

АНАЛИЗ ЗАСОРЕННОСТИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И ОБЪЕКТЫ ТЕХНОГЕННОГО ЗАСОРЕНИЯ*

В.А. Пивоваров

pivovalera2012@gmail.com

SPIN-код: 3853-1038

Т.Н. Соболева

tatyana_soboleva_96@mail.ru

SPIN-код: 7454-4745

Е.А. Цыганкова

zhenay95@yandex.ru

SPIN-код: 1807-6650

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Впервые о масштабном загрязнении Космоса стало известно в 1980-е годы, когда концентрация мусора на орбите Земли достигла такой плотности, что баллистикам требовалось проводить серьезные расчеты, чтобы безопасно разместить среди него тот или иной спутник. В последнее время ситуация только ухудшилась. Количество мусора настолько велико, что создает опасность для работающих автоматических станций. В данной статье рассмотрена «подводная часть космического айсберга» и малоизвестные факты о космической деятельности человека. Проанализировано количество мусора, находящегося на различных орбитах, перечислены основные негативные факторы, влияющие на поверхность планеты.

Ключевые слова

Космический мусор, спутник, космический аппарат, засорение, орбита, столкновение, тренд, околоземное пространство, обломки

Поступила в редакцию 06.12.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Под космическим мусором подразумеваются все искусственные объекты и их фрагменты в Космосе, которые уже неисправны, не функционируют и никогда более не смогут служить никаким полезным целям, но при этом являются опасными факторами, способными воздействовать на функционирующие космические аппараты, особенно пилотируемые. В некоторых случаях крупные или содержащие на борту опасные (ядерные, токсичные) материалы объекты космического мусора могут представлять прямую опасность и для Земли — при их неконтролируемом сходе с орбиты, неполном сгорании при прохождении плотных слоев атмосферы Земли и выпадении обломков на населенные пункты, промышленные объекты и транспортные коммуникации.

Засорение околоземного космического пространства. Проблема засорения околоземного космического пространства космическим мусором как чисто теоретическая возникла по существу сразу после запусков первых искусствен-

* Работа была представлена на конференции «Студенческая весна 2018».

ных спутников Земли (ИСЗ) в конце 1950-х годов. Официальный статус на международном уровне она получила после доклада Генерального секретаря ООН «Воздействие космической деятельности на окружающую среду», сделанного им 10 декабря 1993 г. В этом докладе особо отмечено, что проблема имеет международный, глобальный характер: нет засорения национального околоземного космического пространства, есть засорение космического пространства Земли, одинаково негативно влияющее на все страны, прямо или косвенно участвующие в его освоении.

В Космосе находится более 10 тысяч летательных аппаратов и спутников Земли, при этом функционируют из них только 6 %. Космические аппараты выходят из строя регулярно, в результате чего масса космического мусора каждый год увеличивается на 4 % [1].

Масса образовавшегося космического мусора на орбитах Земли настолько велика, что несет в себе действительную угрозу для существующих спутников, космического оборудования и вновь запущенных спутников.

Больше всего космического мусора оставила Россия. По состоянию на 31 октября 2017 г. на орбитах находится 17 000 объектов, при этом 1300 из них — действующие космические аппараты. На долю России приходится порядка 6300 объектов, относимых к космическому мусору.

Центру управления полетами (ЦУП) пришлось корректировать орбиту полета Международной космической станции (МКС) из-за опасности столкновения с обломком старого американского спутника. Об этом сообщил РИА новости представитель ЦУП.

В каталоге NASA указаны 16 300 объектов на орбите Земли, из них лишь 900 являются активными спутниками [2].

Согласно изученным данным и составленным трендам, из года в год число запусков космических аппаратов увеличивается. Соответственно, количество космического мусора растет в геометрической прогрессии. Поскольку срок службы космического аппарата на низкой околоземной орбите (НОО) составляет в среднем около 3 лет, а на геостационарной — 15 лет, НОО засорена в сотни раз сильнее.

Причинами возникновения космического мусора являются (рис. 1):

- 1) отброшенные первые ступени ракет;
- 2) отработавшие свой срок службы космические станции и т. п.

Воздействие отработавших свой срок космических аппаратов на окружающую среду можно охарактеризовать следующими факторами:

- 1) выброс в атмосферу продуктов сгорания;
- 2) воздействие солнечного ультрафиолетового излучения;
- 3) влияние на погоду и климат.

Хотелось бы упомянуть и наиболее значимые происшествия, которые привели к увеличению количества космического мусора.

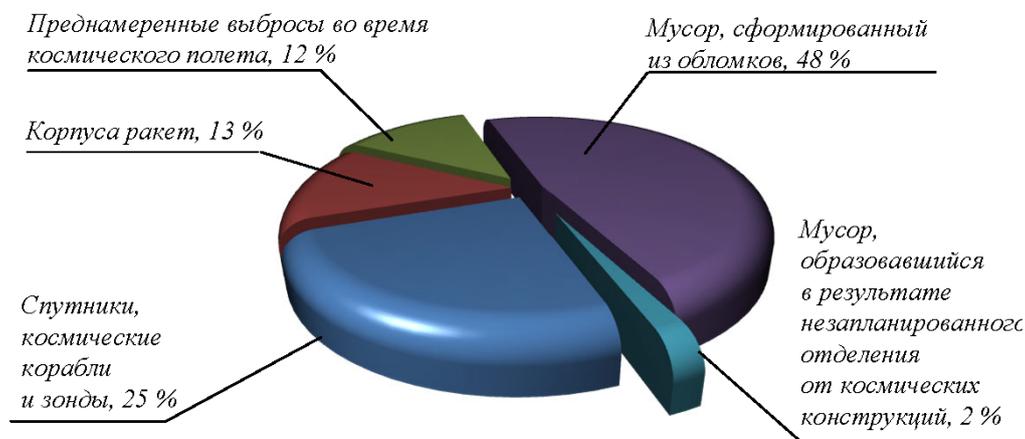


Рис. 1. Состав космического мусора

1. *Испытание Китаем противоспутниковой ракеты в январе 2007 г.* 11 января 2007 г. на высоте 865 км китайская ракета уничтожила отработавший свой срок службы китайский спутник «Фэнъюнь», столкнувшись с ним встречным курсом. В результате появилось более 2000 новых обломков размерами в несколько сантиметров и более, т. е. засоренность Космоса увеличилась сразу на 22 % [3, 4].

2. *Ликвидация США неисправного спутника.* 20 февраля 2008 г. на высоте 250 км ракета SM-3 уничтожила неисправный спутник-шпион, имеющий в баках около 400 кг ядовитого гидразина. Из-за небольшой высоты большинство осколков, скорее всего, относительно быстро войдет в атмосферу [5].

3. *Столкновение российского и американского спутников.* 10 февраля 2009 г. на высоте около 790 км над северной частью Сибири зафиксирован первый случай столкновения двух искусственных спутников в космосе. Спутник связи «Космос-2251», запущенный в 1993 г. и выведенный из эксплуатации, столкнулся с коммерческим спутником американской компании спутниковой связи «Иридиум». В результате столкновения образовалось около 600 обломков, большая часть которых останется на прежней орбите [6].

Создание базы данных для анализа образовавшегося космического мусора на орбитах Земли. В связи с большим объемом информации для удобства проведения анализа и расчетов была создана база данных запусков космических аппаратов в период с 2007 по 2017 г. в программе MS Access [4, 7]. Таблица исследуемых данных представлена на рис. 2.

Для анализа созданной базы использовали функции запросов на выборку, основными параметрами которых являлись (см. рис. 2):

- масса спутников;
- орбиты, на которых они находятся;
- срок службы.

Код запуска	Номер КА	Имя КА	Организация	Национальн.	Назначение КА	Стар	Орбита	Срок
110_15	41186	2015-081H	Orbcomm FM 115	Orbcomm	США Телекоммуникационный	172	Низкая орбита	5
110_15	41185	2015-081G	Orbcomm FM 113	Orbcomm	США Телекоммуникационный	172	Низкая орбита	5
110_15	41184	2015-081F	Orbcomm FM 112	Orbcomm	США Телекоммуникационный	172	Низкая орбита	5
110_15	41183	2015-081E	Orbcomm FM 118	Orbcomm	США Телекоммуникационный	172	Низкая орбита	5
110_15	41181	2015-081C	Orbcomm FM 105	Orbcomm	США Телекоммуникационный	172	Низкая орбита	5
110_15	41178	2015-081A	Orbcomm FM 114	Orbcomm	США Телекоммуникационный	172	Низкая орбита	5
110_15	41182	2015-081D	Orbcomm FM 110	Orbcomm	США Телекоммуникационный	172	Низкая орбита	5
111_15	41191	2015-082A	Экспресс АМУ1	ГТЛС	РФ Телекоммуникационный	3456	Геостационарная	15
112_15	41194	2015-083A	Гасфэн-4	ЦСНУД	Китай	Д33	Низкая орбита	8
1_12	28047	001B	VespaSat-2	Цукрасе	ИЯР Телекоммуникационный	29	Низкая орбита	12
1_12	38046	001A	Цзыюнь-3	НУТК	Китай	Д33 2650	Низкая орбита	5
3_12	38070	003A	WGS F4 (USA-233)	MO	США Телекоммуникационный	6000	Геостационарная	15
6_12	38075	005A	Навид	IrSA	Иран	Д33 50	Низкая орбита	1.5
7_12	38077	005A	Lares	ASI	Франция	Научный 1500	Солнечно-синхрон	5
8_12	38087	007A	SES-4	SES World Skie	РФ Телекоммуникационный	6180	Геостационарная	15

Рис. 2.Экранная копия части таблицы данных о запусках спутников в период с 2007 по 2017 г.

Чтобы вызвать «Конструктор запросов», необходимо перейти в окно базы данных. В окне «База данных» необходимо выбрать вкладку «Запросы» и дважды щелкнуть по пиктограмме «Создание запроса» в режиме конструктора. Появится активное окно «Добавление таблицы» на фоне неактивного окна «Запрос: запрос на выборку» (рис. 3). В окне «Добавление таблицы» следует выбрать таблицу-источник или несколько таблиц из представленного списка таблиц, на основе которых будет проводиться выбор данных, и щелкнуть по кнопке «Добавить». После этого закрыть окно «Добавление таблицы», окно «Запрос: запрос на выборку» станет активным.

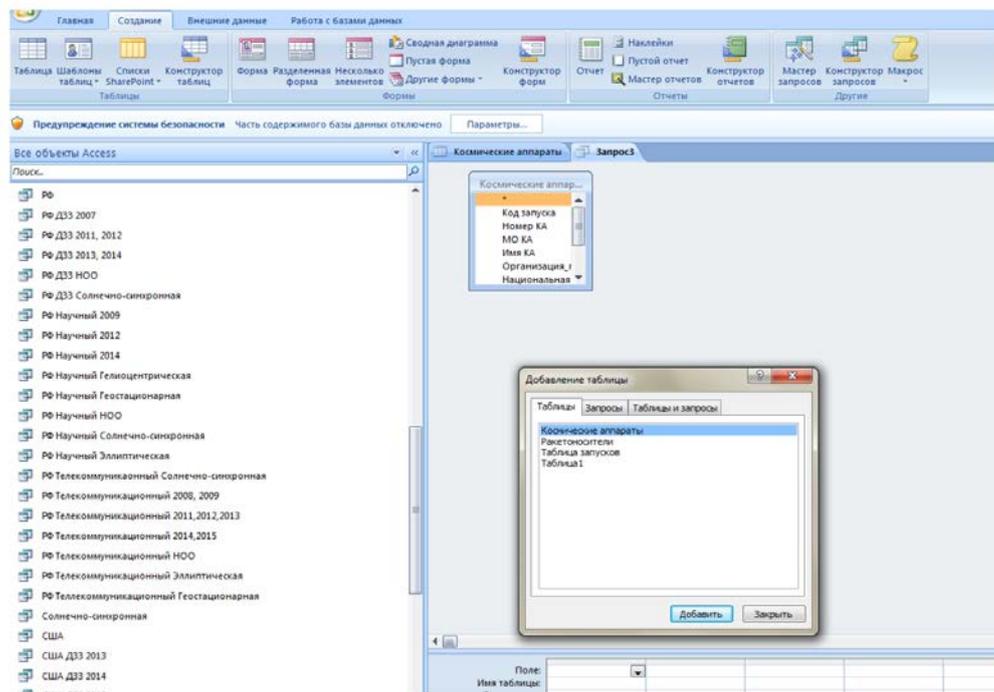


Рис.3. Экранная копия части окна «Создание запроса»

Окно «Конструктор» состоит из двух частей — верхней и нижней. В верхней части окна размещается схема данных запроса, которая содержит список таблиц-источников и отражает связь между ними. В нижней части окна находится бланк построения запроса, в котором каждая строка выполняет определенную функцию (поле — указывает имена полей, которые участвуют в запросе). В поле «Назначение» добавляем записи «ДЗЗ» (дистанционное зондирование земли), «Научный» и «Телекоммуникационный» (рис. 4).

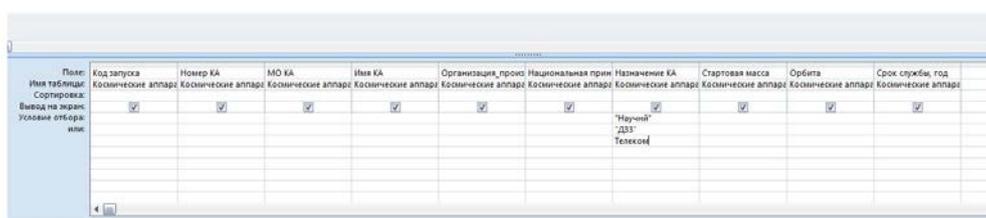


Рис. 4. Экранная копия части окна «Конструктор» с примером выбора данных по назначению спутников

После нажатия клавиши «Выполнить» получают выборку указанных параметров (рис. 5).

50_11	37853	061E	Rax-2	Ula	США	Научный	3	Солнечно-синхрон	3
50_11	37854	061F	Dice-1	Ula	США	Научный	3200	Геостационарная	5
50_11	37855	061G	Dice-2	Ula	США	Научный	3200	Геостационарная	5
56_11	37875	066B	Яогань взйсин-12	MO	Китай	ДЗЗ		Низкая околоземн	5
17_11	37675	025A	Rasad	IrSA	Иран	ДЗЗ	15	Низкая околоземн	0.17
60_11	37933	069A	Asiasat 7	Asiasat	РФ	Телекоммуникационный	3760	Геостационарная	15
2_15	40374	2015-002A	MUOS F3	MO	США	Телекоммуникационный	6800	Геостационарная	15
3_15	40376	2015-003A	SMAP	NASA	США	Научный	3813	Солнечно-синхрон	3
6_15	40381	2015-004A	Inmarsat 5 F2	Imnsat	еликобритания	Телекоммуникационный	2	Геостационарная	15
7_15	40384	2015-005A	Фаджр	ISIG	Иран	ДЗЗ	2	Низкая околоземн	1.5
11_15	нет	нет	DSCOVER	NASA	США	Телекоммуникационный	570	Солнечно-синхрон	5
13_15	40392	2014-008A	Flock 1B-27	Planet Labs	США	ДЗЗ	6070	Низкая околоземн	3

Рис. 5. Экранная копия части окна запроса на выборку по параметрам «ДЗЗ», «Научный» и «Телекоммуникационный»

По результатам анализа выбранных данных построена диаграмма (рис. 6). Видно, что самыми востребованными орбитами для исследуемых типов спутников являются низкая околоземная и геостационарная орбиты. Низкая околоземная орбита (НОО) — космическая орбита вокруг Земли, имеющая высоту над поверхностью планеты в диапазоне 160...2000 км. Геостационарная орбита (ГСО) — круговая орбита, расположенная над экватором Земли (0° широты), находясь на которой, искусственный спутник обращается вокруг планеты с угловой скоростью, равной угловой скорости вращения Земли вокруг оси.

Объекты, находящиеся на высотах менее 160 км, испытывают очень сильное влияние атмосферы и нестабильны.

Самый активный срок существования космических аппаратов — 15 лет для спутников, находящихся на ГСО, и 3 года, для спутников, находящихся на НОО [8].

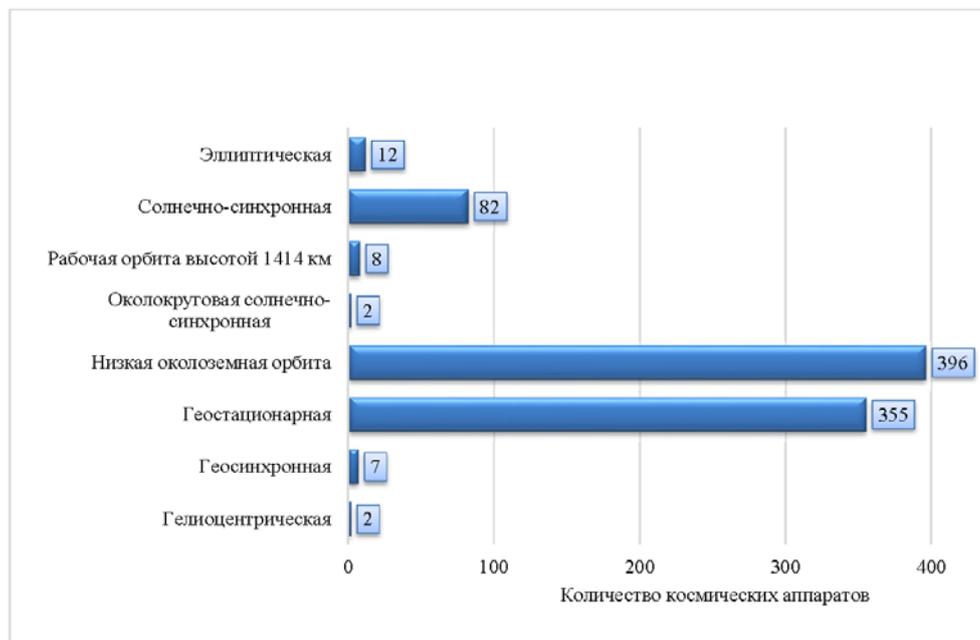


Рис. 6. Диаграмма распределения выведенных в период 2007–2017 гг. космических аппаратов по орбитам

На рис.6 видно, что количество запущенных спутников из года в год растет (в период 2007–2017 гг. оно составило примерно 1750 спутников) и, соответственно, увеличивается количество оставшихся неработающих аппаратов.

В работе проведен анализ данных методом экстраполяции трендов. Экстраполяция — это прогнозирование неизвестных значений путем продолжения функций за границы области известных значений. В основе экстраполяции лежит анализ временных рядов, представляющих собой упорядоченные во времени наборы измерений основных характеристик исследуемого объекта. К методам прогностической экстраполяции относятся экстраполяция тренда, экстраполяция огибающих кривых, корреляционные зависимости и др.

Методы экстраполяции трендов основаны на статистическом наблюдении динамики определенного показателя, определении тенденции его развития и продолжении этой тенденции для будущего периода. Другими словами, с помощью методов экстраполяции трендов закономерности прошлого развития объекта переносят в будущее.

Обычно эти методы применяют в краткосрочном прогнозировании, когда число изменений в среде минимально. Прогноз создают для каждого конкретного объекта отдельно и последовательно на каждый следующий момент времени. Трендом называют аналитическое или графическое представление изменения переменной во времени, полученное в результате выделения регулярной (систематической) составляющей динамического ряда. Прогноз по тренду учитывает факторы, влияющие на развитие явления только в неявном виде [9].

Для данных из собранной базы определили следующие трендовые линии по каждому из видов исследуемых спутников.

1. Линейный тренд $Y = a + bt$ выбирают, если цепные абсолютные приросты относительно стабильны, не имеют отчетливой тенденции к росту или снижению, т. е. уровень явлений изменяется с постоянной скоростью ($\Delta i = \text{const}$).

2. Логарифмический тренд $Y = a + b \log t$ выбирают при замедляющемся росте уровней, не достигающих предельно возможных значений; он хорошо описывает величину, которая вначале быстро растет или убывает, а затем постоянно стабилизируется.

3. Экспоненциальный тренд $Y = a \cdot e^{bt}$ выбирают, если относительно стабильными являются цепные темпы прироста. Для этого тренда $T_i \sim \text{const}$, т. е. уровень явлений растет с более или менее постоянной относительной скоростью.

4. Степенной тренд $y = at^b$ отражает изменение уровней с разной мерой пропорциональности изменений во времени. Если в данных имеются нулевые или отрицательные значения, использование степенного приближения невозможно.

5. R^2 — коэффициент детерминации. Это доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью зависимости, т. е. объясняющими переменными.

Рассчитанная общая масса выведенных исследуемых космических аппаратов в период с 2007 по 2017 г. составила 6441 т. Результаты выбора данных по критерию массы представлены на рис. 7.

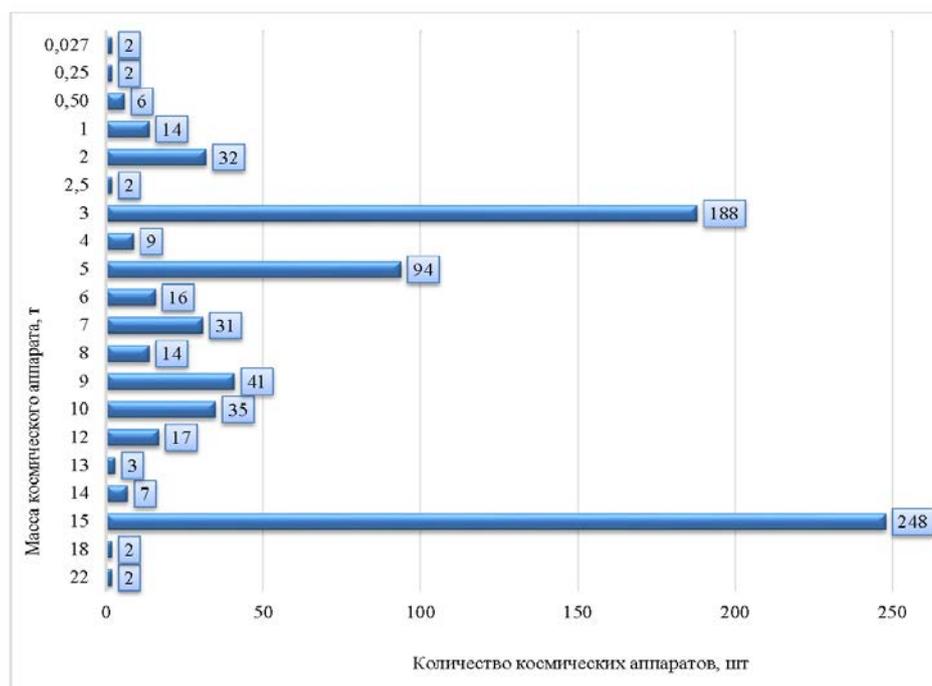


Рис. 7. Диаграмма распределения выведенных космических аппаратов по массе

Алгоритм построения модели. При построении модели воспользуемся следующим алгоритмом.

1. Сбор фактических данных исследуемого показателя (база прогноза).
2. Аналитическое выравнивание динамического ряда (выбор формы линии тренда и расчет параметров выбранной формы линии тренда).
3. Оценка модели.

Трендовая модель запусков дает наглядное представление о динамике запусков спутников во всех исследуемых значениях. Для выбора тренда, который лучше всего описывает рассматриваемый временной ряд, воспользовались коэффициентом детерминации:

- 1) линейный тренд: $y = 0,9286x + 2,4286, R^2 = 0,0519$;
- 2) логарифмический тренд: $y = 3,544 \ln x + 1,8266, R^2 = 0,076$;
- 3) Экспоненциальный тренд: $y = 2,3399e^{0,1164x}, R^2 = 0,0759$;
- 4) Степенной тренд: $y = 2,2041x^{0,4313}, R^2 = 0,1048$.

Лучше всего рассматриваемый временной ряд описывает степенной тренд с надежностью 0,1048 (рис. 8).

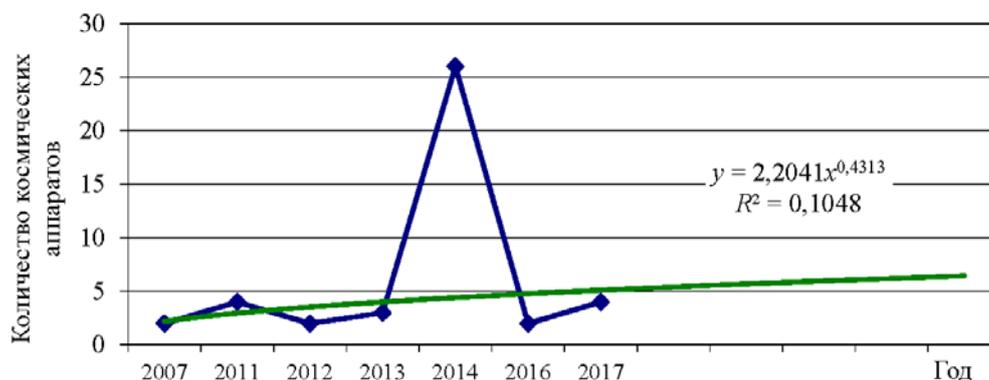


Рис. 8. Степенной тренд космического аппарата ДЗ3

Для прогнозирования спутников ДЗ3 США проведем аналогичные вычисления:

- 1) линейный тренд: $y = -0,5714x + 30,667, R^2 = 0,0029$;
- 2) логарифмический тренд: $y = -3,9729 \ln x + 33,023, R^2 = 0,0175$;
- 3) экспоненциальный тренд: $y = 15,11e^{0,0814x}, R^2 = 0,0195$;
- 4) степенной тренд: $y = 18,643x^{0,0683}, R^2 = 0,0017$.

Из всех перечисленных трендов для лучшего прогнозирования выбираем экспоненциальный тренд (рис. 9).

Аналогичным образом были рассчитаны и выбраны линии тренда по космическим аппаратам других назначений (рис. 10, 11).

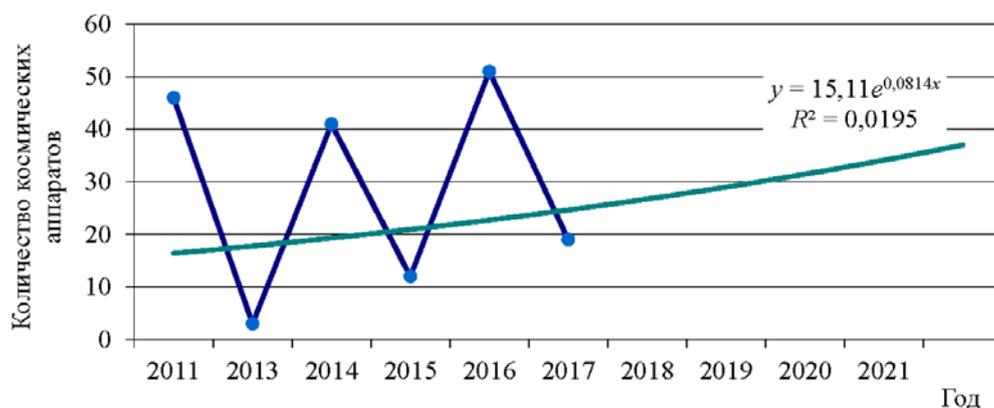


Рис. 9. Экспоненциальный тренд космического аппарата Д33 США

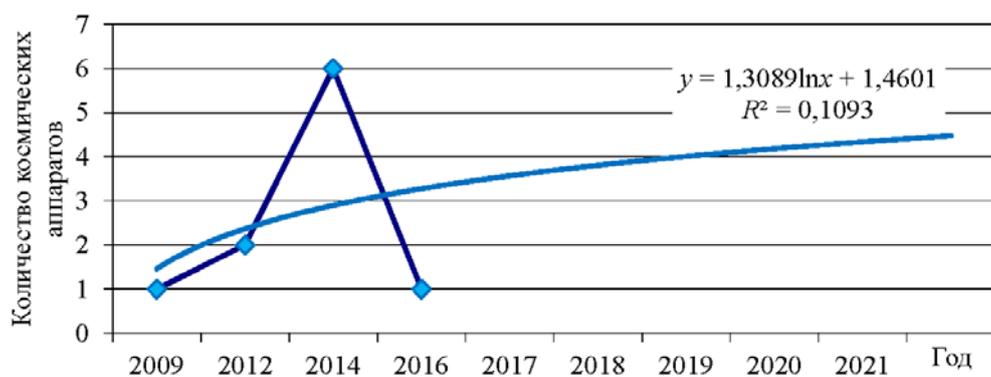


Рис. 10. Логарифмический тренд научных космических аппаратов

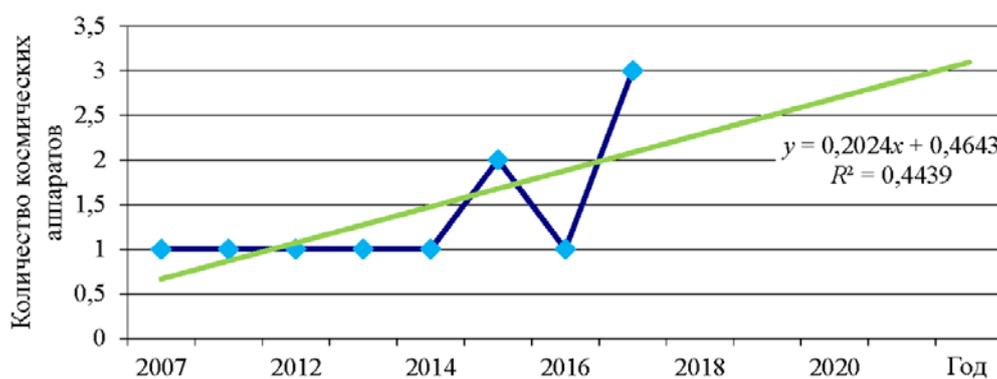


Рис. 11. Линейный тренд для телекоммуникационных космических аппаратов

Общее количество космических аппаратов, выведенных в космическое пространство в период с 2007 по 2017 г., составило 698 единиц (см. таблицу).

**Количество спутников (ДЗЗ, научных, телекоммуникационных),
запущенных в период с 2007 по 2017 г.**

Год	ДЗЗ	Научный	Телекоммуникационный
2007	4	7	18
2008	6	2	28
2009	2	10	31
2010	3	8	16
2011	5	3	20
2012	19	9	42
2013	20	0	50
2014	85	9	49
2015	76	1	44
2016	38	19	3
2017	24	0	47

Видно, что количество спутников ДЗЗ, запущенных в период с 2007 по 2017 г., составило 282 шт., научных — 68 шт., телекоммуникационных — 348 шт. (рис. 12).

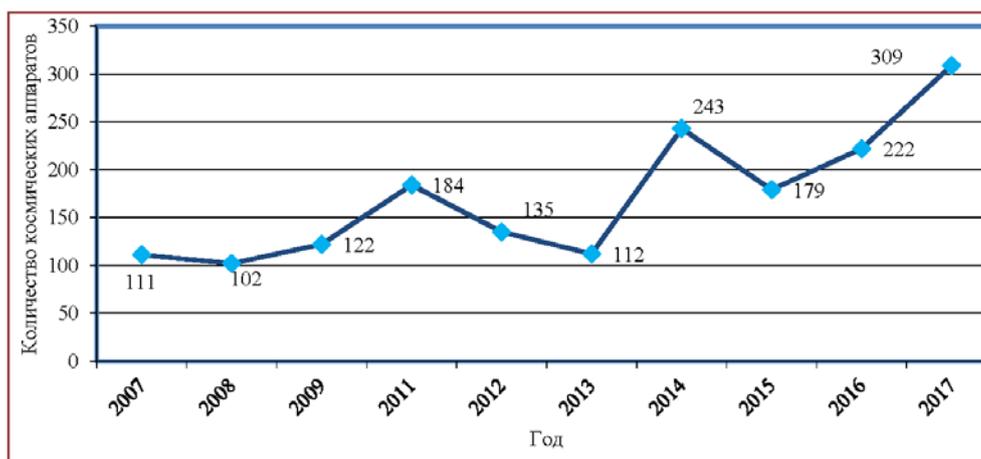


Рис. 12. Количество космических аппаратов, выведенных на орбиту с 2007 по 2017 г.

Выводы. В результате проведенного анализа засорения космического пространства можно сделать следующие выводы.

1. Для защиты пилотируемых космических аппаратов, спутников, космических станций, а также планеты и ее жителей необходимо задуматься о методах борьбы с космическим мусором.

2. В настоящий момент в мире не существует ни юридического, ни технического решения проблемы, связанной с космическим мусором.

3. При каждом столкновении угроза нового возрастает в сотни раз, поскольку каждый уничтоженный спутник, в свою очередь, разлетается на сотни кусочков космического мусора, несущихся с огромной скоростью.

4. Возникновение опасных ситуаций обусловлено возвращением с орбит на Землю неуправляемых частей ракет-носителей и отработавших свой ресурс спутников, выполняющих свои целевые задачи.

Литература

- [1] Аким Э.Л. Космический мусор: обломки недавнего прошлого. *Популярная механика*, 2006, № 7, с. 40–44.
- [2] Райцис Д.Д., Арбидан К.М. Анализ прогнозирования запусков некоторых видов космических аппаратов. *Молодежный научно-технический вестник*, 2017, № 7. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/860663.html>.
- [3] Журнал «Новости космонавтики» [Электронный ресурс] URL: <http://novosti-kosmonavтики.ru/> (дата обращения 07.09.2018).
- [4] Эльясберг П.Е. *Введение в теорию полета искусственных спутников Земли*. Москва, ЛИБРОКОМ, 2010, 544 с.
- [5] Назаренко А.И. *Моделирование космического мусора*. Москва, ИКИ РАН, 2013, 216 с.
- [6] Liou J.C. An assessment of the current LEO debris environment and the need for active debris removal. *ISTC Space Debris Mitigation Workshop*, 2010, 24 p.
- [7] Бакланов А.Г. *Рынок и маркетинг авиакосмической продукции в условиях нестабильности*. Москва, КДУ, 2007, 400 с.
- [8] UCS satellite database. URL: <http://www.ucsusa.org/nuclear-weapons/space-weapons/satellite-database#.WdNL5rjkUdU> (дата обращения 10.09.2018).
- [9] Константиновская Л.В. Методы и приемы прогнозирования. URL: <http://www.astronom2000.info/прогнозирование/mipp/> (дата обращения 07.09.2018).

Пивоваров Валерий Алексеевич — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Соболева Татьяна Николаевна — студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Цыганкова Евгения Андреевна — студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Васильева Татьяна Владимировна, ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

ANALYSIS OF DEBRIS OF THE NEAR-EARTH SPACE AND OBJECTS OF MAN-MADE POLLUTION*

V.A. Pivovarov

pivovalera2012@gmail.com

SPIN-code: 3853-1038

T.N. Soboleva

tatyana_soboleva_96@mail.ru

SPIN-code: 7454-4745

E.A. Tsigankova

zhenay95@yandex.ru

SPIN-code: 1807-6650

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

For the first time, large-scale cosmos pollution became known in the 1980s, when the concentration of debris in the Earth's orbit reached such a density that ballistics needed to make serious calculations in order to safely place one or another satellite among it. Recently, the situation has only worsened. The amount of debris is so large that it creates a danger for operating automatic stations. This article discusses the "underwater part of the space iceberg" and little-known facts about human space activity. It was analyzed the amount of debris in different orbits, was listed the main negative factors affecting the surface of the planet.

Keywords

Space debris, satellite, spacecraft, clogging, orbit, collision, trend, near-earth space, debris

Received 06.12.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Akim E.L. Space debris: ruins of the recent past. *Populyarnaya mekhanika*, 2006, no. 7, pp. 40–44.
- [2] Raytsis D.D., Arbidan K.M. Forecasting analysis of launching some types of spacecraft. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik*, 2017, no. 7. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/860663.html>.
- [3] Zhurnal "Novosti kosmonavtiki" Elektronnyy resurs] Available at: <http://novosti-kosmonavtiki.ru/> (data obrashcheniya 07.09.2018).
- [4] El'yasberg P.E. Vvedenie v teoriyu poleta iskusstvennykh sputnikov Zemli [Introduction to the flight theory of manmade Earth satellites]. Moscow, LIBROKOM publ., 2010, 544 p.
- [5] Nazarenko A.I. Modelirovanie kosmicheskogo musora [Modelling of space debris]. Moscow, IKI RAS publ., 2013, 216 p.
- [6] Liou J.C. An assessment of the current LEO debris environment and the need for active debris removal. *ISTC Space Debris Mitigation Workshop*, 2010, 24 p.
- [7] Baklanov A.G. Rynok i marketing aviakosmicheskoy produktsii v usloviyakh nestabil'nosti [Aerospace products market and marketing in conditions of non-stability]. Moscow, KDU publ., 2007, 400 p.
- [8] UCS satellite database. Available at: <http://www.ucsusa.org/nuclear-weapons/space-weapons/satellite-database#.WdNL5rjkUdU> (accessed 10 September 2018).

* The work has been presented at the Conference "Student Spring 2018".

- [9] Konstantinovskaya L.V. Metody i priemy prognozirovaniya [Forecasting methods and techniques]. Available at: <http://www.astronom2000.info/prognozirovanie/mipp/> (accessed 07 September 2018).

Pivovarov V.A. — student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Soboleva T.N. — student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Tsigankova E.A. — student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — T.V. Vasileva, Assist. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.