

Анализ пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в околоземном космическом пространстве

© В.И. Колпаков, Т.В. Васильева, А.А. Пасынков,
А.С. Свешникова, О.Г. Титов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Задача обеспечения безопасной эксплуатации орбитальных станций в условиях возрастающего загрязнения околоземного космического пространства так называемым космическим мусором стала особенно актуальной при разработке Международной космической станции. Кроме того, космический мусор представляет определенную опасность для космических аппаратов, эксплуатируемых в настоящее время. Для оценки степени риска в настоящей работе представлена разработанная авторами реляционная база данных, позволяющая определить количество столкновений частиц космического мусора и параметры ударного воздействия (размер частиц, скорость столкновения) на космические аппараты, находящиеся на различных орбитах. Выполненные при этом расчеты позволили определить потенциальное количество, вероятность столкновений и параметры ударного взаимодействия космического мусора с группой малых отечественных космических аппаратов.

Ключевые слова: космический аппарат, космический мусор, база данных, околоземное космическое пространство, программное обеспечение

Введение. Под космическим мусором обычно подразумевают все неиспользуемые искусственные объекты (техногенный космический мусор) и объекты естественного происхождения в околоземном космическом пространстве (ОКП) [1]. К ним относятся вышедшие из строя спутники; отработавшие ступени ракет; фрагменты, образующиеся при их распаде и столкновениях, а также природный мусор, оставшийся от стадии формирования планетной системы (частицы пыли и льда, каменные обломки и др.). Все эти объекты являются опасным фактором воздействия на функционирующие космические аппараты. При этом главная опасность, исходящая от космического мусора, — угроза его столкновений с рабочими космическими аппаратами (КА), в результате чего последние могут выйти из строя.

Космические аппараты после выхода из эксплуатации, если их своевременно не вывести с целевой орбиты в плотные слои атмосферы, фактически становятся космическим мусором, который, в свою очередь, находясь на высоте 350...450 км, сгорает в верхних слоях за 2,5–3,5 года, а на геостационарной орбите он может оставаться до нескольких столетий [2]. Несмотря на то что мусор на Низкой околоземной орбите (НОО) с течением времени может сгореть, это

не уменьшает его опасности, так как на этой орбите находится наибольшее количество КА.

В настоящее время проблема космического мусора рассматривается как основной вид космической опасности [1], поэтому ей уделяют серьезное внимание и посвящают большое количество научных публикаций [3–7]. Причем особенно важными считаются своевременное выявление угроз, связанных с космическим мусором, надежная оценка рисков и разработка методов противодействия им.

Количество опасных объектов в ОКП в настоящее время исчисляется миллионами единиц. Согласно данным NASA (National Aeronautics and Space Administration), на январь 2019 г. в ОКП насчитывалось 130 млн объектов размером 0,1...1 см, 0,9 млн — 1...10 см и 34 тыс. — более 10 см. Первые из них способны нанести серьезные повреждения КА, вторые — серьезные механические повреждения или уничтожение КА и, наконец, третьи — гарантированное уничтожение КА [1]. Как показывают представленные данные, количество объектов, потенциально способных вывести из строя работающий автоматический КА или пилотируемый корабль, достигает многих сотен тысяч, а объектов, способных нанести КА заметный ущерб, в тысячу раз больше.

Космическая среда, окружающая спутник, является агрессивной из-за плотных потоков частиц мелкого космического мусора размерами менее 1 мм, а также из-за ультрафиолетового излучения, плазмы космоса, протонов, которые своим воздействием приводят к деградации поверхности КА. В первую очередь влиянию космической среды подвержены солнечные батареи, что, например, приводит к уменьшению срока службы энергетического модуля Международной космической станции (МКС) в целом [6]. Все это способствует интенсивному увеличению техногенного загрязнения на НОО из-за преждевременного завершения срока работоспособности спутников, который, как правило, рассчитан на 5-15 лет [7, 8].

Риск, связанный с угрозой столкновения того или иного объекта с космическим мусором, определяется вероятностью столкновения и обуславливает последствия для конкретного КА. Для расчета вероятности конкретного столкновения требуется хорошее знание элементов орбиты обоих объектов. Как правило, для большинства КА и тем более для объектов космического мусора точность определения положения на орбите в геоцентрической прямоугольной системе координат составляет несколько сотен метров. Понятно, что расчет вероятности столкновений объектов, размеры которых на несколько порядков меньше, представляет собой трудную задачу. Ее решение, в свою очередь, позволит перейти к адекватному изучению последствий столкновений — проблеме, относящейся к физике высокоскоростного удара.

Таким образом, анализируя информацию о степени повреждения элементов КА высокоскоростными частицами космического мусора, возможно в перспективе корректировать конструкцию и материальное оснащение КА при проектировании, увеличивая их эксплуатационный ресурс [9–13].

В настоящее время существуют несколько специализированных программ для расчета параметров, связанных с вероятностной оценкой количества столкновений КА с космическим мусором и оценкой вероятной поврежденности космических аппаратов в результате этих столкновений, например, программы ORDEM (Orbital Debris Engineering Models), MASTER, разработанные NASA и ESA [14], а также российская программа SDPA (Space Debris Prediction and Analysis) [15]. Однако эти программы не являются общедоступными. На основании программы SDPA Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии был разработан ГОСТ Р 25645.167–2022 [16], в котором приведена модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в околоземном космическом пространстве.

Цель настоящей работы — разработка методики вероятностной и количественной оценки столкновения разнообразных частиц космического мусора и параметров их ударного воздействия (размера частиц и скорости столкновения) на отечественные КА с помощью базы данных (БД), базирующейся на параметрах пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в ОКП [16, 17] и статистических данных запусков малых российских КА на различные орбиты за период 2011–2021 гг. [18].

Структура базы данных. В разработанную нами ранее БД [17] были внесены величины, характеризующие среднюю массу и плотность космических объектов, в соответствии с одиннадцатью диапазонами размеров [16]. Орбиты большинства спутников из исходной БД можно свести к нескольким типовым орбитам: НОО, Средняя высокоэллиптическая орбита (СВО) и Геостационарная орбита (ГСО).

При расчете количества столкновений с фрагментами космического мусора ключевую роль играет оценка плотности потока техногенного вещества относительно космического аппарата, движущегося по типовым орбитам. Расчетные значения определяются по таким параметрам орбиты, как высота, наклонение и период. Основная таблица базы данных (табл. 1) содержит перечень российских космических аппаратов, запущенных в период 2011–2021 гг.

В таблицу БД также включено поле C_n (в табл. 1 не показано), которое содержит коэффициент, учитывающий форму и ориентацию КА. В данном случае была выбрана условная форма «панель» с характерной площадью в виде наибольшей грани и принято $C_n = 0,821$ [4].

Пример исходных данных для космических аппаратов

Код	Название КА	Дата запуска	Срок службы, лет	Тип орбиты	Характерная площадь, м ²
1	Луч 5А	11.12.2011	10	ГСО	180,00
2	Луч 5Б	02.11.2012	10	ГСО	180,00
3	Луч 5В	28.04.2014	10	ГСО	180,00
4	Метеор-М 2	08.07.2014	5	ОССС	70,00
5	Метеор-М 2.2	05.07.2019	5	ССО 1	70,00
6	Арктика-М1	28.02.2021	7	ВЭО	18,70
7	Гарпун-1	20.09.2011	10	ГСО	32,00
8	Гарпун-12Л	10.12.2015	10	ГСО	32,00
9	Радуга 1-М2	28.01.2010	5	ГСО	30,25
10	Радуга 1-М3	11.11.2013	5	ГСО	30,25
11	Электро-Л1	20.01.2011	10	ГСО	30,25
12	Электро-Л2	11.12.2015	10	ГСО	30,25
13	Электро-Л3	24.12.2019	10	ГСО	30,25
14	Луч/Олимпус	27.09.2014	15	ГСО	3,00
15	АмГУ-1	05.07.2019	3	ССО 1	0,03
16	ВДНХ-80	05.07.2019	3	ССО 1	0,03
17	Сократ	05.07.2019	3	ССО 2	0,03
18	Ярило-1	28.09.2020	3	ОССС	0,10
19	Ярило-2	28.09.2020	3	ОССС	0,10

Помимо полей с фиксированными данными в БД были добавлены поля с промежуточными вычислениями для облегчения вычислений в расчетной форме, например, «Дата выхода из эксплуатации КА» (в табл. 1 она не показана) и «Характерная площадь (м²)».

Средняя скорость столкновений значительно больше зависит от орбиты, на которой расположен спутник, нежели от размера фрагментов, составляющих техногенное загрязнение. И на всей орбите скорость столкновения с космическим мусором считается примерно одинаковой [16]. Основываясь на вышеуказанном допущении, в отдельной новой таблице «Средняя скорость столкновений» была установлена взаимосвязь данных с основной таблицей через ключевое поле «Номер орбиты». При этом в «Расчетной таблице» поле «Орбита» ссылается на таблицу «Средняя скорость столкновений» через значение поля «Номера орбиты». Аналогичные отношения были установлены между основной таблицей и таблицей с данными по плотности потока техногенного вещества в зависимости от типа орбиты и категории размеров космического мусора.

Распределение плотности потока зависит от диапазонов размеров космического мусора (табл. 2), где 1 — поле данных по диапазону размеров от 0,01 мм до 0,1 мм, 2 — поле данных по диапазону размеров от 0,1 мм до 0,5 мм, и так далее, до поля 11 — диапазон размеров свыше 20 см.

Таблица 2

Плотность потока космических объектов

Орбита	Плотность потока космических объектов, $\text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
МКС	1,24 E+4	9,74 E+0	8,97 E-1	1,46 E-2	1,47 E-3	3,38 E-4	7,87 E-6	1,21 E-5	3,98 E-6	1,09 E-6	1,91 E-6
ССО 1	4,17 E+4	3,28 E+0	3,02 E-1	5,31 E-2	5,75 E-3	1,36 E-3	3,58 E-4	5,46 E-5	1,61 E-5	3,59 E-6	6,43 E-6
ССО 2	9,29 E+4	7,29 E+0	6,72 E-1	3,44 E-1	4,36 E-2	1,07 E-2	2,91 E-3	3,47 E-4	7,11 E-5	8,27 E-6	1,43 E-5
ОССС	1,88 E+3	1,47 E-1	1,36 E-2	2,85 E-1	3,58 E-2	8,18 E-3	1,96 E-3	2,12 E-4	3,53 E-5	2,79 E-6	2,89 E-6
ВЭО	1,04 E+3	8,21 E-1	7,56 E-2	7,03 E-3	8,44 E-4	1,91 E-4	4,63 E-5	5,22 E-6	9,81 E-7	1,11 E-7	1,61 E-7
ГЛОНАСС	5,53 E+3	5,69 E-2	3,39 E-3	6,99 E-4	7,51 E-6	1,58 E-6	2,91 E-7	3,95 E-8	1,62 E-8	1,42 E-8	1,32 E-8

Табличные значения получены из расчетов по формуле для определения плотности потока P_j , $\text{м}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$, за k -й год для космических объектов различных диапазонов размеров j относительно КА [16]:

$$P_j = S C_N Q_{\text{отн}}(h, i)_j F(t_k),$$

где C_N — коэффициент, учитывающий форму и ориентацию КА; S — характерная площадь сечения КА, перпендикулярно направленная трансверсальной скорости КА для формы типа «панель», м^2 ; $Q_{\text{отн}}(h, i)_j$ — соответствующая плотность потока, $\text{м}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$, в зависимости от высоты орбиты h и наклона орбиты i для диапазона размеров j , по таблице «Плотность потока КО»; $F(t_k)$ — значение функции для момента времени t_k .

По итогу проектирования БД имеем следующую структурную взаимосвязь величины плотности потока и средней скорости столкновений для типовых орбит с основной таблицей (рис. 1).

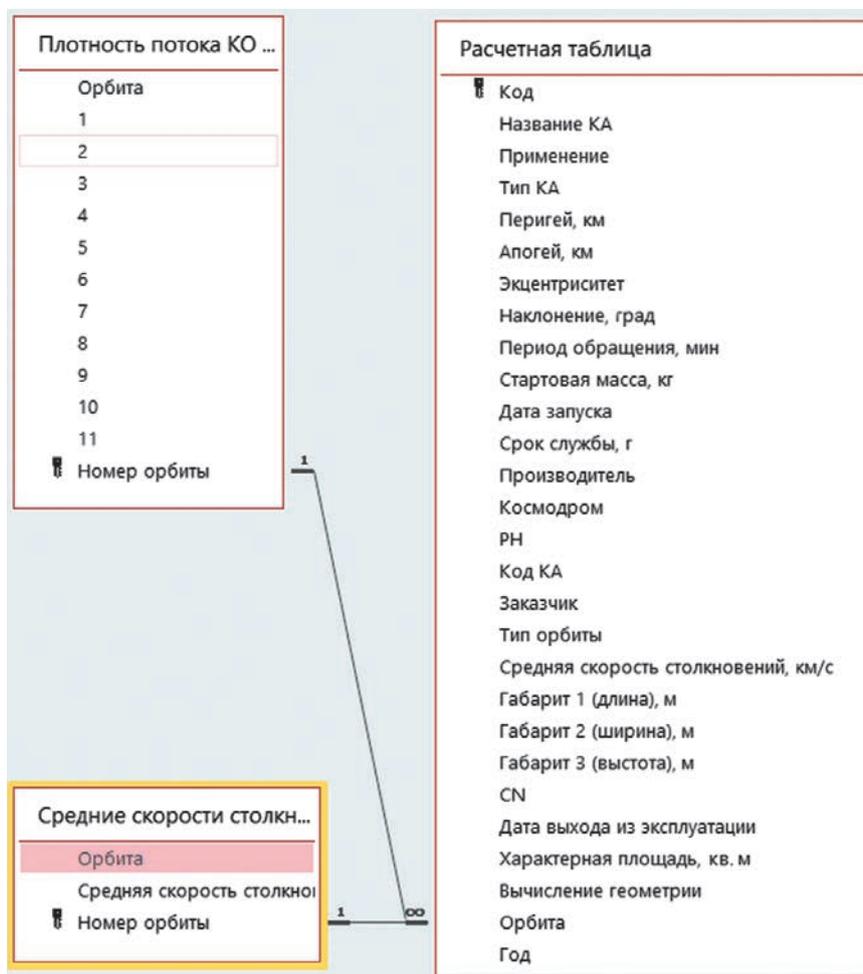


Рис. 1. Схема данных

Помимо размеров космического мусора в расчете существует прогнозная составляющая развития техногенного загрязнения околоземного пространства с течением времени — функция $F(t)$. Она учитывает три гипотезы об интенсивности образования техногенного вещества на интервале прогноза 2020–2050 гг. в зависимости от коэффициента технической политики K [16]:

$K = 0,5$ подразумевает «Положительный сценарий», т. е. предполагается, что после 2020 г. будут предприняты меры по ослаблению техногенного засорения, в результате которых в 2 раза снизится интенсивность образования техногенного вещества;

$K = 1,0$ характеризует «Нейтральный сценарий», означающий сохранение интенсивности образования космических объектов на уровне предшествующего десятилетия;

$K = 1,5$ показывает, что ситуация развивается по «Негативному сценарию» вследствие стремительного увеличения запусков КА из-за развития технологий миниатюризации.

В зависимости от сценария и диапазона размеров космического мусора в БД были созданы 33 таблицы с разными значениями функции $F(t)$ (рис. 2).

Год	НОО	СВО	ГСО
2021	2,18	2,01	2,03
2022	3,35	3,02	3,07
2023	4,53	4,03	4,10
2024	5,70	5,04	5,13
2025	6,88	6,06	6,17
2026	8,06	7,07	7,20
2027	9,23	8,08	8,23
2028	10,41	9,09	9,26
2029	11,58	10,10	10,30
2030	12,76	11,11	11,33
2031	13,94	12,12	12,36
2032	15,11	13,13	13,40
2033	16,29	14,14	14,43
2034	17,46	15,15	15,46
2035	18,64	16,17	16,50
2036	19,82	17,18	17,53
2037	20,99	18,19	18,56
2038	22,17	19,20	19,59
2039	23,34	20,21	20,63
2040	24,52	21,22	21,66
2041	25,70	22,23	22,69
2042	26,87	23,24	23,73
2043	28,05	24,25	24,76
2044	29,22	25,26	25,79
2045	30,40	26,28	26,83
2046	31,58	27,29	27,86
2047	32,75	28,30	28,89
2048	33,93	29,31	29,92
2049	35,10	30,32	30,96
2050	36,28	31,33	31,99

Рис. 2. Фрагмент списка таблиц и одной из таблиц значений функции $F(t)$ для разных сценариев

Такое количество таблиц обусловлено тем, что для реализации основных расчетов в данной работе требуется знать значения функции $F(t)$ для каждой категории размера КА в соответствии с коэффициентом технической политики. На основе расчетной таблицы были сформированы запросы для орбит каждого типа, позволяющие определить спутники, находящиеся в эксплуатации на текущий момент. Дальнейшие расчеты будут проводиться для функционирующих КА, так как наиболее целесообразно прогнозировать количество столкновений для действующих объектов (или КА).

При запуске базы данных открывается главная форма (рис. 3) с достаточно понятным интерфейсом. Для реализации вышеописанного функционала ранее в форму была добавлена кнопка «Расчет столкновений».



Рис. 3. Вид главной формы

Ее активация переносит пользователя на промежуточную форму, позволяющую ввести дату, относительно которой выбираются действующие спутники, и перейти к расчету для интересующей нас орбиты. После ее выбора в базе открывается расчетная форма (рис. 4), где представлены окончательные результаты.

В качестве примера приведены результаты расчетов базы данных для отечественных космических аппаратов «Метеор-М-2.2» на НОО на 2024 г. (табл. 3) и «Луч 5В» на ГСО на 2024 г. (табл. 4).

Таким образом, для каждого спутника существует возможность рассчитать максимальное количество столкновений в год для КА с космическим мусором различных размеров, в зависимости от сценария развития техногенного загрязнения.

Количество столкновений КМ со спутниками на НОО

Название КА: Характерная площадь, (м кв):
 Год выхода из эксплуатации: CN:
 Тип орбиты: Скорость столкновения:

Максимальное количество столкновений КМ с данным спутником в год

Сценарий развития	Положительный	Нейтральный	Негативный
КМ размером от 0,01 до 0,10 мм	13660044,30000000	15361558,59000000	17039107,89000000
КМ размером от 0,10 до 0,50 мм	1074,45912000	1206,41024000	1336,47634400
КМ размером от 0,50 до 1,00 мм	98,75529860	110,73089720	122,70649580
КМ размером от 0,10 до 0,25 см	17,33341176	19,43905509	21,51418185
КМ размером от 0,25 до 0,50 см	1,87697020	2,10167790	2,32638560
КМ размером от 0,50 до 1,00 см	0,44316266	0,49552933	0,54867758
КМ размером от 1,00 до 2,50 см	0,11665605	0,13023507	0,17488121
КМ размером от 2,50 до 5,00 см	0,01776030	0,01983129	0,02190228
КМ размером от 5,0 до 10,0 см	0,00522776	0,00583843	0,00643986
КМ размером от 10,0 до 20,0 см	0,00116569	0,00129774	0,00143184
КМ размером свыше 20 см	0,00208416	0,00232066	0,00255716

Рис. 4. Расчетная форма для низкой околоземной орбиты

Таблица 3

Количество столкновений за 2024 г. с космическим мусором различных размеров для КА «Метеор-М-2.2» на НОО

Размер космического мусора	Сценарий развития		
	Положительный	Нейтральный	Негативный
0,01–0,10 мм	13660044,30	15361558,59	17039107,89
0,10–0,50 мм	1206,410240	1206,410240	1336,476344
0,50–1,00 мм	98,75529860	110,7308972	122,7064958
0,10–0,25 см	17,33341176	19,43905509	21,51418185
0,25–0,50 см	1,876970200	2,101677900	2,326385600
0,50–1,00 см	0,443162664	0,495529328	0,548677584
1,00–2,50 см	0,116656054	0,130235065	0,174881210
2,50–5,00 см	0,017760299	0,019831288	0,021902277
5,00–10,0 см	0,005227759	0,005838435	0,006439859
10,0–20,0 см	0,001165693	0,001297736	0,001431842
Свыше 20 см	0,002084161	0,002320662	0,002557162

**Количество столкновений за 2024 г. с космическим мусором
различных размеров для КА «Луч 5В» на ГСО**

Размер космического мусора	Сценарий развития		
	Положительный	Нейтральный	Негативный
0,01–0,10 мм	3623772,492	3715602,984	3906327,852
0,10–0,50 мм	284,2917750	291,4960500	305,9046000
0,50–1,00 мм	26,15484330	26,81763660	28,14322320
0,10–0,25 см	0,081117920	0,083173540	0,087126655
0,25–0,50 см	0,006686543	0,007494663	0,007181842
0,50–1,00 см	0,000993126	0,001016357	0,001064755
1,00–2,50 см	0,000155867	0,000159824	0,000201531
2,50–5,00 см	0,000035940	0,000036850	0,000038540
5,00–10,0 см	0,000013850	0,000014170	0,000014850
10,0–20,0 см	0,000006740	0,000006900	0,000007220
Свыше 20 см	0,000055690	0,000056990	0,000059600

Анализ результатов. Результаты выполненных вычислений для 136 отечественных КА были проанализированы и были сделаны соответствующие выводы, описанные далее.

1. Количество столкновений с космическим мусором значительно зависит от его размеров, а именно чем меньше размер частиц космического мусора, тем больше плотность его потоков и, соответственно, большее количество столкновений с ним. Так, до 2025 г. включительно, для КА размером от 0,01 до 0,10 мм количество столкновений с КА характерной площадью около 100 м² достигает нескольких миллионов в год на ГСО и десятки миллионов в год на НОО, а к 2040 г. количество столкновений на НОО возрастет до сотни миллионов в год. В то время как на 2025 г. для космического мусора крупнее 1 см количество столкновений в год примерно равно нулю, к 2050 г. количество столкновений возрастет до десяти, а верхней границей с нулевым количеством столкновений станет космический мусор размером 5 см.

2. Количество столкновений напрямую зависит от характерной площади космического аппарата. Наиболее ярким примером таких КА являются МКС и будущая отечественная станция РОС (Российская орбитальная станция). Применительно к МКС с характерной площадью порядка 8000 м² на НОО: до 2025 г. включительно, для космического мусора размером от 0,01 до 0,10 мм количество столкновений могло бы достичь примерно 2 млрд в год, а к 2050 г. — 12 млрд в год. Для частиц размером около 1 см количество столкновений на 2025 г. составляло бы примерно 70, а к 2050 г. — 400.

3. Количество столкновений на ГСО и НОО значительно различается. Так, до 2025 г. включительно для космического мусора размером от 0,01 до 0,10 мм количество столкновений с КА характерной площадью около 100 м² среднее ожидаемое количество столкновений в год на НОО исчисляется десятками миллионов в то время, как на ГСО это значение не превышает трех миллионов. Для ГСО средним порогом, за которым количество столкновений с космическим мусором становится примерно равным нулю, является 1...10 мм, для НОО — 1...5 см.

4. Количество столкновений также значительно увеличивается с каждым годом в исследуемый период. Оно удваивается в среднем каждые 3–4 года в зависимости от рассматриваемой орбиты и сценария развития техногенной загрязненности.

5. Результаты для разных сценариев развития техногенной загрязненности различаются на 10...15 %. В гораздо большей степени на результаты влияют год рассмотрения и характерная площадь КА.

6. Космический мусор, представляющий реальную опасность для космических аппаратов, условно можно разделить на три группы: первая — космический мусор размером меньше 1 мм, вторая — размером от 0,1 до 5,0 см, третья — крупнее 5,0 см.

Первая группа наиболее опасна своим количеством и напрямую влияет на живучесть КА, приводя к износу поверхностей. В первую очередь это касается солнечных батарей (СБ) ввиду их большой площади по сравнению с корпусом КА. Подобная космическая «пыль» может значительно снизить их коэффициент полезного действия, что неизбежно приведет к снижению эксплуатационного ресурса всего КА.

Вторая группа космического мусора наиболее опасна своими размерами. Хотя количество столкновений с ним и не так велико (десятки или сотни в год), последствия столкновения могут быть самыми серьезными, вплоть до выхода из строя КА. Особенно эта проблема актуальна для орбитальных космических станций, таких как МКС, для которых вероятность столкновения наиболее велика.

Вероятность хотя бы одного столкновения с космическим мусором третьей группы крайне мала, но в случае столкновения с ним выход из строя или полное разрушение КА неизбежно.

7. Следует учитывать, что в силу ряда допущений, связанных с геометрией КА и его ориентацией в пространстве, со скоростями и направлениями потоков КМ, с точностью прогноза развития техногенной загрязненности, получаемые данные весьма приблизительны. В то же время они достаточны для первичной ознакомительной оценки, которая дает общее представление об изменении порядков значений в зависимости от различных параметров, связанных с КА и космическим мусором.

8. Полученные результаты необходимо уточнять и конкретизировать дальнейшими исследованиями, связанными с параметрами КА (его форма, геометрия, ориентация в пространстве и материалы конструкции), параметрами космического мусора (скорость столкновения, угол столкновения, материал, форма и ориентация в пространстве). Например, это нужно для оценки вероятности пробоя корпуса КА различным космическим мусором, оценки характера поврежденности КА и его последствий.

9. Заметим также, что в первую очередь расчет выполнен по определению количества столкновений. Это связано с тем, что под вероятностью столкновения имеется в виду хотя бы одно, а поскольку для частиц размером меньше 1 мм число столкновений в год варьируется от десятков до миллионов, целесообразно считать именно их количество. Для частиц размером больше 1 мм количество столкновений с космическим мусором в год по значению близко к нулю, в таком случае это значение примерно и равно вероятности столкновения [4].

Заключение. В условиях растущей загрязненности космического пространства для повышения живучести космических аппаратов и защиты от космического мусора необходимо проводить соответствующие исследования и эксперименты, воспроизводящие воздействие космического мусора на космические аппараты. Для имитации воздействия потоков космического мусора необходима оценка количества столкновений КА с космическим мусором различных размеров. Для решения этой задачи была разработана методика расчета количества столкновений отечественных космических аппаратов с частицами космического мусора различных размеров с помощью представленной в статье базы данных. Показано при этом, что она позволяет оценить, каких размеров частицы космического мусора представляют наибольшую опасность для космических аппаратов и каким образом она увеличится вплоть до 2050 г.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шустов Б.М. О фундаментальных исследованиях по проблеме космического мусора. *Всероссийская научная конференция с международным участием «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы»*. Москва, ИКИ РАН, 2019, с. 7–14.
- [2] Космический мусор. *EcologAnna*. URL: <https://ecologanna.ru/ekologicheskie-problemy/kosmicheskij-musor> (дата обращения 17.11.2022).
- [3] Вениаминов С.С., Червонов А.М. *Космический мусор — угроза человечеству*. Москва, ИКИ РАН, 2012, 192 с.
- [4] Назаренко А.И. *Моделирование космического мусора*. Москва, ИКИ РАН, 2013, 216 с.

- [5] Новиков Л.С. *Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты*. Москва, Университетская книга, 2009, 104 с.
- [6] Зеленый Л.М., Шустов Б.М., ред. *Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы: сборник трудов*. Москва, ИКИ РАН, 236 с. (Сер. «Механика, управление и информатика»).
- [7] Райкунов Г.Г., ред. *Космический мусор. В 2-х кн. Кн. 1. Методы наблюдений и модели космического мусора*. Москва, Физматлит, 2012, 312 с.
- [8] Китаева А.С. Построение модели деградации солнечной батареи в космических условиях. *Ядерная физика в интернете*, 2022. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/> (дата обращения 19.11.2022).
- [9] Christiansen E. Design and performances equations for advanced meteoroid and debris shield. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [10] Fedorov S.V., Kolpakov V.I., Vinogradova E.P., Bolotina I.A. Combined shaped-charge liners for explosion formation of aluminum particles with velocities up to 16 km/s. *Acta Astronautica*, 2022, vol. 190, pp. 231–240.
- [11] Fedorov S.V., Kolpakov V.I., Vinogradova E.P., Bolotina I.A. Numerical analysis of the explosive formation of aluminum particles at velocities of up to 16 km/s with the use of combined cumulative coatings. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2022, vol. 95, no. 6, pp. 1520–1530. DOI: 10.1007/s10891-022-02620-w
- [12] Фёдоров С.В., Колпаков В.И., Виноградова Е.П., Болотина И.А. О возможности использования кумулятивных зарядов с комбинированными облицовками для получения алюминиевых частиц со скоростями на уровне 16 км/с. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-9-2207>
- [13] Колпаков В.И., Васильева Т.В. *Моделирование ударного взаимодействия высокоскоростных частиц с элементами конструкции экранной защиты космического аппарата*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 46 с.
- [14] NASA Technology transfer program: Environmental Science Earth Air Space Exoplanet Orbital Debris Engineering Model (ORDEM). Version 3.2.0 (MSC-25457-1). *Johnson Space Center*, 2022. URL: <https://software.nasa.gov/software/MSC-25457-1> (дата обращения 19.11.2022).
- [15] Назаренко А.И. *Модели движения спутников и космический мусор*. 2017. URL: <http://www.satmotion.ru/cntnt/rus/o-sayte-rus/obavtore.html> (дата обращения 19.11.2022).
- [16] ГОСТ Р 25645.167–2022. *Космическая среда (естественная и искусственная). Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в околоземном космическом пространстве*. Москва, Российский институт стандартизации, 2022, 114 с.
- [17] Пасынков А.А., Свешникова А.С., Титов О.Г., Васильева Т.В. Проектирование базы данных запусков российских малых космических аппаратов для сбора информации о космическом мусоре. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 6 (71). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-6-799>
- [18] SatelliteDatabase. UCS URL: <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database> (дата обращения 01.11.2022).

Статья поступила в редакцию 16.01.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Колпаков В.И., Васильева Т.В., Пасынков А.А., Свешникова А.С., Титов О.Г. Анализ пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в околоземном космическом пространстве. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2250>

Колпаков Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 200 научных работ о высокоскоростном ударном взаимодействии и технологии ракетно-космического машиностроения. e-mail: kolpakovv@bmstu.ru

Васильева Татьяна Владимировна — старший преподаватель кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 20 работ в области технологии ракетно-космического машиностроения и обработки полимерных композиционных материалов. e-mail: vtv64@mail.ru

Пасынков Александр Алексеевич — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: alex13-4@mail.ru

Свешникова Анастасия Сергеевна — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: sveshnikova1999@mail.ru

Титов Олег Георгиевич — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: baikershot@gmail.com

Analysis of spatial-temporal distribution of the anthropogenic substances flux density in the Near-Earth Space

© V.I. Kolpakov, T.V. Vasilieva, A.A. Pasyukov,
A.S. Sveshnikova, O.G. Titov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The task of ensuring safe operation of the orbital stations in conditions of the Near-Earth Space increasing pollution with the so-called space debris became especially significant in the International Space Station development. In addition, space debris poses a certain danger to spacecraft currently in operation. To assess the degree of risk, this paper presents a relational database developed by the authors making it possible to determine the number of the space debris particles collision and the impact parameters (particle size and collision speed) on the spacecraft staying in different orbits. Calculations in this case made it possible to determine potential number, probability of collisions and parameters of the space debris impact interaction with a group of small domestic spacecraft.

Keywords: spacecraft, space debris, database, Near-Earth Space, software

REFERENCES

- [1] Shustov B.M. O fundamentalnykh issledovaniyakh po probleme kosmicheskogo musora [About fundamental research on space debris problem]. In: *Vse-rossiyskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "Kosmicheskii musor: fundamentalnye i prakticheskie aspekty ugrozy"* [All-Russian Scientific Conference with international participation "Space debris: fundamental and practical aspects of the threat"]. Moscow, SRI RAN, 2019, pp. 7–14.
- [2] Kosmicheskii musor [Space debris]. *EcologAnna. Space debris*. Available at: <https://ecologanna.ru/ekologicheskie-problemy/kosmicheskij-musor> (accessed November 17, 2022).
- [3] Veniaminov S.S., Chervonov A.M. *Kosmicheskii musor — ugroza chelovechestvu* [Space debris as a threat to humanity]. Moscow, SRI RAN Publ., 2012, 192 p.
- [4] Nazarenko A.I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora* [Space debris simulation]. Moscow, SRI RAN Publ., 2013, 216 p.
- [5] Novikov L.S. *Vozdeystvie tverdykh chastits estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya na kosmicheskie apparaty* [The impact of solid particles of natural and artificial origin on the spacecraft]. Moscow, Universitetskaya Kniga Publ., 2009, 104 p.
- [6] Zelenyi L.M., Shustov B.M., eds. *Kosmicheskii musor: fundamentalnye i prakticheskie aspekty ugrozy: sbornik trudov* [Space debris: fundamental and practical aspects of the threat: collection of works]. Moscow, SRI RAS Publ., 236 p. (Ser. "Mekhanika, upravlenie i informatika" — Series "Mechanics, management and informatics").
- [7] Raykunov G.G., ed. *Kosmicheskii musor. V 2-kh kn. Kn. 1. Metody nablyudeniya i modeli kosmicheskogo musora* [Space debris. In 2 books. Book 1. Space models observation methods and models]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 312 p.
- [8] Kitaeva A.S. *Postroenie modeli degradatsii solnechnoy batarei v kosmicheskikh usloviyakh* [Constructing a model of solar battery degradation in space condi-]

- tions]. *Yadernaya fizika v Inernete — Nuclear Physics in the Interne*, 2022. Available at: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/> (accessed November 19, 2022).
- [9] Christiansen E. Design and performances equations for advanced meteoroid and debris shield. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [10] Fedorov S.V., Kolpakov V.I., Vinogradova E.P., Bolotina I.A. Combined shaped-charge liners for explosion formation of aluminum particles with velocities up to 16 km/s. *Acta Astronautica*, 2022, vol. 190, pp. 231–240.
- [11] Fedorov S.V., Kolpakov V.I., Vinogradova E.P., Bolotina I.A. Numerical analysis of the explosive formation of aluminum particles at velocities of up to 16 km/s with the use of combined cumulative coatings. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2022, vol. 95, no. 6, pp. 1520–1530. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02620-w>
- [12] Fedorov S.V., Kolpakov V.I., Vinogradova E.P., Bolotina I.A. O vozmozhnosti ispolzovaniya kumulyativnykh zaryadov s kombinirovannymi oblitsovkami dlya polucheniya alyuminievykh chastits so skorostyami na urovne 16 km/s [On the possibility of using shaped charges with combined liners to obtain aluminum particles with speeds at the km/s level]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 9. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-9-2207>
- [13] Kolpakov V.I., Vasilieva T.V. *Modelirovanie udarnogo vzaimodeystviya vysokoskorostnykh chastits s elementami konstruksii ekrannoy zaschity kosmicheskogo apparata* [Simulating the impact interaction between high-speed particles and elements of the spacecraft screen protection structure]. Moscow, BMSTU Publ., 2017, 46 p.
- [14] NASA Technology transfer program: Environmental Science Earth Air Space Exoplanet Orbital Debris Engineering Model (ORDEM). Version 3.2.0 (MSC-25457-1). *Johnson Space Center*, 2022. Available at: <https://software.nasa.gov/software/MSC-25457-1> (accessed November 19, 2022).
- [15] Nazarenko A.I. *Modeli dvizheniya sputnikov i kosmicheskoy musor* [Models of satellite motion and space debris]. 2017. Available at: <http://www.satmotion.ru/cntnt/rus/o-sayte-rus/obavtore.html> (accessed November 19, 2022).
- [16] GOST R 25645.167–2022. *Kosmicheskaya sreda (Estestvennaya i iskusstvennaya). Model prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya plotnosti potokov tekhnogennogo veschestva v okolozemnom kosmicheskom prostranstve* [Space environment (natural and artificial). Model of spatial and time distribution for space debris flux density in near-Earth space]. Moscow, Rossiyskiy Institut Standartizatsii Publ., 2022, 114 p.
- [17] Pasyukov A.A., Sveshnikova A.S., Titov O.G., Vasilieva T.V. Proektirovanie bazy dannykh zapuskov rossiyskikh malykh kosmicheskikh apparatov dlya sbora informatsii o kosmicheskom musore [Designing a database of Russian small spacecraft launches to collect information on space debris]. *Politekhnicheskyy molodezhnyy zhurnal — Politechnical Student Journal*, 2022, no. 6 (71). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-6-799>
- [18] Satellite Database. UCS. Available at: <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database> (accessed November 1, 2022).

Kolpakov V.I., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 200 scientific papers on high-speed impact interaction and rocket and space engineering technology. e-mail: kolpakovv@bmstu.ru

Vasileva T.V., Senior Lecturer, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 20 works in technology of rocket and space engineering and processing of polymer composite materials. e-mail: vtv64@mail.ru

Pasynkov A.A., Student, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: alex13-4@mail.ru

Sveshnikova A.S., Student, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: sveshnikova1999@mail.ru

Titov O.G., Student, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: baikershot@gmail.com