов А.И., Еленин Л.В., Жорниченко А.А., Воропаев В.А. Обеспечение безопасности полетов высокоорбитальных космических аппаратов // Всероссийская научная конференция «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы»: Сб. трудов. – М.: ИКИ РАН, 2019, – 239 с. – С. 131–138.
4. 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, Volume. 1
5. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 384 с.
6. Rovetto J. R. Ontology For Europe’s Space Situational Awareness – Proc. of 7<sup>th</sup> European Conference on Space Debris, ESA SD-05, 2017. P. 333-355.

7. Klinkrad H. Space Debris. Models and Risk Analysis. – Praxis Publishing Ltd: Chichester, UK, 2006. – x + 430 p.

8. Центр прогнозов космической погоды ИЗМИРАН  
<http://spaceweather.izmiran.ru/>

9. Российская астрономическая сеть <http://www.astronet.ru/db/msg/1178699>