

УДК 334.027

*Д.Ю. Иванов, Е.К. Беляева**

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫВОДА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОРБИТУ

Серийное производство спутников и средств их выведения, удешевление стоимости космических пусков и интерес инвесторов к космическим проектам обуславливают актуальность идей создания глобальных спутниковых систем. Запуск большого количества космических аппаратов на расчетную орбиту связан с рядом экономических задач, одной из которых выступает оптимизация вывода спутников на расчетную орбиту. Данная статья рассматривает один из вариантов решения этой задачи на примере выбора оптимальных ракетносителей для таких проектов спутниковых группировок, как OneWeb, Starlink и «Сфера».

Ключевые слова: мировой космический рынок, модель оптимизации, проект группировки спутников, космические аппараты.

В настоящее время активно ведутся работы по подготовке и реализации проектов, целью которых является формирование обширных орбитальных группировок. Создаваемые спутниковые системы связи могут позволить обеспечить связью подвижные объекты транспорта, точки коллективного доступа в Интернет, абонентов персональной связи, а также реализовать многие другие задачи.

На данный момент существует ряд проектов группировки спутников, конкурирующих друг с другом и находящихся на подготовительной стадии:

– OneWeb (Великобритания).

Это проект группировки спутников, который к 2019 году должен обеспечить широкополосным доступом в сеть Интернет пользователей по всему миру за счет полного охвата поверхности Земли. Инвесторами проекта OneWeb выступают такие игроки, как Airbus Group, Bharti Enterprises, Hughes Network Systems, дочерняя компания EchoStar Corp., Intelsat, Qualcomm Incorporated, The Coca-Cola Company, Totalplay, Grupo Salinas Company, Virgin Group и другие [1]. Проект подразумевает вывод 900 спутников весом до 150 кг на низкую околоземную орбиту [2]. Запуск первых 10 спутников планируется при помощи ракетносителей «Союз»;

– Starlink (США).

Данный проект системы околоземных спутников разработан компанией SpaceX с целью создания дешевого и высокопроизводительного спутникового интернет-канала связи и технических передатчиков для приема и передачи сигнала с Земли и орбиты. Начало реализации проекта приходится на февраль 2018 года: на орбиту были выведены два тестовых спутника Tintin-A и Tintin-B при помощи ракетносителя Falcon 9 [1]. Всего планируется запустить около 8000 спутников массой 386 кг;

– «Сфера» (Россия).

Данный проект глобальной спутниковой системы связи подразумевает запуск более 600 малых спутников связи и дистанционного зондирования Земли [1]. Проект является развитием ранее анонсированной глобальной спутниковой системы «Эфир». Пользователям системы будут доступны услуги телефонной связи и доступа в Интернет, в том числе и услуги связи для «Интернета вещей», мониторинга транспорта и беспилотных аппаратов. Запуск всей группировки малых спутников связи по замыслу разработчиков системы должен быть произведен ориентировочно за 5 лет.

Также существуют иные проекты формирования спутниковых группировок с целью создания сети космического Интернета (к примеру, Boeing, Facebook, Samsung).

Таким образом, в связи с нарастающей популярностью проектов орбитальных группировок возникает задача оптимального вывода спутников с помощью существующих ракетносителей, количество которых ограничено производственными возможностями компаний-производителей, при условии минимизации затрат заказчиков на вывод полезной нагрузки на орбиту. Одним из вариантов оптимизации процесса выбора ракетносителей для определенного проекта является предложенная в статье [3] экономико-математическая модель принятия решения заказчика пусковых услуг, являющаяся частью цикла работ, посвященных моделированию взаимодействия участников космического рынка.

* © Иванов Д.Ю., Беляева Е.К., 2018

Иванов Дмитрий Юрьевич (ssau_ivanov@mail.ru), кафедра организации производства, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34.

Беляева Елена Константиновна (Belyaeva1301@gmail.com), кафедра организации производства, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34.

Экономико-математическая модель принятия решений заказчика пусковых услуг имеет вид:

$$\begin{cases} Z = \sum_{i=1}^n y_i P_i^{PH} \cdot \sum_{j=1}^m m_{s_j} \rightarrow \min, \\ \sum_{i=1}^n y_i m_i = M = \sum_{j=1}^m m_{s_j}, \\ \frac{\sum_{i=1}^n y_i r_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \geq r^*, \\ \sum_{i=1}^n y_i \leq N_i. \end{cases}$$

где y_i – количество ракетносителей i -го типа, необходимых для вывода требуемого количества спутников;

m_i – масса полезной нагрузки, которую может вывести на заданную орбиту i -й тип ракетносителя;

m_{s_j} – масса j -го спутника;

r_i – надежность i -го ракетносителя;

P_i^{PH} – цена за единицу полезной нагрузки на i -м ракетносителе;

N_i – количество ракетносителей, которые имеются в наличии у производителя или получение которых возможно в требуемый провайдером срок;

M – общая масса полезной нагрузки, которую необходимо вывести на заданную орбиту.

Решение подразумевает использование известных методов решений задач целочисленного линейного программирования [4].

Часть данных для поиска решений задачи выбора ракетносителя для вывода космических аппаратов, включающая массу выводимой ракетносителем (РН) полезной нагрузки (ПН) на низкую околоземную орбиту (НОО), цену его запуска, надежность и цену за единицу полезной нагрузки, а также годовые производственные возможности производителей ракетносителей представлены в таблице 1, составленной на основе отчета GAO-2017 [5].

Таблица 1

Характеристики действующих ракетносителей, осуществляющих коммерческие пуски

РН	Масса выводимой ПН на НОО, кг	Цена запуска, млн долл.	Цена за 1 кг ПН, долл.	Производственные возможности/год, шт.	Коэффициент надежности
Antares	6200–6500	80–85	12879–12903	1	1,00
AtlasV	8123–18814	137–179	9514–16866	6	0,99
DeltaIVMedium/Heavy	9420–28790	164–400	13894–17410	1	1,00
Falcon 9	22800	61,2	2864	18	1,00
Minotaur-C	1278–1458	40–50	31299–34294	2	0,70
Pegasus XL	1450	40	88889	1	0,88
Ariane V ECA	21000	178	8476	5	0,98
H-II A/B	10000–16500	90–112,5	6818–9000	6	0,97
Long March 2D	3500	30	8571	1	0,97
Днепр	3200	29	9063	1	0,95
Long March 3A	8500	70	8235	1	0,92
Протон М	23000	65	2826	4	0,33
Polar Satellite Launch Vehicle	3250	21–31	6642–9538	1	0,93
Рокот	1820–2150	41,8	19442–22976	1	0,93
Союз 2	4850	80	16495	10	0,94
Vega	1963	37	18849	3	1,00

Решение задачи выбора оптимальных ракетносителей для таких проектов, как OneWeb, «Сфера» и Starlink, при помощи экономико-математической модели оптимизации вывода космических аппаратов на орбиту представлено в таблице 2.

Величина коэффициента надежности ракетносителя задана на основе информации о предполагаемых ракетносителях, которые могут быть использованы для реализации проектов орбитальных группировок (возможно, в связи с информацией об уходе ракетносителя «Протон М» с орбиты, в качестве его замены будет рассматриваться «Ангара») [6]. При калибровке данной величины результаты будут отличаться от полученных в таблице. Количество ракетносителей определенного вида в решении получено из расчета срока рассматриваемого проекта и производственных возможностей производителя, величина которых представляет статистическое среднегодовое значение выпуска средства выведения производителем. Итоговая стоимость запуска для каждого проекта представляет собой сумму произведенных количества ракетносителей определенного вида и стоимости их запуска.

Таблица 2

Решение задачи оптимизации вывода космических аппаратов на орбиту для проектов OneWeb, Starlink и «Сфера»

Проект	Требуемое кол-во КА к выводу, шт.	Масса КА, кг	Общая масса ПН, кг	Срок проекта, года	Заданный коэффициент надежности РН	Полученное решение		Итоговая стоимость запуска, млн долл.
						РН	Кол-во	
Starlink	8000	386	3088000	4	0,9	Falcon 9	72	13444,8
						Ariane V ECA	20	
						Н-II A/B	24	
						Long March 2D	4	
						Long March 3A	4	
						Atlas V	24	
						«Днепр»	4	
						Antares	4	
						Delta IV Medium/Heavy	4	
«Сфера»	288	500	144000	5	0,3	«Протон М»	6	470
						Antares	1	
						Falcon 9	5	
OneWeb	900	150	135000	2	0,9	Ariane V ECA	1	486
						Falcon 9	5	

Таким образом, сформированная экономико-математическая модель принятия решений заказчика позволяет оптимизировать процесс выбора ракетоносителей для проектов орбитальных группировок и при этом учесть надежность ракетоносителей, производственные возможности их производителей и массу полезной нагрузки, которую требуется доставить на расчетную орбиту.

Библиографический список

1. Цаплин Н. Последний шанс: будет ли у России космический Интернет [Электронный ресурс]. URL: <http://www.forbes.ru/tehnologii/362505-posledniy-shans-budet-li-u-rossii-svoy-kosmicheskii-internet> (дата обращения: 15.05.2018).
2. Мамонтов С. Первые спутники OneWeb запустят на «Союзе» с космодрома Куру в 2018 году [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/space/20180411/1518363303.html> (дата обращения: 15.05.2018).
3. Belyaeva E. Formalization of the structure or the space market and models of interaction of its participants / E. Belyaeva, D. Klevtsov, A. Kurilova, V. Bogatyrev // Quality-Access to Success. 2018. Vol. 19, S 2. P. 76–87.
4. Шевченко В.Н., Золотых Н.Ю. Линейное и целочисленное программирование. Ниж. Новгород: Гос. ун-тет, 2006. 160 с.
5. Kyle E. Space Launch Report 2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gao.gov/assets/690/686613.pdf> (дата обращения: 15.05.2018).
6. Решетникова В., Решетников Д. Для тех, кто верит в «Ангару» и недолюбливает SpaceX [Электронный ресурс]. URL: <https://tass.ru/kosmos/5414658> (дата обращения: 15.05.2018).

References

1. Tsaplin N. Posledniy shans: budet li u Rossii kosmicheskii internet [Elektronnyi resurs] [Last chance: will Russia have space internet]. Available at: <http://www.forbes.ru/tehnologii/362505-posledniy-shans-budet-li-u-rossii-svoy-kosmicheskii-internet> (accessed 15.05.2018) [in Russian].
2. Mamontov S. Pervye sputniki OneWeb zapustiat na «Soyuze» s kosmodroma Kuru v 2018 godu [The first satellites OneWeb will be launched on «Soyuz» from Kuru cosmodrome]. Available at: <https://ria.ru/space/20180411/1518363303.html> (accessed 15.05.2018) [in Russian].
3. Belyaeva E., Klevtsov D., Kurilova D., Bogatyrev V. Formalization of the structure or the space market and models of interaction of its participants. Quality-Access to Success, Vol. 19, S2, 2018, pp. 76–87 [in English].
4. Shevchenko V.N., Zolotykh N.Yu. Lineinoe i tselochislennoe programmirovaniye [Linear and integral programming]. Nizh. Novgorod: gos. un-tet, 2006, 160 p. [in Russian].
5. Kyle E. SpaceLaunchReport 2017. Available at: <https://www.gao.gov/assets/690/686613.pdf> (accessed 15.05.2018).
6. Reshetnikova V., Reshetnikov D. Dlia tekhn, kto verit v «Angaru» i nedoliublivaet SpaceX [Elektronnyi resurs] [For those, who believe in «Angara» and dislike SpaceX]. Available at: <https://tass.ru/kosmos/5414658> (accessed 15.05.2018) [in Russian].

*D.Yu. Ivanov, E.K. Belyaeva****ECONOMIC-MATHEMATICAL MODEL
OF OPTIMIZATION OF SATELLITES OUTPUT TO ORBIT**

Serial production of satellites and their means of delivery, space launches cost reduction and investor interest in space projects determines the relevance of the global satellite systems creation ideas. The launch of a large number of satellites is associated with a number of economic problems, one of which is the optimization of the satellites output into a calculated orbit. This article considers one of the options of solving such a problem and provides the example of choosing the optimal launch vehicles for such satellite constellation projects as OneWeb, Starlink and Sphere.

Key words: world space market, optimization model, projects of satellite constellation, space vehicles.

Статья поступила в редакцию 20/VI/2018.
The article received 20/VI/2018.

* *Ivanov Dmitry Yurievich* (ssau_ivanov@mail.ru), Department of Organization of Production, Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation.

Belyaeva Elena Konstantinovna (Belyaeva1301@gmail.com), post-graduate student of the Department of Organization of Production, Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation.