

УДК: 629.78

DOI: 10.53816/20753608_2022_2_50

МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗОНЫ БЕЗОПАСНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

A MODEL FOR EVALUATION OF THE SPATIO-TIME CHARACTERISTICS OF THE DYNAMIC SAFETY ZONE OF SATELLITES

Чл.-корр. РАРАН А.Ю. Данилюк¹, Е.П. Минаков², А.Е. Привалов², Б.А. Данилюк²

¹АО «КБ» Арсенал» им. М.В. Фрунзе, ²Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

A.Yu. Danylyuk, E.P. Minakov, A.E. Privalov, B.A. Danylyuk

В статье представлен подход к обеспечению безопасности космических аппаратов, основанный на заблаговременном предупреждении их столкновения с опасными объектами природного и техногенного происхождения. Данный подход реализуется по средствам расчета и последующего контроля зоны безопасности — области околоспутникового пространства, наблюдение за которой позволит своевременно распознать угрозу и при необходимости парировать её. Определены методы расчета пространственно-временных характеристик данного пространства. Приведены примеры расчета данного пространства для защиты метеорологического космического аппарата «Арктика-М» от воздействия космического мусора, движущегося с наиболее вероятными скоростями при различных характеристиках процесса мониторинга.

Ключевые слова: мониторинг космической обстановки, космический мусор, оптико-электронная система.

The article presents an approach to protecting satellites by early warning of their collision with dangerous objects of natural and man-made origin. This approach is implemented by means of calculation and subsequent control of the security zone — an area near the satellite, the observation of which will allow timely recognition of the threat and, if necessary, parry it. Methods for calculating the spatio-temporal characteristics of a given space are determined. Examples are given of calculating this space to protect the Arktika-M meteorological satellite from the impact of space debris moving at the most probable speeds for various characteristics of the monitoring process.

Keywords: space monitoring, space debris, optical electron system.

Введение

Одной из актуальных задач современного этапа освоения космического пространства является предупреждение столкновения космических аппаратов (КА) с космическим мусором (КМ) природного и техногенного происхождения. Для решения данной задачи необходимо осуществлять непрерывный мониторинг космической обстановки (КО), образован-

ной КМ. Для этой цели в Российской Федерации создана и эксплуатируется автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП) Роскосмоса [1]. Одной из основных задач АСПОС ОКП является прогноз развития опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве, к которым относятся опасные сближения КМ с функционирующими КА.

Прогнозирование опасных ситуаций, как правило, осуществляется на основании прогноза параметров движения, каталогизированного КМ. Вместе с тем современная космическая обстановка характеризуется высокой вероятностью возникновения непрогнозируемых опасных ситуаций [2]. Причиной возникновения непрогнозируемых ситуаций могут стать самопроизвольные разрушения КМ (например, разрушение на 550 обломков ступени «Центавр» в области высокоэллиптических орбит 30 августа 2018 года [3]), с одной стороны, и ограничение пропускной способности средств мониторинга КО — с другой. В связи с повышением вероятности возникновения непрогнозируемых опасных ситуаций, в статье предлагается подход к обеспечению безопасности КА, основанный на мониторинге динамической зоны безопасности (ДЗБ), под которой понимается область космического пространства, наблюдение КО в которой обеспечит парирование опасной ситуации (ОС) за располагаемое время. Здесь опасной считается ситуация, при которой вероятность столкновения КМ и КА превышает порог безопасности (например, для Международной космической станции $p_6 = 10^{-4}$ [4]). Разработка универсальной модели зоны безо-

пасности в форме эллиптического тора представлена в работе [5]. В [6] сформулированы условия сокращения этой области с применением временного фильтра, однако сохраняется необходимость наличия априорной информации о КМ. В статье предлагаются новые модели процесса мониторинга КО в зоне безопасности КА на основании непрерывных Марковских цепей, и динамической зоны безопасности КА, учитывающие текущее положение КА и возможности используемых средств мониторинга КО.

Постановка задачи

На концептуальном уровне зону безопасности можно представить в форме области пространства, заключенной между двумя поверхностями: рубежом мониторинга и рубежом безопасности (рис. 1). Рубеж безопасности представляет собой поверхность, ограничивающую защищаемую область, т.е. область, при попадании в которую КМ создает ОС. Размер защищаемой области должен представлять собой сумму максимально возможных отклонений КА и КМ от номинальной траектории на рассматриваемом интервале времени, а также радиусов их габаритных сфер. Для оценивания характеристик

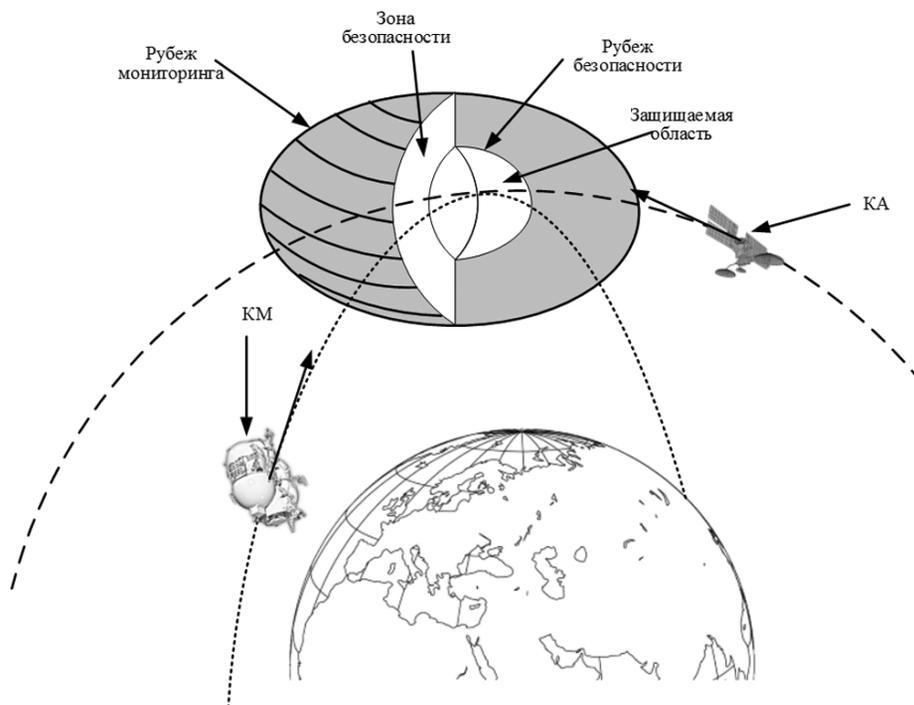


Рис. 1. Концептуальная модель зоны безопасности

рубежа безопасности можно воспользоваться методикой, предложенной в [7].

Под рубежом мониторинга понимается такая замкнутая поверхность, когда наблюдение пересечения с ней опасного КМ обеспечит с требуемой вероятностью парирование ОС. Основными факторами, определяющими характеристики рубежа мониторинга, являются скорость движения КМ и длительность процесса парирования опасных ситуаций в ОКП, который состоит из следующих этапов.

1. Первичные измерения оптико-электронными и радиолокационными средствами наземного и (в перспективе) орбитального базирования.
2. Идентификация КМ и расчет параметров его движения.
3. Принятие решения об опасности ситуации.
4. Реализация решения (выполнение операций, необходимых для парирования опасной ситуации).

В общем случае эти процессы осуществляются в различных пунктах (центрах), следовательно, необходим учет времени передачи информации между ними. Длительность каждого этапа, как правило, случайна и характеризуется средним временем выполнения каждого этапа. Кроме того, возможны ошибки идентификации и принятия решения.

Исходными данными для разработки данной модели являются:

1. T — непрерывное множество моментов времени;
2. Кеплеровские элементы орбиты КА

$$K = \{\Omega, i, \omega, p, e, m\},$$

где Ω — прямое восхождение восходящего узла орбиты;

- i — наклонение орбиты;
- ω — аргумент широты перигея орбиты;
- p — фокальный параметр орбиты;
- e — эксцентриситет орбиты;
- m — средняя аномалия;

3. $v_{\text{ОКМ}}$ — скорость движения опасного КМ т.е. КМ, вероятность столкновения с которым выше установленного порога безопасности p_{σ} .

4. Характеристики процесса мониторинга КО:

$$X = \{t_{\text{изм}}, t_{\text{обр}}, t_{\text{реш}}, t_{\text{пар}}, p_{\text{обр}}, p_{\alpha}\},$$

где $t_{\text{изм}}$ — интервал между измерениями параметров движения КМ, определяемый пропускной способностью средств мониторинга КО;

$t_{\text{обр}}$ — среднее время обработки измерительной информации

$$t_{\text{обр}} = t_{\text{пер.1}} + t_{\text{ОИ}},$$

$t_{\text{пер.1}}$ — среднее время передачи измерительной информации от средств измерений в центре обработки;

$t_{\text{ОИ}}$ — среднее время обработки измерительной информации в центре обработки с целью идентификации КМ и определения его параметров движения;

$t_{\text{реш}}$ — среднее время принятия решения на парирование опасной ситуации;

$$t_{\text{реш}} = t_{\text{пер.2}} + t_{\text{ПР}},$$

$t_{\text{пер.2}}$ — среднее время передачи информации о параметрах движения КМ от центра обработки информации до центра принятия решений;

$t_{\text{ПР}}$ — среднее время принятия решений на парирование опасной ситуации (например, выполнения защитного маневра уклонения);

$t_{\text{пар}}$ — среднее время парирования опасной ситуации;

$$t_{\text{пар}} = t_{\text{пер.3}} + t_{\text{РР}};$$

$t_{\text{пер.3}}$ — среднее время передачи решения на борт КА;

$t_{\text{РР}}$ — среднее время выполнения мероприятий по реализации решения;

$p_{\text{обр}}$ — вероятность успешного обнаружения КМ;

p_{α} — ошибка первого рода при принятии решения (вероятность признать неопасной опасную ситуацию).

Требуется:

1. Разработать модель оценивания временных характеристик процесса мониторинга КО

$$P(t_{\Sigma} \leq t_{\Delta}) = \xi(t_0, X),$$

где $P(\cdot)$ — вероятность случайного события (\cdot);
 t_{Δ} — располагаемое время для парирования ОС;

$$t_{\Delta} = t_{\text{OC}} - t_0;$$

t_0 — текущее время ($t_0 \in T$);

t_{OC} — расчетное время возникновения опасной ситуации ($t_{\text{OC}} \in T$);

t_{Σ} — совокупная длительность всех этапов мониторинга КО.

2. Модель динамической зоны безопасности КА

$$\Theta = \Psi(t_0, v_{\text{ОКМ}}, K, X),$$

такую, что для любого опасного КМ выполняется условие

$$P(t_{\Sigma} \leq t_{\Delta}) \leq p_{\text{треб}},$$

где $p_{\text{треб}}$ — пороговое значение вероятности предупреждения опасной ситуации.

Исходя из постановки задачи, в текущий момент времени t_0 для предотвращения с вероятностью $p_{\text{треб}}$ столкновений КА, движущегося по орбите K , с КМ, движущимся со скоростью $v_{\text{ОКМ}}$ в произвольном направлении, требуется мониторинг с характеристиками X зоны безопасности Θ .

Модель оценивания временных характеристик процесса мониторинга космической обстановки в зоне безопасности

Процесс мониторинга КО в зоне безопасности представляет собой последовательность переходов между состояниями, которые осуществляются с интенсивностями, определяемыми временными и вероятностными характеристиками процесса мониторинга. Опишем данный процесс при помощи диффузной Марковской модели [8]. Граф переходов процесса мониторинга представлен на рис. 2.

На рис. 2 обозначены следующие состояния: q_1 — появление КМ в зоне безопасности, КМ не обнаружен; q_2 — получены первичные данные о КО в зоне безопасности, КМ не обнаружен; q_3 — КМ обнаружен, q_4 — КМ определен как

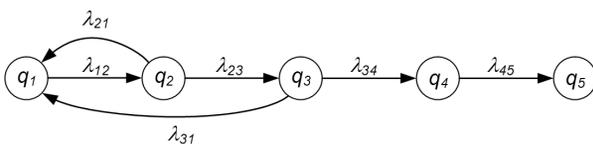


Рис. 2. Граф переходов процесса мониторинга КО

опасный; q_5 — выполнены мероприятия парирования опасной ситуации. Соотношения для расчета интенсивностей переходов приведены ниже:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{t_{\text{изм}}}, \lambda_{23} = \frac{1}{t_{\text{обр}}} p_{\text{обр}}, \lambda_{21} = \frac{1}{t_{\text{обр}}} (1 - p_{\text{обр}}),$$

$$\lambda_{31} = \frac{1}{t_{\text{реш}}} p_{\alpha}, \lambda_{34} = \frac{1}{t_{\text{реш}}} (1 - p_{\alpha}), \lambda_{45} = \frac{1}{t_{\text{пар}}}.$$

Обозначим $p_j, j = \overline{1,5}$ — вероятности состояний q_j соответственно и составим систему дифференциальных уравнений, построенных по правилу Колмогорова [8]

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = \lambda_{21}p_2 + \lambda_{31}p_3 - \lambda_{12}p_1, \\ \frac{dp_2}{dt} = \lambda_{12}p_1 - \lambda_{21}p_2 - \lambda_{23}p_2, \\ \frac{dp_3}{dt} = \lambda_{23}p_2 - \lambda_{31}p_3 - \lambda_{34}p_3, \\ \frac{dp_4}{dt} = \lambda_{34}p_3 - \lambda_{45}p_4, \\ \frac{dp_5}{dt} = \lambda_{45}p_4. \end{cases}$$

При появлении КМ в зоне безопасности в момент времени t_0 процесс мониторинга находится в состоянии q_1 , следовательно, вектор начального состояния моделируемого процесса определяется $\mathbf{p}(t_0) = (\mathbf{p}_i(t_0))^T = (\mathbf{1}, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0})^T$. Совокупная длительность всех этапов мониторинга t_{Σ} определяется временем перехода процесса из начального состояния в состояние q_5 . Вероятность того, что t_{Σ} не превысит располагаемое время на парирование ОС t_{Δ} определяется вероятностью $p_5(t_{\Delta})$

$$P(t_{\Sigma} \leq t_{\Delta}) = p_5(t_{\Delta}).$$

Модель определения пространственных характеристик динамической зоны безопасности

Введем для момента t_0 расчетную систему координат (РСК) $Oxuz$, такую, что она неподвижна относительно абсолютной геоцентрической экваториальной системы координат и ее оси совпадают с осями орбитальной системой

координат в момент времени t_0 (начало координат O совмещается с центром масс КА, ось Oz направлена по радиус-вектору КА, ось Ox направлена по трансверсали к радиус-вектору в сторону движения КА и принадлежит к плоскости орбиты, ось Oy дополняет СК до декартовой правой [10]). Исходя из определения, РСК является инерциальной.

Рассмотрим взаимное движение КА и КМ в РСК. Вектор скорости КА, движущегося по эллиптической орбите, лежит в плоскости Oxz (рис. 3). Его проекции на оси Ox и Oz равны трансверсальной и радиальной составляющим соответственно. Воспользовавшись уравнениями кинематических характеристик движения центра масс КА в плоскости орбиты [11], запишем:

$$\mathbf{V}_{\text{ЗКА}} = \left(\sqrt{\frac{\mu}{p}} (1 + e \cos \vartheta(t_0)), 0, \sqrt{\frac{\mu}{p}} e \sin \vartheta(t_0) \right)^T,$$

где μ — гравитационная постоянная Земли ($\mu = 398600,44 \text{ км}^3/\text{с}^2$)

$\vartheta(t_0)$ — истинная аномалия, которая для t_0 определяется путем решения уравнений Кеплера и Гаусса [11].

Направление движения опасного КМ в момент времени t_0 характеризуется углами:

β — угол между проекцией вектора скорости КМ на плоскость местного горизонта Oxy и осью Ox , ($\beta \in [0, 2\pi)$);

γ — угол между вектором скорости КМ и осью Oz ($\gamma \in [0, 2\pi)$).

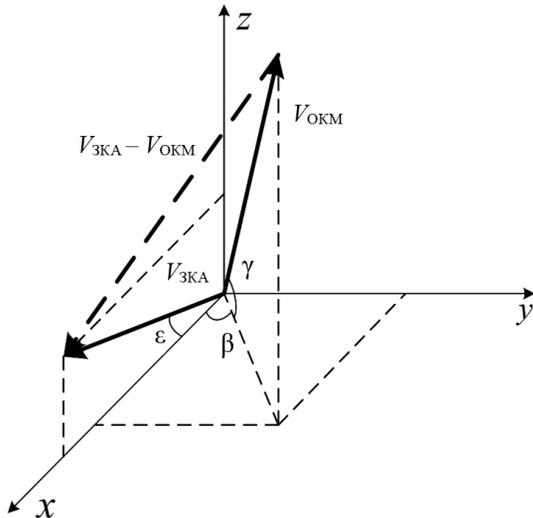


Рис. 3. К определению векторов скоростей КА и КМ

В проекциях на оси орбитальной РСК скорость произвольного космического объекта выражается вектором

$$\mathbf{V}_{\text{ОКМ}} = (v_{\text{ОКМ}} \cos \beta \cos \gamma, v_{\text{ОКМ}} \sin \beta \cos \gamma, v_{\text{ОКМ}} \sin \gamma)^T.$$

Здесь следует отметить, что расчет зоны безопасности целесообразен только в том случае, когда ее размер существенно меньше длины орбиты КА. Исходя из данного утверждения, примем допущение о прямолинейности участков траекторий КА и КМ в пределах зоны безопасности. Тогда вектор скорости сближения КА и КМ равен разности векторов их скоростей (рис. 3)

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{\text{сбл}} &= \mathbf{V}_{\text{ЗКА}} - \mathbf{V}_{\text{ОКМ}} = \\ &= \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{\mu}{p}} (1 + e \cos \vartheta(t_0)) - v_{\text{ОКМ}} \cos \beta \cos \gamma \\ -v_{\text{ОКМ}} \sin \beta \cos \gamma \\ \sqrt{\frac{\mu}{p}} e \sin \vartheta(t_0) - v_{\text{ОКМ}} \sin \gamma \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} v_{\text{сбл.}x} \\ v_{\text{сбл.}y} \\ v_{\text{сбл.}z} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Поскольку КА в момент времени t_0 находится в начале координат, координаты рубежа мониторинга в направлении, определяемом углами β и γ

$$t_{\Delta} \theta_{\beta, \gamma} = \mathbf{V}_{\text{сбл}}(\beta, \gamma) \cdot t_{\Delta},$$

где располагаемое время для парирования ОС t_{Δ} определяется из выражения

$$t_{\Delta} : p_5(t_{\Delta}) = p_{\text{треб}}.$$

Рубеж мониторинга представляет собой совокупность θ точек пространства, координаты которых в РСК на момент времени t_0 представляют собой множество

$$\begin{aligned} \theta &= \{ \theta_{\beta, \gamma} \mid \beta, \gamma \in [0, 2\pi) \} = \\ &= \{ \mathbf{V}_{\text{сбл}}(\beta, \gamma) \cdot t_{\Delta} \mid \beta, \gamma \in [0, 2\pi) \}. \end{aligned}$$

Область безопасности представляет собой множество точек пространства, удовлетворяющих условию

$$\Theta = \{ \mathbf{V}_{\text{сбл}}(\beta, \gamma) \cdot t \setminus \Theta_Z \mid \beta, \gamma \in [0, 2\pi), t \leq t_{\Delta} \},$$

где Θ_Z — множество точек пространства, составляющих зону безопасности КА.

Пример расчета зоны безопасности для заданной точки орбиты космического аппарата

Для расчетного примера был выбран метеорологический КА «Арктика-М», запущенный 28 февраля 2021 года с космодрома Байконур. Кеплеровские элементы орбиты КА приведены в таблице. Расчеты проводились для случайно выбранного момента времени $t_0 = 41712$ с (от момента пересечения перигея). Были спланированы и проведены два вычислительных эксперимента. Исходные данные для проведения экспериментов приведены в таблице.

Эксперимент № 1 — исследование зависимости характеристик ДЗБ от скорости КМ. В качестве скорости КМ были выбраны четыре варианта:

- первая космическая скорость на высоте КА (скорость КМ, движущегося по круговой орбите);
- вторая космическая скорость на высоте КА (предел скорости для КМ на околоземной орбите);
- скорость ниже первой космической (характерная для апогейного участка КМ на высокоэллиптической орбите);
- скорость выше второй космической (скорость метеороидов и астероидов).

Эксперимент № 2 — исследование зависимости характеристик ДЗБ от характеристик процесса мониторинга КО.

На рис. 4 представлены результаты оценивания временных характеристик процесса мониторинга космической обстановки для варианта № 4 эксперимента № 2.

Результаты экспериментов № 1 и № 2 представлены на рис. 5 и 6 соответственно в форме проекций эллипсоида ДЗБ КА на плоскости Oxy и Oxz РСК для различных значений исследуемых факторов. Аналогичным образом может быть осуществлен расчет зоны безопасности для любой точки орбиты КА.

Таблица

Исходные данные для проведения экспериментов

Параметр	Единицы измерения	Эксперимент № 1				Эксперимент № 2					
		1	2	3	4	1	2	3	4		
К	Ω	град.									
	i	град.									
	ω	град.									
	p	км.									
	e	–									
	m	град.									
t_0	с										
$p_{\text{треб}}$	–										
$V_{\text{ОКМ}}$	км/с		3,24 $< V_{1,\text{косм}}$	5,34 $V_{1,\text{косм}}$	7,55 $V_{2,\text{косм}}$	10,89 $> V_{2,\text{косм}}$	7,55 $V_{2,\text{косм}}$				
$V_{\text{ЗКА}} / V_{\text{ОКМ}}$	–		2	1,2	0,86	0,6	0,86				
Х	$t_{\text{изм}}$	с				1					
	$t_{\text{обр}}$	с				5					
	$t_{\text{реш}}$	с				5					
	$t_{\text{нар}}$	с				20					
	$p_{\text{обр}}$	–		0,99		0,99		0,99		0,95	
	p_{α}	–		0,99		0,95		0,99		0,95	

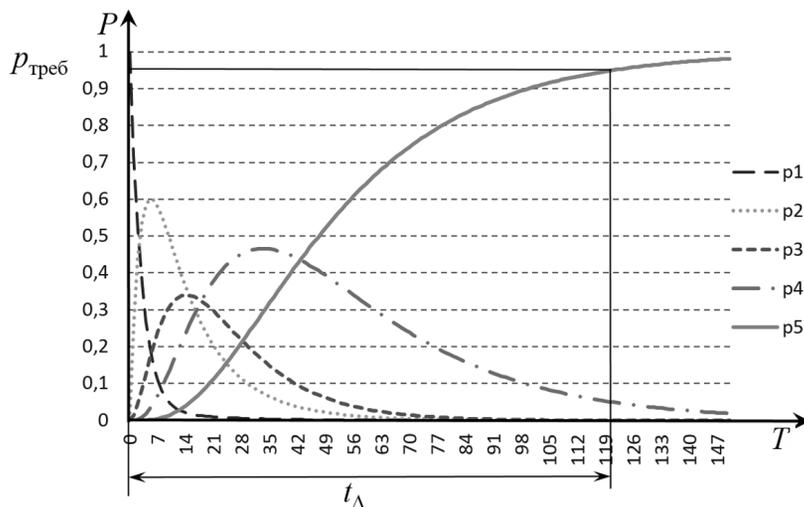


Рис. 4. Динамика изменения вероятностей состояний процесса мониторинга КО в зоне безопасности

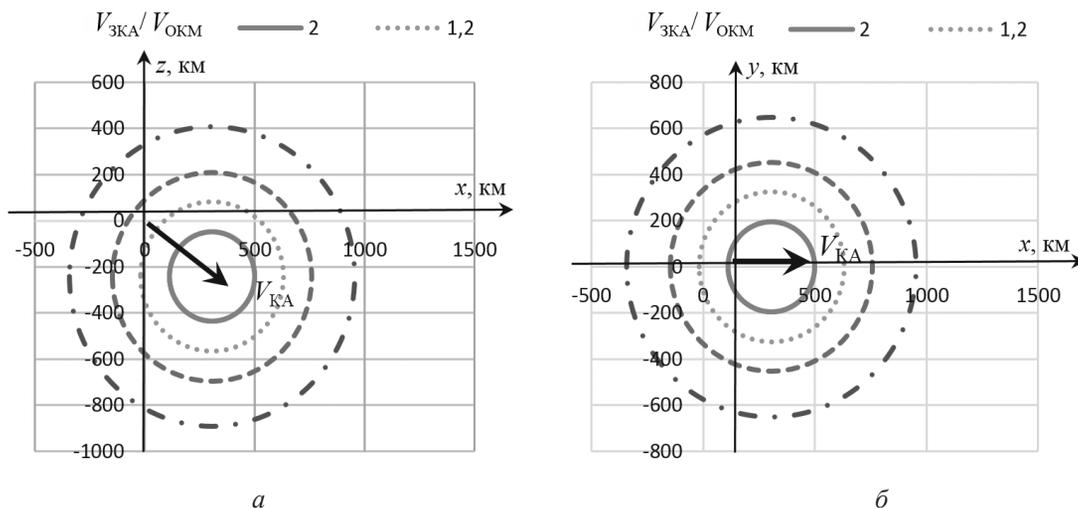


Рис. 5. Результаты эксперимента № 1

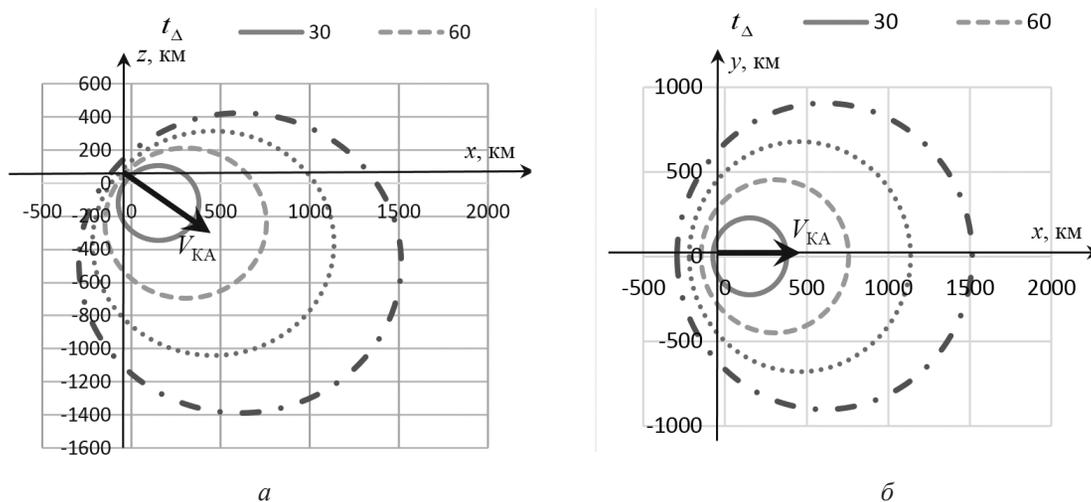


Рис. 6. Результаты эксперимента № 2

Заключение

Обилие космического мусора техногенного происхождения в околоземном космическом пространстве, а также связанное с ним увеличение числа столкновений и самопроизвольных разрушений КМ приводят к повышению вероятности возникновения непрогнозируемых опасных ситуаций. Предлагаемая в статье модель динамической зоны безопасности позволяет применить принципиально новый подход к обеспечению безопасности КА, основанный на непрерывном выявлении опасных ситуаций в околоспутниковом пространстве. Чем выше вероятность возникновения непрогнозируемых опасных ситуаций, тем актуальнее применение данного подхода. Например, для высокоэллиптических орбит мониторинг КО в динамической зоне безопасности может осуществляться при прохождении КА опасных участков — зон геостационарной орбиты, орбит захоронения и т.п.

Вместе с тем мониторинг КО в динамической зоне безопасности предъявляет жесткие требования к характеристикам средств мониторинга. Исходя из результатов расчетов, длительность процесса мониторинга КО от обнаружения опасного КМ до реализации решения на парирование опасной ситуации, составляет несколько десятков секунд. Современные наземные средства АСПОС ОКП по ряду объективных причин (влияние погодных условий, функционирование в темное время суток и т.д.) не соответствуют указанным требованиям. Следовательно, для эффективного мониторинга КО в динамических зонах безопасности требуется разработка новых средств мониторинга КО орбитального базирования, лишенных данных ограничений. Кроме того, необходима полная автоматизация процесса принятия решения на парирование опасной ситуации. С учетом миниатюризации космического аппаратостроения и появления в этой области новых игроков, вышеперечисленные задачи предстоит решать уже в ближайшем будущем.

Литература

1. Проблемы оптического мониторинга космического мусора [Электронный ресурс] / И.Е. Молотов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 7. 17 с. DOI: 10.20948/prepr-2020-7.

2. Формирование единого классификатора опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве [Электронный ресурс] / Е.А. Павлова [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 23. 22 с. DOI: 10.20948/prepr-2020-23.

3. Макаров Ю.Н. Мониторинг техногенного засорения космического пространства. Проблемы и решения [Электронный ресурс] // Наноиндустрия. Том 12. Вып. 1. С. 6–14. 2019. DOI: 10.22184/1993-8578.2019.12.1.6.14.

4. Соколов Н.Л., Захаров П.А. Автономная идентификация параметров орбит потенциально опасных космических объектов бортовыми средствами // Лесной вестник. 2016. № 2. С. 214–224.

5. Alfano S. Toroidal path filter for orbital conjunction screening // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2012. № 113. P. 231–334.

6. Баранов А.А., Каратунов М.О. Методика выявления и оценки сближений космического аппарата с объектами космического мусора // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 4. С. 11–12.

7. Каратунов М.О. Разработка методов выявления опасных сближений космического аппарата с наблюдаемыми объектами и способов уклонения от столкновений на фазирующей орбите: специальность 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Каратунов Максим Олегович; Российский университет дружбы народов. — Москва. 2020. 152 с.

8. Минаков Е.П., Шафигуллин И.Ш., Зубачев А.М. Методы исследования эффективности применения организационно-технических систем космического назначения: учебник. — СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2016. 244 с.

9. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Г.С. Нариманова и д-ра техн. наук, проф. М.К. Тихоновова. — М.: Машиностроение. 1972. 607 с.

10. Баллистика ракет-носителей и космических аппаратов / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Богачев, С.А. Васьков [и др.]. — СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2013. 242 с.

11. Новый метеорологический спутник «Арктика-М» запущен с космодрома Байконур [Электронный ресурс] / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. URL: <http://www.meteorf.ru/press/news/23581> (дата обращения: 6.05.2021).