

АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАПУСКОВ СПУТНИКОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НА НИЗКУЮ ОКОЛОЗЕМНУЮ ОРБИТУ

А.А. Пасынков

alex13-4@mail.ru

SPIN-код: 6764-6127

А.С. Свешникова

sveshnikovaas@student.bmstu.ru

SPIN-код: 2625-1852

О.Г. Титов

titovog@student.bmstu.ru

SPIN-код: 7575-7369

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

Аннотация

Выполнено исследование общемировых запусков на низкую околоземную орбиту за период 2016–2020 гг. космических аппаратов различных типов: спутников дистанционного зондирования Земли, спутников связи и экспериментально-технологических спутников. Исходные данные взяты из открытых источников и собраны в три отдельные таблицы в программе Microsoft Excel. В рамках работы с ними проведены расчеты и построены графики. В процессе исследования выполнено прогнозирование в программе MS Excel запусков спутников каждого типа двумя аналитическими методами: экстраполяции трендов и наименьших квадратов. Результаты прогнозирования показали, что спутники связи имеют тенденцию к большему росту количества запусков, а значит, более перспективны с точки зрения технологической новизны.

Ключевые слова

Прогнозирование, запуски, космические аппараты, спутник, трендовая модель, временной (динамический) ряд, регрессионный анализ

Поступила в редакцию 19.01.2022

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Введение. За последнее десятилетие все более востребованным становится направление разработки, эксплуатации и запусков космических аппаратов [1]. Усовершенствования технологии производства и эксплуатации ракетно-космической техники позволили расширить функционал спутников и удешевить запуски ракет. Таким образом, космические технологии стали доступны для многих стран мира, что привело к увеличению спроса на запуски космических аппаратов.

Повышенный интерес к беспилотным космическим аппаратам стал своего рода катализатором для развития космической экономики. В пору такой ожесточенной конкуренции за востребованность на рынке космических услуг у компаний данной отрасли растет потребность в создании прибыльных бизнес-моделей.

Для обоснования рентабельности принятых решений в рамках разработанных моделей все чаще используются методы прогнозирования. Благодаря им компаниям удастся увеличивать свою конкурентоспособность и сохранять лидирующие позиции в секторе запуска спутников.

Возрастание роли прогнозирования в современных реалиях обусловлено усложнением управленческих задач, отсутствием стабильности и большой степенью неопределенности. При решении организационных вопросов прогнозирование служит первоосновой, поскольку позволяет предсказать результаты и последствия внедрения принятых стратегий. Прогноз дает возможность выявить неопределенности в системе и определить факторы, способствующие или препятствующие достижению поставленных задач. В условиях ограниченной точности параметров развития прогноз позволяет описать альтернативы, положительные и негативные тенденции, возможные противоречия и определяет условия, способствующие достижению намеченных целей.

Характеристика базы данных и обоснование выбора объектов для обработки. В качестве основного источника информации выбрана общемировая база данных запусков спутников [2]. На начальном этапе анализа данных рассмотрена наиболее востребованная и загруженная орбита — низкая околоземная. Посредством построения диаграммы, основанной на составленной базе данных, выявлено, что таковой является низкая околоземная орбита. Согласно рис. 1 на ней находится 3328 беспилотных космических аппаратов.



Рис. 1. Распределение по орбитам спутников за период 2016–2020 гг.

Такая загруженность низкой околоземной орбиты обусловлена рядом ее отличительных характеристик [3]. Значительным преимуществом является потребность в меньших энергозатратах для доставки спутника на низкую орбиту по сравнению с более высокими.

Наиболее активно данную орбиту используют спутники Соединенных Штатов Америки (рис. 2). Это связано со стремлением конкурирующих компаний SpaceX и OneWeb создать новые космические широкополосные сети [4]. Также на рис. 2 видно, что Россия является одной из пяти стран, занимающих лидирующие позиции в освоении низкой околоземной орбиты.

На данной орбите, согласно рис. 3, широко представлены следующие виды спутников: связи, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и экспериментально-технологические. Именно они выбраны в качестве объектов исследования. Для удобства обработки данных в программе MS Excel созданы три незави-

симых таблицы запусков на эту орбиту за период 2016–2020 гг. Для дальнейшего математического прогнозирования на 5 лет вперед необходимо использовать полные данные как минимум по пяти предыдущим годам. В выбранной нами международной базе [2] данные обновляются раз в полгода. Последний год, содержащий полные данные, — 2020 г. Это самые свежие данные из имеющихся в открытом доступе.



Рис. 2. Мировые запуски спутников за период 2016–2020 гг.

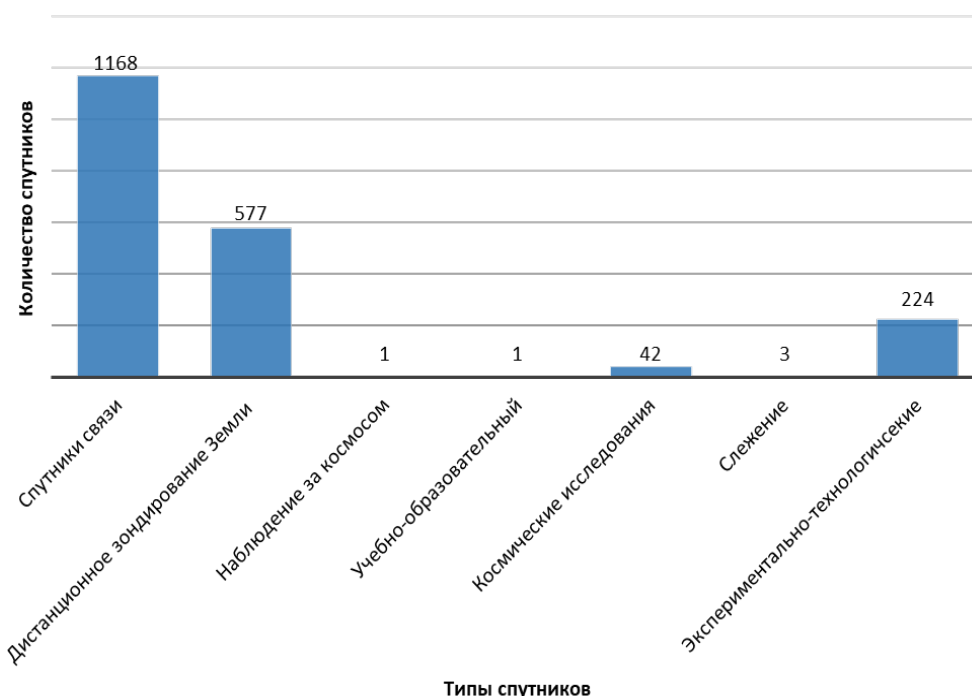


Рис. 3. Распределение по орбитам мировых запусков спутников за 2016–2020 гг.

Спутники связи — это искусственные спутники, ретранслирующие и усиливающие радиотелекоммуникационные сигналы через транспондер. Они служат каналом связи между источником (передатчиком) и приемником в разных местах Земли.

Спутники дистанционного зондирования Земли оснащены съемочной аппаратурой различного вида и осуществляют наблюдение за земной поверхностью. В зависимости от съемочной системы, установленной на космическом спутнике ДЗЗ, выделяют два типа получения геопространственных данных: опτικο-электронная и радарная съемка.

Экспериментально-технологические космические аппараты представляют собой искусственные спутники Земли, которые создаются для отработки технологий в условиях микрогравитации и открытого пространства космоса.

На рис. 4 представлены запуски спутников, выбранных для исследования.



Рис. 4. Количество рассматриваемых спутников за период 2016–2020 гг.

По диаграмме на рис. 4 можно сделать вывод, что наиболее перспективными являются спутники связи. Поэтому наиболее рентабельной и оправданной могла быть инициатива о внедрении усовершенствований в конструкцию космических аппаратов данного типа.

Обзор и выбор методов прогнозирования. Прогнозирование — это разработка прогноза, т. е. специальное научное исследование перспектив (прошлых тенденций) развития каких-либо явлений. Методология прогнозирования связана с планированием и моделированием. Типология прогнозов может строиться по различным критериям в зависимости от целей, задач, объектов, предметов, проблем, характера, периода упреждения, методов, организации прогнозирования и т. д.

По периоду исследования прогноза подразделяют на краткосрочные — 1 год; среднесрочные — 2–5 лет; долгосрочные — 5–10 лет; сверхдолгосрочные — более 10 лет [5].

При прогнозировании используют две группы методов: качественные (экспертные оценки) и количественные (аналитические). Наглядная и наиболее полная классификация методов прогнозирования показана на рис. 5.

Было решено выбирать методы прогнозирования из группы аналитических — в силу их объективности. Также к этому располагала исходная информация, представленная в виде данных о состоявшихся запусках космических аппаратов, а именно в виде последовательности запусков спутников за конкретные периоды (временных рядов). На основании такой фактической информации можно построить математические модели.

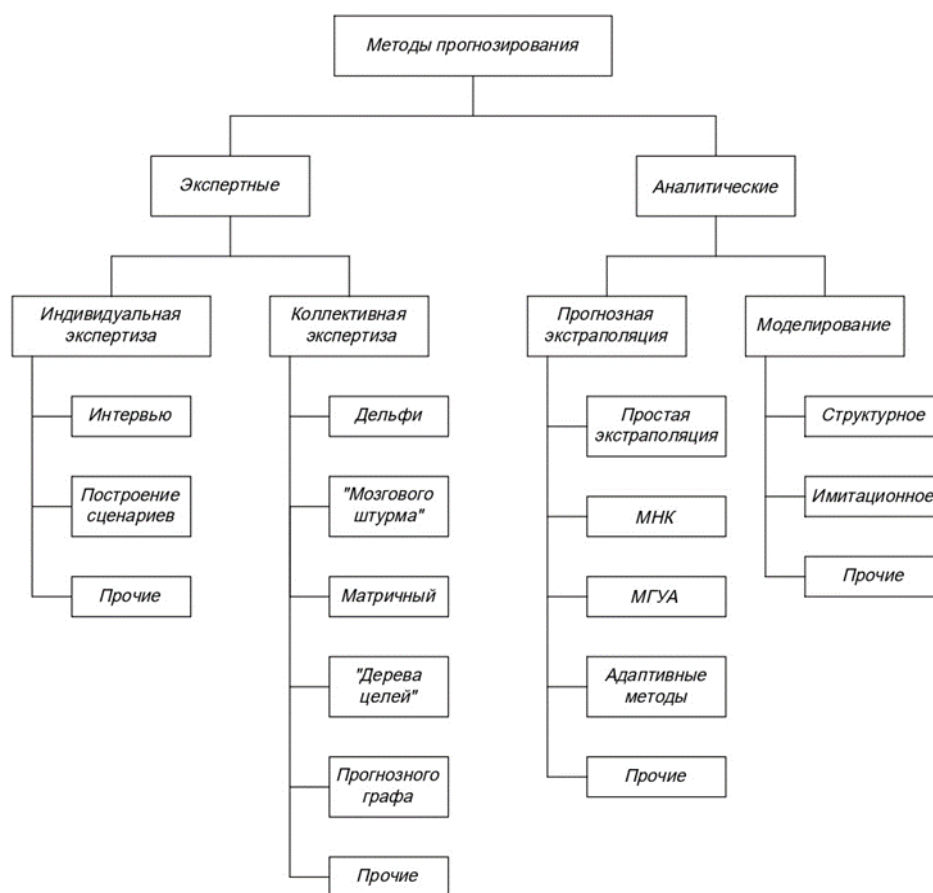


Рис. 5. Классификация методов прогнозирования

Для сравнения и анализа результатов выбрали два наиболее популярных метода прогнозной экстраполяции временных рядов:

1) метод экстраполяции трендов наиболее прост и показателен, что свидетельствует в его пользу при выборе для предварительного и наглядного прогноза. Главным критерием выбора является коэффициент детерминации R^2 — достоверный показатель связи конкретных переменных при любой форме зависимости;

2) метод наименьших квадратов структурно более сложен, но и подразумевает больше неизвестных. Это метод учитывает долговременную и циклическую составляющие. Он основывается на поиске наименьшей суммы квадратов остатков регрессии. Прогнозирование этим методом позволяет увидеть более детальную картину.

Прогнозирование с использованием метода экстраполяции трендов. Сущностью прогнозирования этого метода является поиск корреляционной зависимости между двумя вариационными величинами, т. е. функциональной зависимости между значением одного параметра и математическим ожиданием другого [6].

Различные функции тренда с разной степенью точности аппроксимируют область известных значений, т. е. описывают общность и закономерность значений временного ряда:

$$y = a + bx \text{ — линейная функция тренда;}$$

$$y = ae^{bx} \text{ — экспоненциальная функция тренда;}$$

$$y = a + b \ln x \text{ — логарифмическая функция тренда;}$$

$$y = a + bx + cx^2 \text{ — полиномиальная функция тренда;}$$

$y = ax^b$ — степенная функция тренда; где a, b, c — коэффициенты уравнений трендов.

Точность аппроксимации тренда определяется с помощью коэффициента детерминации R^2 . Чем ближе R^2 к единице, тем точнее функция тренда описывает зависимость значений временного ряда (или, другими словами, тесноту их связи). Прогнозирование происходит в результате экстраполяции линии тренда, т. е. благодаря ее продолжению за верхнюю границу области известных значений.

Построены трендовые модели количества запусков на низкую околоземную орбиту спутников трех типов (спутники ДЗЗ, спутники связи и экспериментально-технологические спутники) за период с 2016 до 2020 гг. Исходные данные временного ряда представлены в табл. 1.

Таблица 1

Количество запусков спутников трех типов на низкую околоземную орбиту за 2016–2020 гг.

Год запуска	Спутники ДЗЗ	Спутники связи	Экспериментально-технологические спутники
2016	49	0	12
2017	139	39	23
2018	139	51	64
2019	104	101	56
2020	132	973	37

Модели выполнены в программе MS Excel с помощью стандартной функции автоматического построения линии тренда. Уравнения, описывающие линии

трендов с выбранными коэффициентами детерминации для спутников трех типов, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Тренды для выбранных спутников

Вид тренда	Спутники ДЗЗ	Спутники связи	Экспериментально-технологические спутники
Линейный	$y = 13,1x + 73,3$ $R^2 = 0,2914$	$y = 200,8x - 369,6$ $R^2 = 0,5843$	$y = 8,3x + 13,5$ $R^2 = 0,3624$
Экспоненциальный	$y = 63,436e^{0,1692x}$ $R^2 = 0,2361$	Невозможно построить, так как имеется нулевое значение	$y = 12,687e^{0,3142x}$ $R^2 = 0,2181$
Логарифмический	$y = 41,228 \ln x + 73,124$ $R^2 = 0,4663$	$y = 417,54 \ln x - 166,99$ $R^2 = 0,4081$	$y = 24,51 \ln x + 14,932$ $R^2 = 0,5105$
Полиномиальный 3-й степени	$y = 12,75x^3 - 121,11x^2 + 382,14x - 220,4$ $R^2 = 0,9955$	Не применяется, так как последовательность строго возрастающая	$y = -7,7857x^2 + 55,014x - 41$ $R^2 = 0,8087$
Степенной	$y = 64,044x^{0,5201}$ $R^2 = 0,3698$	Невозможно построить, так как имеется нулевое значение	$y = 13,714x^{0,903}$ $R^2 = 0,3782$

Для спутников ДЗЗ на основании полученных уравнений и коэффициентов детерминации выбрали полиномиальный тренд третьей степени (рис. 6) с коэффициентом $R^2 = 0,9955$, так как он показал весьма тесную связь с регрессионным рядом данных по сравнению с другими трендами. Тренд, построенный на основе данных за 2016–2020 гг. с прогнозом на 5 лет вперед, показал, что к 2021 г. будет запущено примерно 72 спутника ДЗЗ. Отсюда видно, что в прогнозе на ближайший год получился адекватный результат. Также отметим, что на ближайший год тенденции к росту количества запусков спутников ДЗЗ не наблюдается.

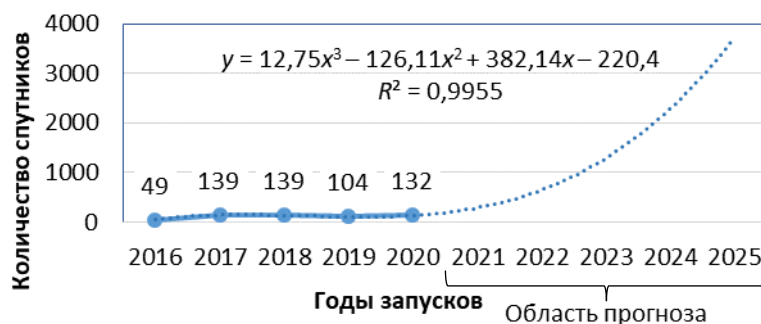


Рис. 6. Временной ряд для спутников ДЗЗ с прогнозом до 2025 г.

Для спутников связи на основании полученных уравнений и коэффициентов детерминации выбрали линейный тренд (рис. 7) с коэффициентом $R^2 = 0,5843$ как имеющий большую точность по сравнению с другими трендами.

Прогноз показал, что к 2021 г. можно ожидать примерно 835 запусков спутников связи, а к 2025 г. прогнозное значение превышает значение 7600. Отсюда видно, что результат на ближайший год получился адекватным, а в прогнозе на 5 лет результат не соответствует действительности. Также отметим тенденцию к значительному росту количества запусков спутников связи.

Для экспериментально-технологических спутников на основании полученных уравнений и коэффициентов детерминации выбрали полиномиальный тренд второй степени (рис. 8) с коэффициентом $R^2 = 0,8087$, поскольку он и имеет большую точность по сравнению с другими.

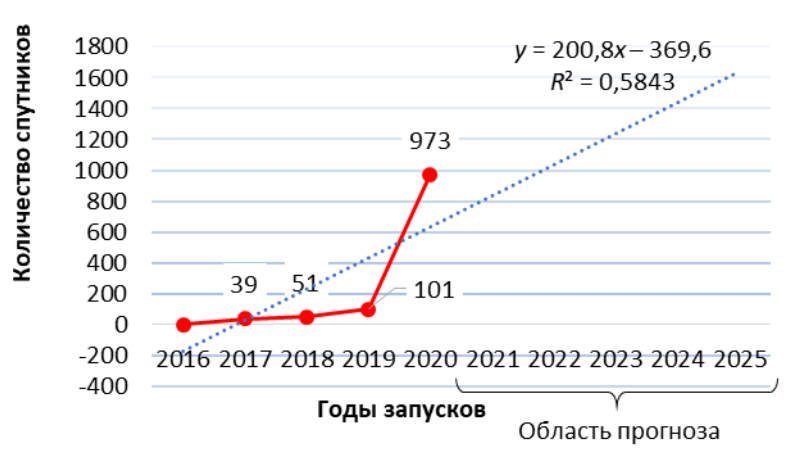


Рис. 7. Временной ряд количества запусков спутников связи с линейным трендом и прогнозом до 2025 г.

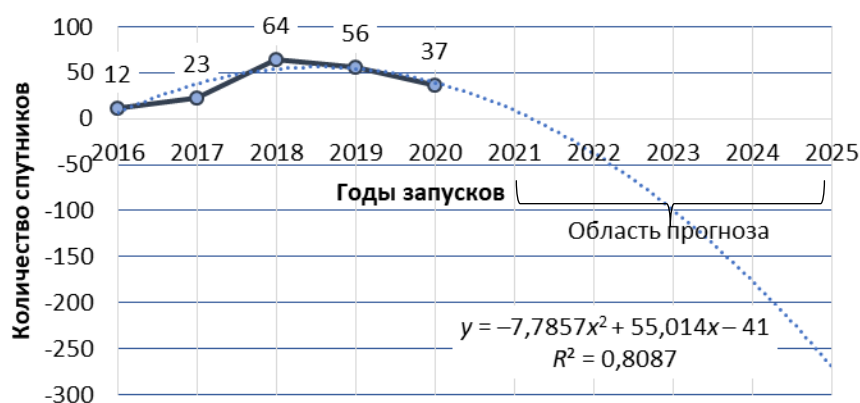


Рис. 8. Временной ряд количества запусков экспериментально-технологических спутников с полиномиальным трендом второй степени и прогнозом до 2025 г.

Прогноз показал, что к 2021 г. будет запущено примерно 9 экспериментально-технологических спутников, а после 2021 г. показатели становятся отрицательными. Отсюда видно, что в прогнозе на ближайший год результат получился адекватным, а в прогнозе на 5 лет результат не соответствует действительности.

Прогнозирование с использованием метода наименьших квадратов. Особенности анализа и прогноза динамических или временных рядов на 5 лет вперед предполагают расчет не только долговременной составляющей, которую находили методом экстраполяции трендов. По результатам проведенного методом экстраполяции трендов прогнозирования видно, что с помощью долговременной составляющей можно получить достоверный прогноз максимум на год вперед. Чтобы получить достоверный прогноз на 5 лет вперед, помимо долговременной составляющей нужно также учесть циклическую, а в отдельных случаях и случайную составляющую.

Выявление долговременной составляющей. Имеются экспериментальные данные $Y_i(x_i)$ и есть основания аппроксимировать их линейной зависимостью $Y_r(x) = a + bx$, причем постоянные коэффициенты a и b выбраны так, чтобы сумма квадратов разностей между значениями $Y_i(x_i)$ и $Y_r(x_i)$ для всех точек была бы минимальна:

$$\sum_{i=1}^N (Y_i(x_i) - a - bx_i)^2 = \sum_{i=1}^N (\Delta_i)^2 \rightarrow \min,$$

где N — число точек в исходной последовательности.

Приравняем частные производные по a и b этой величины к нулю:

$$\frac{\partial \left(\sum_{i=1}^N (Y_i(x_i) - a - bx_i)^2 \right)}{\partial a} = 0; \quad \frac{\partial \left(\sum_{i=1}^N (Y_i(x_i) - a - bx_i)^2 \right)}{\partial b} = 0.$$

Проведя некоторые математические преобразования, запишем выражения для коэффициентов a и b :

$$a = \frac{\sum X^2 \sum Y - \sum X \sum XY}{N \sum X^2 - \sum X \sum X}; \quad b = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{N \sum X^2 - \sum X \sum X}.$$

Вычислив коэффициенты a и b , получим уравнение для долговременной составляющей динамического ряда.

Выявление циклической составляющей. Перед выявлением циклической составляющей необходимо из исходной последовательности $Y_i(x_i)$ исключить долговременную составляющую $C_i(x_i) = Y_i(x_i) - Y_r(x_i)$, где $C_i(x_i)$ — новая последовательность, включающая в свой состав циклическую и случайную составляющие. Для выявления циклической составляющей выбрана некоторая периодическая функция (в данной работе предложено взять функцию косинуса) $C_r(x) = A \cos(\omega x + c)$.

Параметры периодической функции вычисляются следующим образом: A — амплитуда периодической функции — в общем случае вычисляется как разность максимального и минимального значения C_i , поделенная пополам. Но поскольку в нашем случае амплитуда является не постоянной, а зависит от случайной составляющей, то, чтобы не усложнять расчеты, для вычисления амплитуды предлагается формула

$$A = \frac{C_i(x_i)_{\max} - C_i(x_i)_{\min}}{2,1 + e},$$

где e — уровень случайной составляющей, заданный в качестве начального условия.

Для определения максимального и минимального значения C_i в MS Excel применяют функции МАКС(...) и МИН(...), где в скобках указывают ячейки, в которых записаны значения C_i .

Чтобы не брать производную и не проводить математические преобразования, можно воспользоваться функцией MS Excel «Поиск решения». При ее запуске в графе «Целевая ячейка» необходимо указать ту ячейку, в которой вычисляется сумма разностей значений $C_r(x_i)$ и $C_i(x_i)$, представленной в виде формулы $\sum [C_i(x_i) - A \cos(\omega x + c)] \rightarrow \min$, где ω — частота периодической функции, которая определяется по формуле $\omega = 2\pi/T$ (T — период, вычисляемый по графику $C_i(x_i)$ как расстояние между двумя соседними точками); c — начальное смещение — определяется, так же, как и в случае для долговременной составляющей, из условия минимальности суммы разностей значений $C_r(x_i)$ и $C_i(x_i)$, а в графе «Изменяя ячейки» указать ту ячейку, в которую будет записываться значение начального смещения c . Далее в графе «Равной» необходимо выбрать «минимальному значению». После выполнения этой операции будут найдены все параметры функции периодической составляющей $C_r(x) = A \cos(\omega x + c)$ [7, 8].

Прогнозирование с помощью метода наименьших квадратов осуществлялось в программе MS Excel [9, 10]. Были выполнены расчеты для спутников ДЗЗ и спутников связи. Для спутников ДЗЗ вычисление коэффициентов динамической регрессии показано на рис. 9. На основе данных таблицы Excel, представленной на рис. 9, выполнен расчет коэффициентов a , b и R^2 (рис. 10). По найденным коэффициентам определена долговременная составляющая динамического ряда для спутников ДЗЗ (рис. 11).

В процессе вычислений мы выполнили подбор коэффициентов циклической составляющей так, чтобы сумма квадратов циклических аппроксимаций была минимальна. Циклическая аппроксимация в данном случае представлена формулой $C_a(x) = (C(x) - A \cos(\omega x + c))^2$. Расчеты показаны на рис. 12, а циклическая составляющая — на рис. 13, где по горизонтальной оси указан период прогноза, соответствующий годам запусков спутников, а по вертикальной — область значений циклической составляющей.

№ п/п	X _i	Y _i	X _i ·Y _i	X ²	Y _{расч}	Y ²
1	1	24,00	24,00	1,00	3,18	576,00
2	2	21,00	42,00	4,00	18,03	441,00
3	3	25,00	75,00	9,00	32,88	625,00
4	4	36,00	144,00	16,00	47,73	1296,00
5	5	31,00	155,00	25,00	62,58	961,00
6	6	49,00	294,00	36,00	77,42	2401,00
7	7	139,00	973,00	49,00	92,27	19321,00
8	8	139,00	1112,00	64,00	107,12	19321,00
9	9	104,00	936,00	81,00	121,97	10816,00
10	10	132,00	1320,00	100,00	136,82	17424,00
СУММА	55	700,00	5075,00	385,00	700,00	73182,00

Рис. 9. Исходные данные и результаты расчетов в MS Excel

$a = \frac{\sum X^2 \cdot \sum Y - \sum X \cdot \sum XY}{N \cdot \sum X^2 - \sum X \cdot \sum X}$	
$b = \frac{N \cdot \sum XY - \sum X \cdot \sum Y}{N \cdot \sum X^2 - \sum X \cdot \sum X}$	
$R = \frac{N \cdot \sum XY - \sum X \cdot \sum Y}{\sqrt{N \cdot \sum X^2 - \sum X \cdot \sum X} \sqrt{N \cdot \sum Y^2 - \sum Y \cdot \sum Y}}$	
Y=a+bx	
a=	-11,67
b=	14,85
R=	0,867287
R ² =	0,752187
Y=	-11,6667 + 14,84848 x
	0,867287 ПИРСОН(C5:C14;D5:D14)
	0,752187 КВПИРСОН(C5:C14;D5:D14)

Рис. 10. Экранная копия расчета в MS Excel коэффициентов a , b и коэффициента корреляции R^2

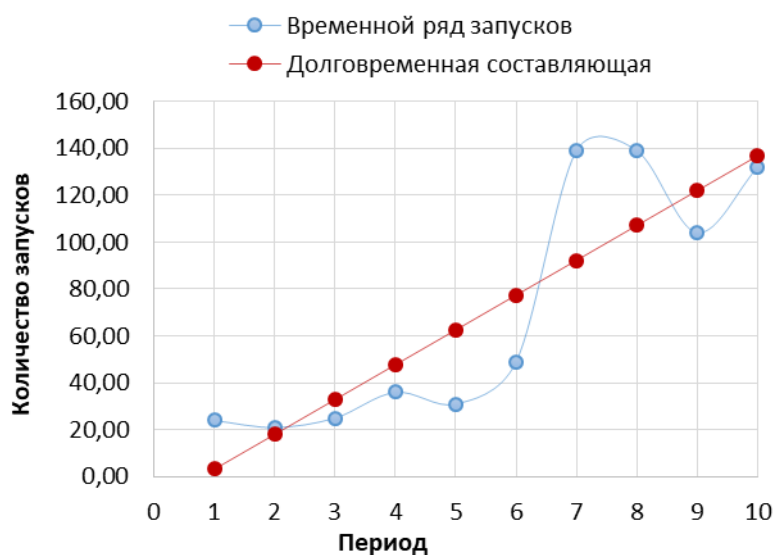


Рис. 11. Диаграмма долговременной составляющей для спутников ДЗЗ

Y(x)	a	b	c	C(x)=Y(x)-Ur(x)		*=(C(x)-(A*cos(wx+c))) ²	A*cos(wx+c)
a+bx	-11,6667	14,84848					
A*cos(wx+c)	30,12	0,981748	-0,589049				
Ограничения	30,12	0,981748	-0,589049				
	Амплитуда	Период	Смещение				
Погрешности						Установки поиска решения	
Аргумент	Функция	Тренд	ЦиклСоот	ЦиклАппр	Значения		
x	Y(x)	Ur(x)	C(x)	Sa(x) *	Sr(x)	Установить целев.	\$F\$62
1	24,00	3,182	20,818	49,0824	27,824	Равной	мин. знач.
2	21,00	18,030	2,970	8,4434	5,875	Изменяя ячейки	\$C\$6:\$E\$6
3	25,00	32,879	-7,879	180,0113	-21,296	Ограничения	C6=C7
4	36,00	47,727	-11,727	317,2173	-29,538		D6=D7
5	31,00	62,576	-31,576	402,0287	-11,525		E6>=E7
6	49,00	77,424	-28,424	2039,0735	16,732		
7	139,00	92,273	46,727	275,9161	30,117		
8	139,00	107,121	31,879	229,4295	16,732		
9	104,00	121,970	-17,970	41,5328	-11,525		
10	132,00	136,818	-4,818	611,0629	-29,538		
11		151,667	-151,667		-21,296		
12		166,515	-166,515		5,875		
13		181,364	-181,364		27,824		
14		196,212	-196,212		25,041		
15		211,061	-211,061		0,000		
CF=СУММ(F12:F61)→				4153,7978			

Рис. 12. Экранная копия расчета в MS Excel циклической составляющей запусков спутников ДЗЗ

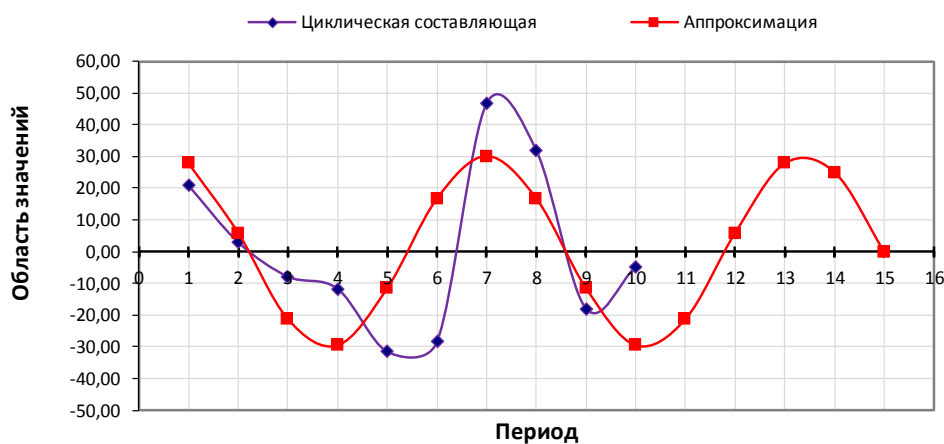


Рис. 13. Циклическая составляющая динамического ряда запусков спутников ДЗЗ

После нахождения ряда данных долговременной и циклической составляющих выполнили их суммирование. Провели экстраполяцию данных аппроксимации на 5 лет вперед. Получили график прогноза запусков спутников ДЗЗ с помощью метода наименьших квадратов с учетом долговременной и циклической составляющих (рис. 14).

Расчеты, проведенные с помощью метода наименьших квадратов с учетом долговременной и циклической составляющих, показали, что к 2025 г. может быть запущено еще около 1000 спутников ДЗЗ, при том что в период с 2011 по

2020 г. всего было запущено 700 спутников данного типа. Следовательно, на ближайшие 5 лет наблюдается тенденция к значительному росту количества запусков спутников ДЗЗ на низкую околоземную орбиту.

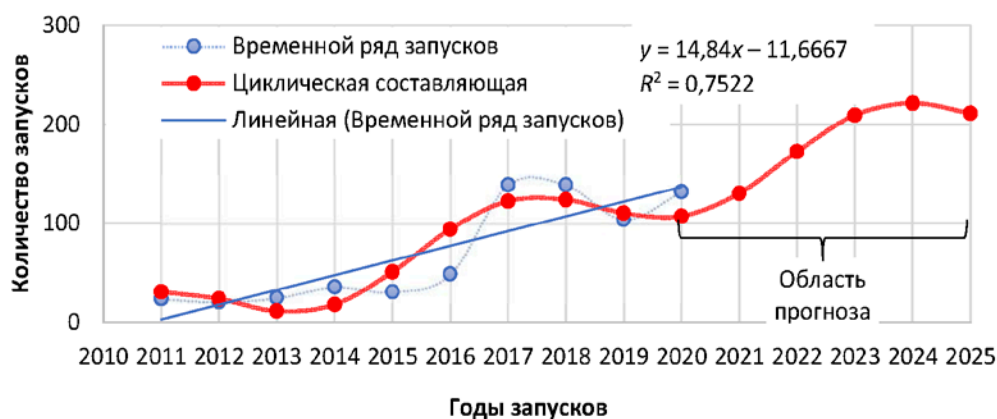


Рис. 14. Прогноз запусков спутников ДЗЗ на низкую околоземную орбиту

Аналогично определили долговременную (рис. 15) и циклическую (рис. 16) составляющие для спутников связи. Выполнили суммирование этих аппроксимаций и экстраполяцию данных на 5 лет вперед (рис. 17).

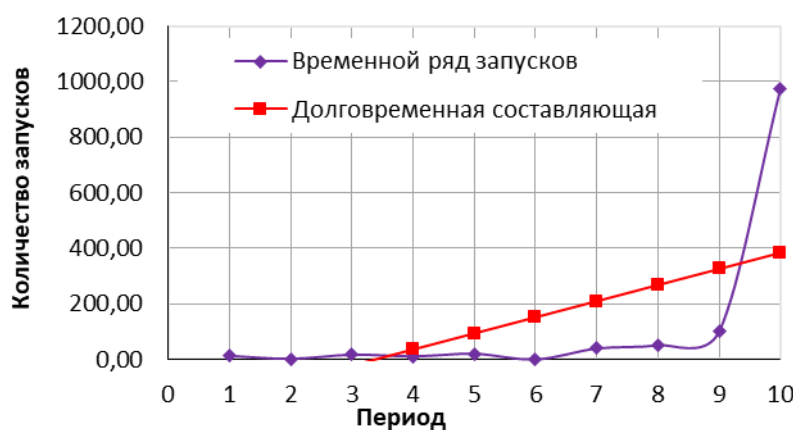


Рис. 15. Долговременная составляющая динамического ряда запусков спутников связи

Прогноз, выполненный с помощью метода наименьших квадратов с учетом долговременной и циклической составляющих (рис. 17), показал, что к 2025 г. может быть запущено еще около 2240 спутников дистанционного зондирования, при том, что в период с 2011 по 2020 г. всего было запущено 1227 спутников данного типа. Отсюда видно, что на ближайшие 5 лет наблюдается тенденция к значительному росту количества запусков спутников связи на низкую околоземную орбиту.

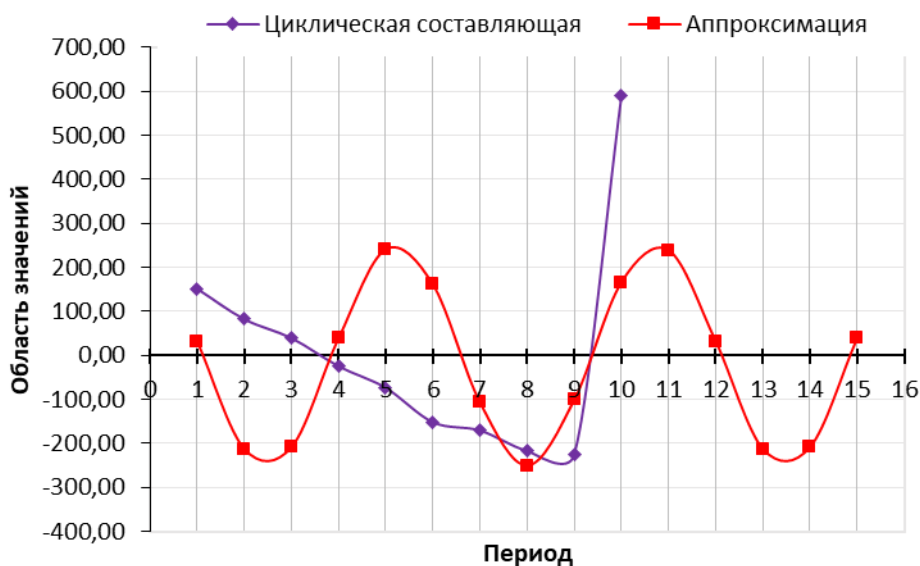


Рис. 16. Циклическая составляющая динамического ряда запусков спутников связи



Рис. 17. Прогноз запусков спутников связи на низкую околоземную орбиту

Выводы. По итогам исследований можно сделать следующие выводы.

1. По результатам выполненного прогнозирования был сделан вывод о том, что метод экстраполяции трендов применим для прогнозирования только на ближайший год, в то время как методом наименьших квадратов можно получить достаточно достоверный прогноз на 5 лет.

2. На основании полученных прогнозов были выявлены тенденции к изменению количества запусков спутников рассматриваемых типов на низкую околоземную орбиту на ближайшие 5 лет. В итоге был сделан вывод, что спутники связи имеют тенденцию к большему росту количества запусков, чем спутники ДЗЗ и экспериментально-технологические. Это свидетельствует о том, что спутники связи в ближайшем будущем являются наиболее перспективными и востребованными как с точки зрения общей численности, так и с точки зрения технологической новизны.

Литература

- [1] Носенко Я. RusBase. Как стремительное развитие спутников может повлиять на жизнь на земле. *rb.ru: веб-сайт*. URL: <https://rb.ru/story/satellites-impact-earth/> (дата обращения: 01.12.2021).
- [2] UCS satellite database. *ucsusa.org: веб-сайт*. URL: <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database> (дата обращения: 21.10.2021).
- [3] Всё, что Вам нужно знать о низкой околоземной орбите. *mediasat.info: веб-сайт*. URL: <https://mediasat.info/2015/07/10/Leo/> (дата обращения: 01.12.2021).
- [4] One Web опережает SpaceX в развертывании сети интернет спутников. *habr.com: веб-сайт*. URL: <https://habr.com/ru/post/442476/> (дата обращения: 01.12.2021).
- [5] Завьялов П.С. Прогнозирование: методологии и процедуры. В: Маркетинг в схемах, рисунках, таблицах. М., ИНФРА-М, 2007, с. 93–100.
- [6] Светуных И.С., Светуных С.Г. Методы и модели социально-экономического прогнозирования. Т. 2. Методы и модели. М., Юрайт, 2014.
- [7] Самохвалова Е.А., Шляхтенкова А.В. Тенденции мировых запусков ракетноносителей. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-536>
- [8] Горелова Г.В., Кацко И.А. Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением EXCEL. Ростов-на-Дону, Феникс, 2005.
- [9] Попов А.А. Excel: практическое руководство. М., Десс Ком, 2000.
- [10] Бараз В.Р., Пегашкин В.Ф. Использование MS Excel для анализа статических данных. Нижний Тагил, УрФУ, 2014.

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

Свешникова Анастасия Сергеевна — студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Титов Олег Георгиевич — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

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

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Пасынков А.А., Свешникова А.С., Титов О.Г. Анализ и сравнение методов прогнозирования запусков спутников различных типов на низкую околоземную орбиту. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 02(67). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-02-767>

**ANALYSIS AND COMPARISON OF METHODS
FOR PREDICTING LAUNCHES OF SATELLITES
OF VARIOUS TYPES INTO LOW EARTH ORBIT**

A.A. Pasyukov

alex13-4@mail.ru

SPIN-code: 6764-6127

A.S. Sveshnikova

sveshnikovaas@student.bmstu.ru

SPIN-code: 2625-1852

O.G. Titov

titovog@student.bmstu.ru

SPIN-code: 7575-7369

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The authors completed a study of global launches into low Earth orbit for the period 2016–2020 of spacecraft of various types: satellites for remote sensing of the Earth, communication satellites and experimental and technological satellites. The initial data are taken from open sources and are collected in three separate tables in the Microsoft Excel program. As part of the work, calculations were carried out and graphs were built. In the course of the study, forecasting in the MS Excel program of launches of satellites of each type was performed by two analytical methods: extrapolation of trends and least squares. The results of forecasting showed that communication satellites tend to increase the number of launches, and therefore are more promising in terms of technological novelty.

Keywords

Forecasting, launches, spacecraft, satellite, trend model, time (dynamic) series, regression analysis

Received 19.01.2022

© Bauman Moscow State Technical University, 2022

References

- [1] Nosenko Ya. RusBase. Kak stremitel'noe razvitiye sputnikov mozhet povliyat' na zhizn' na zemle [How intense satellite development can impact on life on Earth]. *rb.ru: website* (in Russ.). URL: <https://rb.ru/story/satellites-impact-earth/> (accessed: 01.12.2021).
- [2] UCS satellite database. *ucsusa.org: website*. URL: <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database> (accessed: 21.10.2021).
- [3] Vse, chto Vam nuzhno znat' o nizkoy okolozemnoy orbite [Everything we know about low Earth orbit]. *mediasat.info: website* (in Russ.). URL: <https://mediasat.info/2015/07/10/leo/> (accessed: 01.12.2021).
- [4] One Web operezhaet SpaceX v razvertyvanii seti internet sputnikov [One Web is ahead of SpaceX in satellite net deployment]. *habr.com: website* (in Russ.). URL: <https://habr.com/ru/post/442476/> (accessed: 01.12.2021).
- [5] Zav'yalov P.S. Prognozirovaniye metodologii i protsedury [Forecasting: methodology and procedures]. V: Marketing v skhemakh, risunkakh, tablitsakh [In: marketing in schemes, drawings and charts]. Moscow, INFRA-M Publ., 2007, pp. 93–100 (in Russ.).

- [6] Svetun'kov I.S., Svetun'kov S.G. Metody i modeli sotsial'no-ekonomicheskogo prognozirovaniya. T. 2. Metody i modeli [Methods and models of social-economic forecasting. Vol. 2. Methods and models]. Moscow, Yurayt Publ., 2014 (in Russ.).
- [7] Samokhvalova E.A., Shlyakhtenkova A.V. World launch vehicle operations trends. *Politekhnicheskiiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical Student Journal], 2019, no. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-536> (in Russ.).
- [8] Gorelova G.V., Katsko I.A. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika v primerakh i zadachakh s primeneniem EXCEL [Probability theory and mathematical statistics in examples and problems using EXCEL]. Rostov-na-Donu, Feniks Publ., 2005 (in Russ.).
- [9] Popov A.A. Excel: prakticheskoe rukovodstvo [Excel: practical guidance]. Moscow, Dess Kom, 2000 (in Russ.).
- [10] Baraz V.R., Pegashkin V.F. Ispol'zovanie MS Excel dlya analiza staticheskikh dannykh [Using MS Excel for analysis of static data]. Nizhniy Tagil, UrFU Publ., 2014 (in Russ.).

Pasynkov A.A. — Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Sveshnikova A.S. — Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Titov O.G. — Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Vasilyeva T.V., Senior Lecturer, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Pasynkov A.A., Sveshnikova A.S., Titov O.G. Analysis and comparison of methods for predicting launches of satellites of various types into low Earth orbit. *Politekhnicheskiiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 02(67). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-02-767.html> (in Russ.).