

01, январь 2016

УДК 001.18:001.8

Исследование рынка запусков спутников дистанционного зондирования Земли на основе аддитивного метода прогнозирования

Королева А.Ф., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технология ракетно-космического машиностроения»*

Научный руководитель: Васильева Т.В.

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технология ракетно-космического машиностроения»*

cm12@sm.bmstu.ru

Введение

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) на сегодняшний день является одним из самых перспективных направлений в сфере космической деятельности.

Данные, получаемые с космических аппаратов ДЗЗ, являются ядром карт, схем, анализов, прогнозов, приложений. Они также используются для мониторинга и ликвидации последствий природных катастроф, поиска полезных ископаемых и даже в целях устранения нарушений законодательства в сфере безопасности государства.

Рынок спутников активно развивается, технические характеристики совершенствуются, в связи с чем, появляется задача прогнозирования динамики мировых запусков сегмента ДЗЗ в среднесрочной перспективе.

Трендовая модель запусков спутников ДЗЗ

Рассмотрим получение трендовой модели запусков спутников ДЗЗ на примере четырех стран – России, США, Китая и Индии. Расчеты выполнялись по данным UCS Satellite Database [1].

Количество выведенных на орбиту спутников ДЗЗ с 2000 по 2015 г.г. [2] представлено таблице.

Год	США	РФ	Китай	Индия
2000	3	1	0	0
2001	4	2	0	1
2002	7	2	3	0
2003	5	1	3	1
2004	6	1	4	0
2005	4	5	1	1
2006	2	3	2	0
2007	6	1	5	1
2008	5	2	8	2
2009	4	3	3	2
2010	7	1	4	1
2011	6	2	5	1
2012	8	2	8	2
2013	9	3	6	1
2014	10	4	7	2
2015	11	6	8	1

США

Результаты моделирования тенденции временного ряда [3]:

а) линейный тренд $y = 0,3926x + 2,725$ $R^2 = 0,5521$,

б) экспоненциальный тренд $y = 3,2373e^{0,0634x}$ $R^2 = 0,4445$,

в) степенной тренд $y = 2,9466x^{0,33}$ $R^2 = 0,3313$,

г) логарифмический тренд $y = 1,9675\ln(x) + 2,2908$ $R^2 = 0,3809$.

Для выбора тренда, который лучше всего описывает наш временной ряд, воспользовались коэффициентом детерминации. Лучше всего описывает наш временной ряд линейный тренд с надежностью 0,5521.

По полученному уравнению, используя критерий Дарбина – Уотсона определим коэффициенты автокорреляции в остатках:

$$d_1 = 0.36, d_2 = 0.32, d_3 = 0.37, d_4 = 0.35, d_5 = 0.61.$$

Наиболее высоким оказался коэффициент автокорреляции $d=0.61$ порядка $\tau=5$, значит, ряд содержит циклические колебания с периодичностью в 5 моментов времени;

Далее, в ходе исследований была построена аддитивная модель.

Китай

Результаты моделирования тенденции временного ряда:

а) линейный тренд $y = 0,4662x + 0,225$ $R^2 = 0,6691$,

б) логарифмический тренд $y = 2,7327\ln(x) - 1,051$ $R^2 = 0,6317$.

Для выбора тренда, который лучше всего описывает наш временной ряд, воспользовались коэффициентом детерминации. Лучше всего описывает наш временной ряд линейный тренд с надежностью 0,6691.

По полученному уравнению, используя критерий Дарбина – Уотсона определим коэффициенты автокорреляции в остатках:

$d_1 = 0.48$, $d_2 = 0.52$, $d_3 = 0.47$, $d_4 = 0.45$, $d_5 = 0.48$.

Наиболее высоким оказался коэффициент автокорреляции $d=0.52$ порядка $\tau=2$, значит, ряд содержит циклические колебания с периодичностью в 2 момента времени;

Далее, в ходе исследований была построена аддитивная модель.

Россия

Результаты моделирования тенденции временного ряда:

а) линейный тренд $y = 0,1603x + 1,075$ $R^2 = 0,2642$,

б) экспоненциальный тренд $y = 1,1862e^{0,0648x}$ $R^2 = 0,2513$,

в) степенной тренд $y = 1,046x^{0,3531}$ $R^2 = 0,2153$,

г) логарифмический тренд $y = 0,8432\ln(x) + 0,821$ $R^2 = 0,1957$.

Для выбора тренда, который лучше всего описывает наш временной ряд, воспользовались коэффициентом детерминации. Лучше всего описывает наш временной ряд линейный тренд с надежностью 0,2642.

По полученному уравнению, используя критерий Дарбина – Уотсона определим коэффициенты автокорреляции в остатках:

$d_1 = 0.18$, $d_2 = 0.21$, $d_3 = 0.26$, $d_4 = 0.25$, $d_5 = 0.39$.

Наиболее высоким оказался коэффициент автокорреляции $d=0.39$ порядка $\tau=5$, значит, ряд содержит циклические колебания с периодичностью в 5 моментов времени;

Далее, в ходе исследований была построена аддитивная модель.

Индия

Результаты моделирования тенденции временного ряда:

а) линейный тренд $y = 0,0912x + 0,225$ $R^2 = 0,3533$,

б) логарифмический тренд $y = 0,548\ln(x) - 0,0504$ $R^2 = 0,3506$.

Для выбора тренда, который лучше всего описывает наш временной ряд, воспользовались коэффициентом детерминации. Лучше всего описывает наш временной ряд линейный тренд с надежностью 0,3533.

Графическое изображение динамики запусков спутников дистанционного зондирования Земли и линии тренда показаны на рис.1.

По полученному уравнению, используя критерий Дарбина – Уотсона определим коэффициенты автокорреляции в остатках:

$$d_1 = 0.39, d_2 = 0.35, d_3 = 0.37, d_4 = 0.42, d_5 = 0.35.$$

Наиболее высоким оказался коэффициент автокорреляции $d=0.42$ порядка $\tau=4$, значит, ряд содержит циклические колебания с периодичностью в 4 моментах времени. Далее, в ходе исследований была построена аддитивная модель.

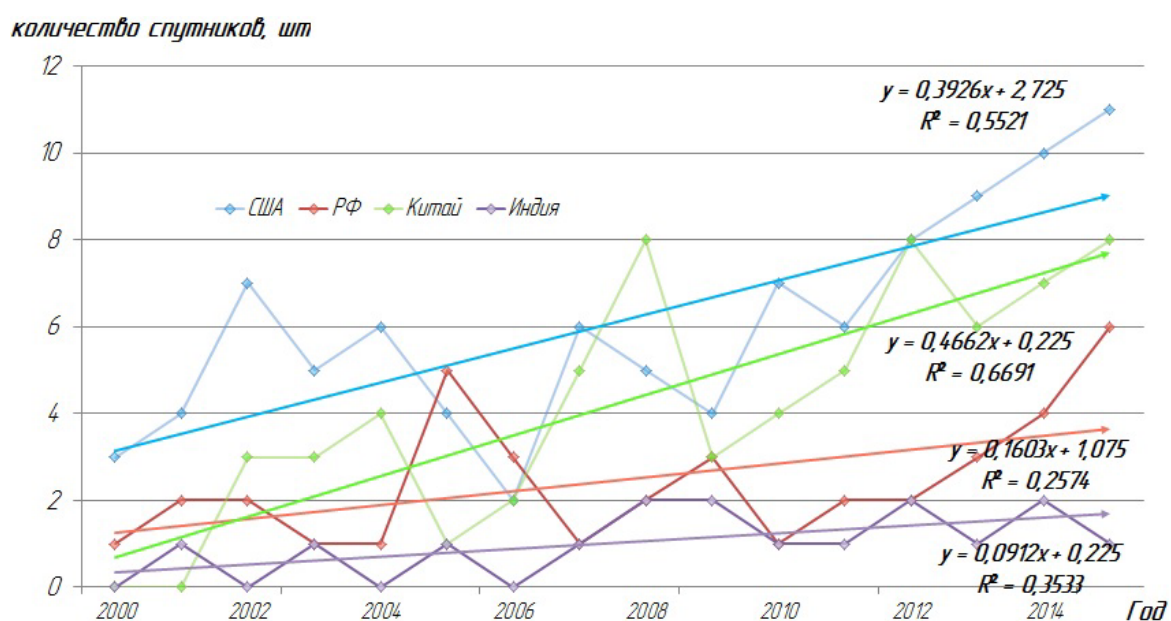


Рис. 1. Динамика запусков спутников дистанционного зондирования Земли с 2000 по 2015 гг.

Динамика запусков спутников дистанционного зондирования Земли сильно колеблется около линии тренда, поэтому для получения более точных результатов необходимо найти циклическую составляющую. Для чего была выбрана аддитивная модель прогнозирования [4].

Данную модель можно представить в виде формулы:

$$Y = \tilde{y}(t) + I(t) + u(t),$$

где: Y – прогнозируемое значение,

$\tilde{y}(t)$ – тренд,

$\Pi(t)$ – циклическая составляющая,

$u(t)$ – остаточная компонента (случайная составляющая, ошибка прогноза).

Наиболее подходящим оказался выявления циклической составляющей с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) [5].

Для проведения гармонического анализа методом БПФ в первую очередь необходимо исключить из ряда трендовую составляющую $\tilde{y}(t)$, т.е. получить стационарный ряд. Стационарным рядом называется ряд, имеющий постоянное математическое ожидание и дисперсию; эти условия выполняются при исключении трендовой составляющей, найденной методом наименьших квадратов (МНК), поскольку ряд с исключенным трендом колеблется около математического ожидания, равного нулю. Далее динамический ряд с исключенной трендовой составляющей с помощью функции БПФ разлагается на гармонические составляющие (гармоники) определенной амплитуды и частоты путем перенесения его в комплексную плоскость, т.е. исходный ряд преобразуется в ряд, представленный комплексными числами. При таком дискретном преобразовании Фурье все исследуемое множество точек принимается за период, равный 2π . Имея ряд из комплексных чисел, мы можем описать его комплекснозначными гармониками Фурье. Причем число значений исследуемого ряда должно составлять $2n$ (n – натуральное число), т.е. число наблюдений должно быть равно 2, 4, 8 или 16 и т.д. С помощью функции прямого преобразования Фурье получаем $(1+2n-1)$ комплекснозначных гармоник.

Из них для описания циклической компоненты выбирают наиболее значимые, критерием выбора служит амплитуда или квадрат амплитуды гармоники.

В итоге получаем уравнение циклической составляющей в виде:

$$\Pi = \sum_{j=1}^k A_j \cdot \cos(\omega_j \cdot i - \varphi_j),$$

где j – номер гармоники,

A_j – амплитуда,

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{n},$$

где n – число данных в ряду остатков,

φ – фаза гармоники,

i – номер наблюдения, отсчитывается от нуля, т.е. $i=t-1$, если t отсчитывается от единицы.

Если обозначить W_j – полученный ряд комплексных чисел, то

$$A_j = |W_j|/e,$$

где e – основание натурального логарифма,

$\phi_j = \arg(W_j)$ – угол в комплексной плоскости между положительным направлением вещественной оси и числом W_j .

Гармонический анализ ряда можно проводить с использованием пакета прикладных программ MathCad plus, с помощью функции прямого преобразования Фурье – fft .

Алгоритм построения модели:

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. Гармонический анализ остатков (выявление циклической составляющей).
4. Оценка модели (расчет средней относительной ошибки и коэффициента достоверности аппроксимации).

Формализация процедуры в MathCad plus выглядит следующим образом:

$$j := 0..(2n-1),$$

$\{(2n-1) - \text{записывается в виде числа}\},$

$$MM := e(t),$$

$\{e(t) - \text{записывается в виде матрицы столбца, ряд остатков, полученный из исходного ряда после вычитания тренда}\},$

$$M_j := MM_j,$$

$$W := \text{fft}(M),$$

$$(\overrightarrow{|W|})^T = ,$$

$$(\overrightarrow{\arg(|W|)})^T = .$$

В итоге получаем две матрицы строки, содержащих по $2n-1$ элементов, первая – модули комплексных гармоник, из которых выбираем наибольшие, вторая – фазы гармоник; рассчитываем амплитуды наиболее значащих гармоник и записываем уравнение циклической составляющей.

Полученные результаты

США

Было получено следующее уравнение циклической составляющей:

$$C = \frac{5.025}{2.718} * \cos\left(\frac{2 * \pi * 1}{16} * i - 0.227\right) + \frac{4.702}{2.718} * \cos\left(\frac{2 * \pi * 3}{16} * i + 2.609\right)$$

Графическое изображение модели аддитивного прогнозирования для США показано на рис.2.

Количество спутников

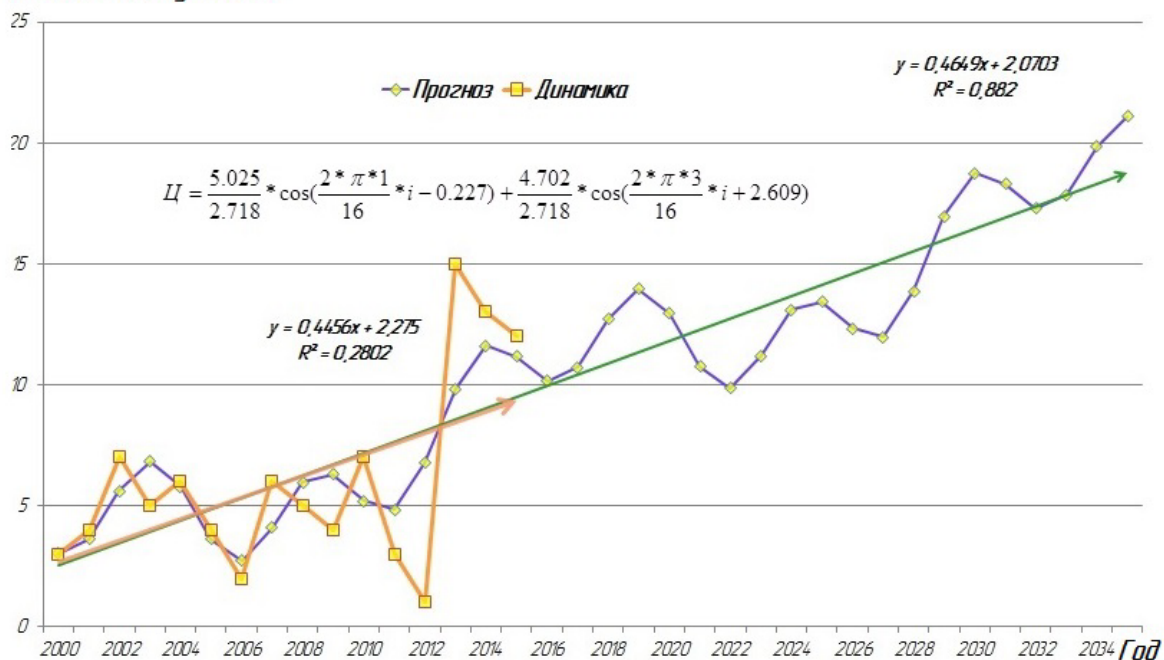


Рис. 2. Прогноз запусков спутников ДЗЗ до 2035 года в США

Китай

Было получено следующее уравнение циклической составляющей:

$$C = \frac{2.377}{2.718} * \cos\left(\frac{2 * \pi * 3}{16} * i - 2.878\right) + \frac{2.781}{2.718} * \cos\left(\frac{2 * \pi * 4}{16} * i + 0.712\right)$$

Графическое изображение модели аддитивного прогнозирования для Китая показано на рис.3.

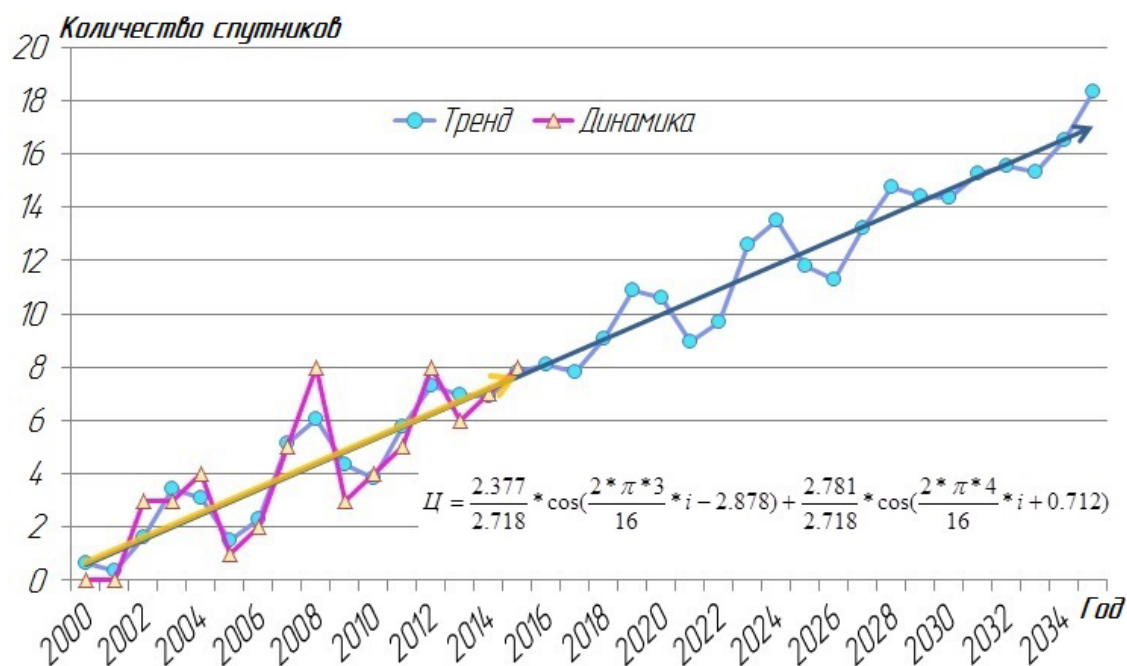


Рис. 3 Прогноз запусков спутников ДЗЗ до 2035 года в Китае

Россия

Было получено следующее уравнение циклической составляющей:

$$Ц = \frac{1.566}{2.718} * \cos\left(\frac{2 * \pi * 2}{16} * i + 1.208\right) + \frac{1.998}{2.718} * \cos\left(\frac{2 * \pi * 5}{16} * i + 2.279\right)$$

Графическое изображение модели аддитивного прогнозирования для США показано на рис.4.

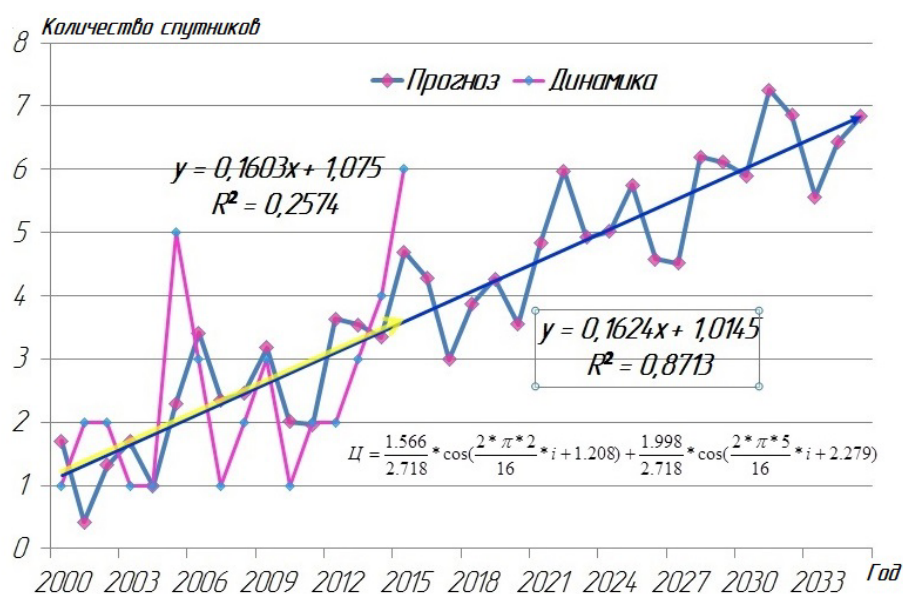


Рис. 4. Прогноз запусков спутников ДЗЗ до 2035 года в России

Индия

Было получено следующее уравнение циклической составляющей:

$$C = \frac{0.67}{2.718} * \cos\left(\frac{2 * \pi * 4}{16} * i - 0.702\right) + \frac{0.986}{2.718} * \cos\left(\frac{2 * \pi * 7}{16} * i - 1.398\right)$$

Графическое изображение модели аддитивного прогнозирования для Индии показано на рис.5.

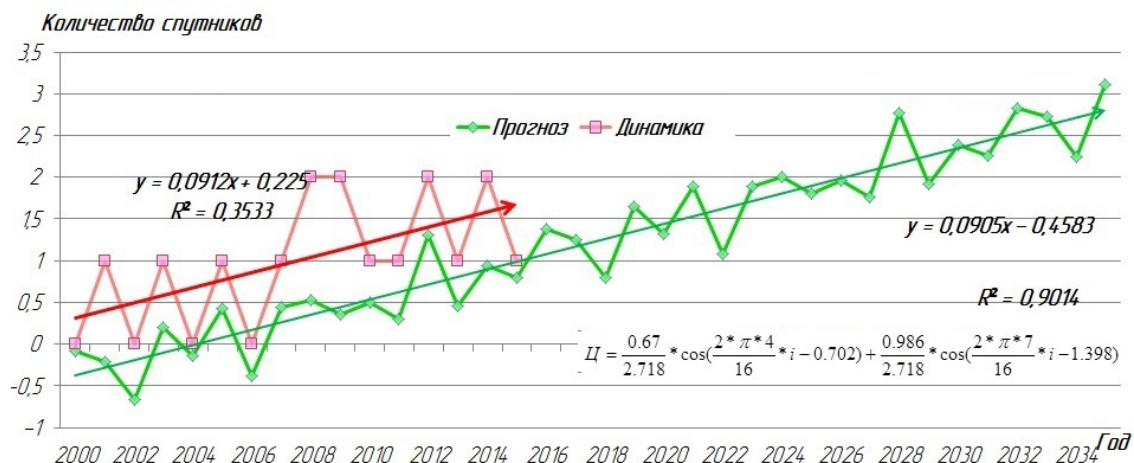


Рис. 5. Прогноз запусков спутников ДЗЗ до 2035 года в Индии

Выводы

1. Трендовая модель запусков спутников ДЗЗ, полученная методом аддитивного прогнозирования с помощью быстрого преобразования Фурье и показанная на рис.6. дает наглядное представление о динамике запусков спутников ДЗЗ во всех исследуемых странах.



Рис. 6. Сравнительный прогноз запусков спутников ДЗЗ до 2035 года в России, США, Китае и Индии

2. Объем мирового рынка гражданских и коммерческих спутников дистанционного зондирования будет расти по линейному закону, представленному на рис.7.

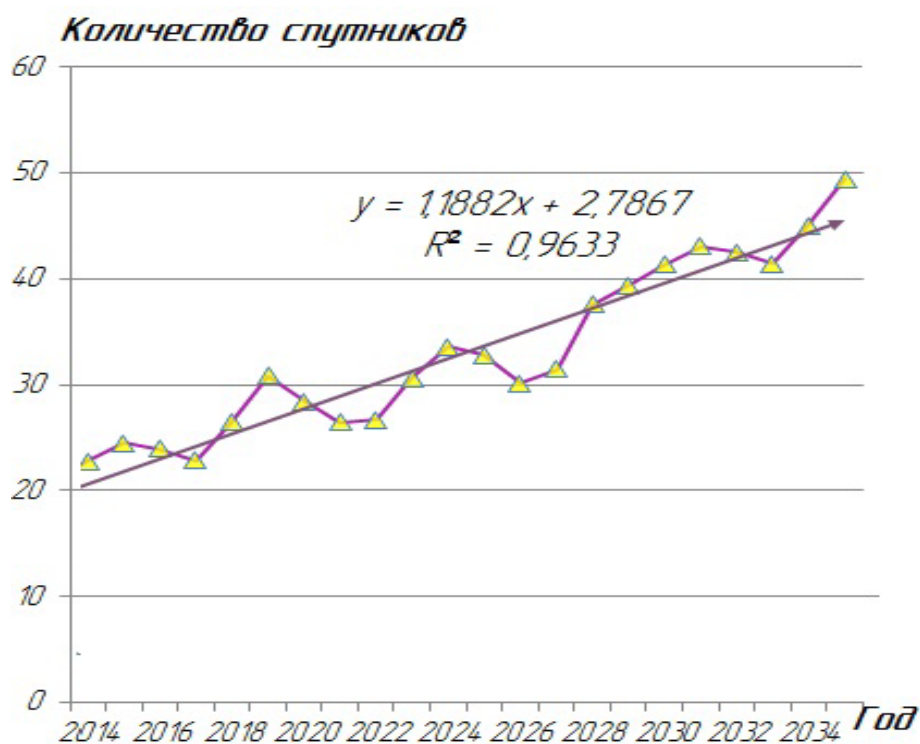


Рис. 7. Суммарный прогноз запусков спутников ДЗЗ в России, США, Китае и Индии до 2035 года

3. В течение следующих 20 лет в России, Китае, США и Индии будет запущено около 700 спутников дистанционного зондирования Земли.

Список литературы

- [1] UCS Satellite Database. Available at: http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/solutions/space-weapons/ucs-satellite-database.html, accessed 19.06.2015.
- [2] The ceos database. Available at: <http://database.eohandbook.com/index.aspx>, accessed 06.2015.
- [3] Тихонов Е. Э. Методы прогнозирования в условиях рынка. М: Наука, 2006. 221 с.
- [4] Губанов А.П. Анализ и прогноз экономических индикаторов с учетом их циклической динамики // Двенадцатый всероссийский симпозиум «Стратегическое планирование и развитие предприятий»: труды. М.: ЦЭМИ РАН, 2011. С. 51 – 53.
- [5] Губанов А.П. Экстраполяция нестационарных временных рядов с циклическими компонентами // Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем 2012»: труды. М.: Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. С. 13–15.