УДК 629.76

М.М. ПОЛУЯН, кандидат технических наук
В.В. ДУГА, кандидат технических наук
А.Ю. НИКОЛАЕВ

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ СОСТАВА ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ РАЗНОТИПНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В статье отмечена актуальность решения задачи по максимизации производительности орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Предложено решение задачи геометрическим методом линейного программирования.

***Ключевые слова**: орбитальные группировки космических аппаратов; малые космические аппараты; космические микроаппараты; метод линейного программирования; эффективность применения орбитальной группировки.*

Несмотря на очевидный прогресс в науке и технике последних десятилетий, последствия чрезвычайных ситуаций (ЧС) продолжают наносить существенный ущерб. С целью своевременного мониторинга ЧС активно применяются космические аппараты (КА). Однако периодичность обзора поверхности Земли с помощью КА, функционирующих в составе штатных орбитальных группировок (ОГ), может не обеспечить требуемую оперативность получения информации из районов возникновения ЧС. При этом возникает задача по наращиванию возможностей существующих ОГ либо развертыванию новых. Вместе с тем процесс изготовления, подготовки и запуска современных КА является не только затратным, но и продолжительным. Упомянутый факт, неопределённость момента возникновения и высокая динамика развития ЧС фактически не позволяют своевременно наращивать (или восполнять) современные ОГ. Таким образом, высок риск не оправдать вложенных существенных затрат на создание космических систем в моменты максимальной потребности в них. С целью устранения указанного противоречия целесообразно применение малых космических аппаратов (МКА), меньших по стоимости и более оперативных с точки зрения изготовления, подготовки и запуска [1].

В публикациях, посвященных развитию ракетно-космической техники, термин малый космический аппарат встречается достаточно часто. Согласно существующей классификации данным термином объединяется целый класс КА массой до одной тонны. Немало работ посвящено оцениванию эффективности ОГ на основе МКА, а также способу их выведения [2-7]. Однако, по мнению авторов, говорить об эффективности применения ОГ МКА, не конкретизируя массу единичного МКА, значило бы допускать значительную неопределенность. Среди малых космических аппаратов (МКА) существуют следующие типы: космические микроаппараты (МКР КА) массой 1-10 кг [8], космические мини-аппараты массой до 100 кг и, наконец, КА массой до 1000 кг, которые малыми можно назвать, лишь следуя классификации, приведенной в ГОСТ Р 53802. Таким образом, согласно упомянутому ГОСТ в состав класса МКА входит тип МКА. Для того чтобы избежать путаницы, далее в тексте термин МКА будет применяться с пояснениями «тип» и «класс». В практическом примере термин МКА будет употребляться в значении «тип».

Упомянутые типы класса МКА достаточно сильно разнятся по габаритам, набору бортового оборудования и, как следствие, целевым характеристикам. Очевидно, что ОГ, состоящая из КА, принадлежащих к одному классу МКА (тип МКА и МКР КА), всё же следует считать разнотипной.

Так как массогабаритные характеристики прямо влияют на возможности бортовых систем (точность и скорость изменения ориентации, мощность системы электропитания и пр.), то между космическими аппаратами указанных трёх типов имеются ключевые различия по целому ряду показателей качества: производительности, стоимости, гарантийном сроке активного существования и т.д. При этом оценки некоторых показателей возрастают с уменьшением массы КА. Например, применение МКА позволяет при тех же затратах увеличить их количество в ОГ, что увеличивает периодичность обзора поверхности Земли.

Широко известен тезис о повышении эффективности при минимизации затрат, применяемых к современным сложным техническим системам. В этой связи задача обоснования эффективной ОГ разнотипных КА с уже известными техническими характеристиками принимает характер обоснования количественного состава КА располагаемых типов в этой ОГ.

Эффективность является комплексным свойством целенаправленного процесса и включает в себя три составляющие: результативность, оперативность и ресурсоемкость[1]. Оценивание оперативности (выведения ОГ непосредственно дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), включая оперативность доставки информации потребителю) является отдельной достаточно ёмкой задачей, зависящей в серьёзной степени от наземной инфраструктуры, и в данной работе не рассматривается. При этом под ресурсоёмкостью понимается стоимость создания ОГ, где стоимость создания отдельных КА оценивается по статистическому параметру [9] – удельной стоимости 1 кг массы КА Si, принимающему различные значения для КА различного типа.

Поиск некоторого оптимального решения, соответствующего максимуму производительности при минимуме стоимости, представляет интерес, скорее, для теоретических исследований. Большее практическое значение имеют решения, обеспечивающие максимальную производительность (результативность) ОГ при ограниченной стоимости или минимальную стоимость при производительности не менее требуемой. В качестве практического примера в данной работе решена задача для КА ДЗЗ в упомянутой постановке.

Общая схема применения рассматриваемой методики обоснования состава ОГ, состоящей из разнотипных КА, приведена на рисунке 1. Основные элементы методики представлены в работе [10]. Непосредственно обоснование количественного состава КА в ОГ реализуется с помощью известного метода линейного программирования.

Метод линейного программирования позволяет решать задачи с множеством переменных. Однако решаемая задача при определённых допущениях может быть сведена к поиску всего двух переменных и имеет наглядную геометрическую интерпретацию[2]. В упрощенном виде алгоритм решения задач указанным методом представлен на рисунке 2. Для демонстрации использования данного метода применительно к решаемой задаче в работе введены конкретные значения параметров и показателей качества, имеющие, тем не менее, согласие с фактическими возможностями современных КА и ракет-носителей (РН).

---

[1] Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч.1. Методология, методы, модели: учеб. пособие. М.: Минобороны СССР, 1989. – 635 с.

[2] Федоров А.В. Математическое моделирование систем. СПб.: ИТМО, 2012. – 103 с.; Холод Н.И. Пособие к решению задач по линейной алгебре и линейному программированию. Минск: БГУ, 1971. – 176 с.

При проведении моделирования и расчётов приняты следующие допущения и ограничения:

рассматривается ОГ, состоящая из КА двух типов (МКА и МКР КА);

КА обоих типов разработаны, успешно выполнили программу летных испытаний, т.е. под их стоимостью понимается стоимость изготовления серийного образца. Принятые характеристики указаны в таблице 1;

все КА в одном пуске выводятся в одну орбитальную плоскость, на одну высоту;

для запуска КА используется РН сверхлёгкого класса (СЛК), способная вывести различное количество КА разного типа (таблица 1);

количество РН (т.е. запусков) ограничено 5;

суммарная стоимость создания ОГ КА ограничена 10 млрд руб.

Также имеется естественное ограничение в виде неотрицательности значений переменных.

По поводу принятого значения Si (таблица 1) необходимо отметить, что с учетом тенденции на серийное производство МКА в условиях конвейерного производства удельная стоимость 1 кг массы должна в обозримом будущем снизиться. Однако в настоящее время располагаемые данные позволяют надежно утверждать, что данный показатель для МКР КА значительно выше, чем у КА бо́льших масс, при использовании компонентов одного класса качества.

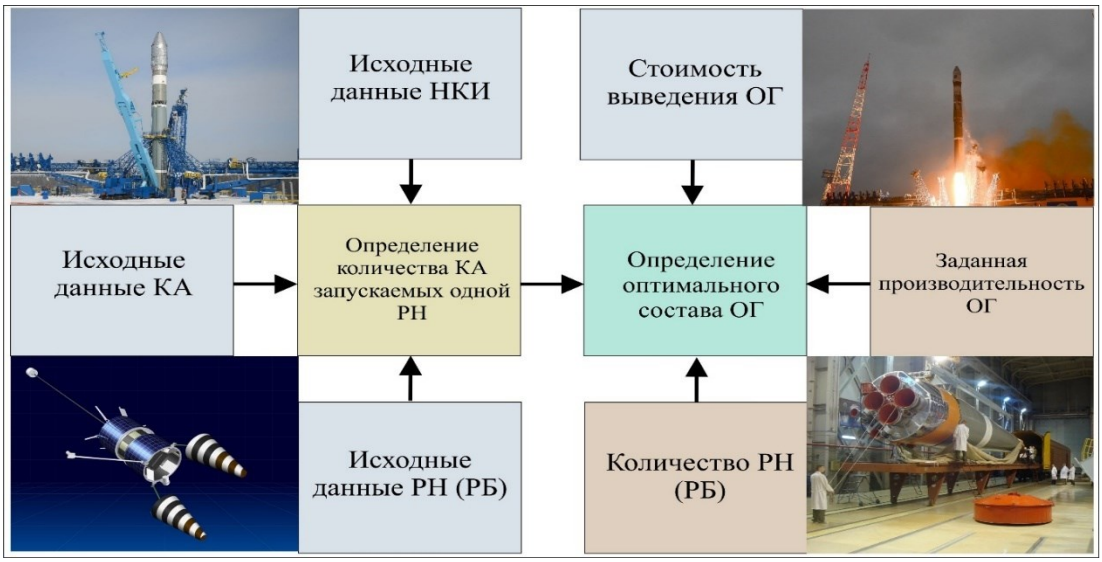


Рисунок 1 – Общая схема применения методики обоснования состава ОГ, состоящей из разнотипных КА

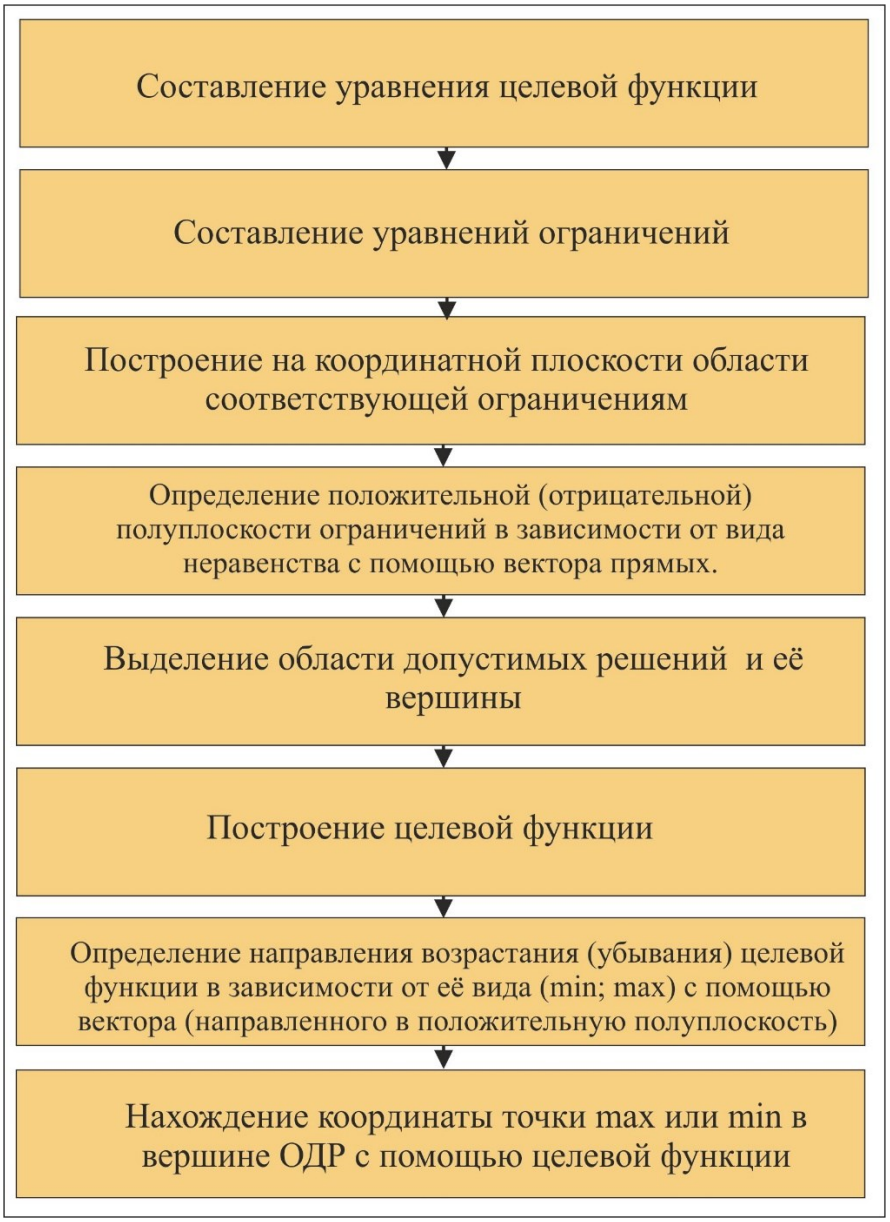


Рисунок 2 – Алгоритм решения задачи геометрическим методом линейного программирования

Таблица 1 – Основные характеристики КА указанных типов

	Масса КА, кг	S_i, млн руб./кг	Количество снимаемых объектов в сутки	Максимальное кол-во КА в одном пуске, ед.	САС*, лет
Тип 1 (МКА)	300	12	100	2	6
Тип 2 (МКР КА)	5	30	10	10	2

* САС – срок активного существования

Количество КА первого типа обозначено – x, второго типа y. Под целевой функцией понимается суммарная производительность ОГ, измеряемая количеством отснятых объектов и определяемая линейной зависимостью вида $Z = C_1x + C_1y$. Производительность ОГ необходимо максимизировать, т.е.

$$Z = 100x + 10y \rightarrow max, \quad (1)$$

что соответствует построению $y = -10x$ на координатной плоскости (рисунок 3), а решение необходимо искать вдоль вектора нормали с координатами (100; 10).

Поскольку введено ограничение на количество РН, оно имеет вид $a_{11}x + a_{11}y \leq 5$, где $a_{11} = \frac{1}{2}$ – показывает, что одна РН может вывести 2 КА тип 1, $a_{12} = \frac{1}{10}$ – показывает, что одна РН может вывести 10 КА тип 2. Таким образом, ограничение по количеству РН имеет вид $\frac{x}{2} + \frac{y}{10} \leq 5$ и на координатной плоскости необходимо построить «отрицательную» (т.к. в неравенстве стоит знак «меньше») полуплоскость, расположенную вдоль вектора нормали с координатами (-0,5; -0,1) от прямой

$$y = 50 - 5x. \quad (2)$$

Ограничение на стоимость создания ОГ (в млрд руб.) имеет вид $3{,}6x + 0{,}15y \leq 10$, где a_{21}=12×0,3=3,6 – показывает стоимость изготовления 300-килограммового МКА тип 1, и a_{22}=0,03×5=0,150 – показывает стоимость изготовления 5-килограммового МКР КА тип 2.

То есть на координатной плоскости необходимо построить «отрицательную» полуплоскость, расположенную вдоль вектора нормали с координатами (-3,6; -0,15) от прямой

$$y = 66{,}67 - 24x. \quad (3)$$

На рисунке 3 представлена область допустимых решений (ОДР) OABC, образованная прямыми (2)-(3) совместно с условием неотрицательности значений переменных.

Геометрически находим искомое значение – точку B. Однако, поскольку переменные могут принимать лишь дискретные значения, то физически существующее решение будет находиться в точке D с одним МКА в ОГ КА.

Для точки D. Из уравнения стоимости определится число КА тип 1 при x=1 МКА: $y \leq 66{,}67 - 24 \cdot 1 = 42{,}67$.

При этом производительность ОГ достигнет значения $Z = 100 \cdot 1 + 10 \cdot 42 = 520$ об/сутки при стоимости ОГ КА $3{,}6 \cdot 1 + 0{,}15 \cdot 42 = 9{,}9$ млрд руб. и расходе РН $\frac{1}{2} + \frac{42}{10} = 4{,}7 \approx 5$.

Из рисунка 1 видно, что также представляют интерес точки А и Е, производительность ОГ, в которых достаточно высока. Все полученные результаты, близкие к искомому решению, представлены в таблице 2.

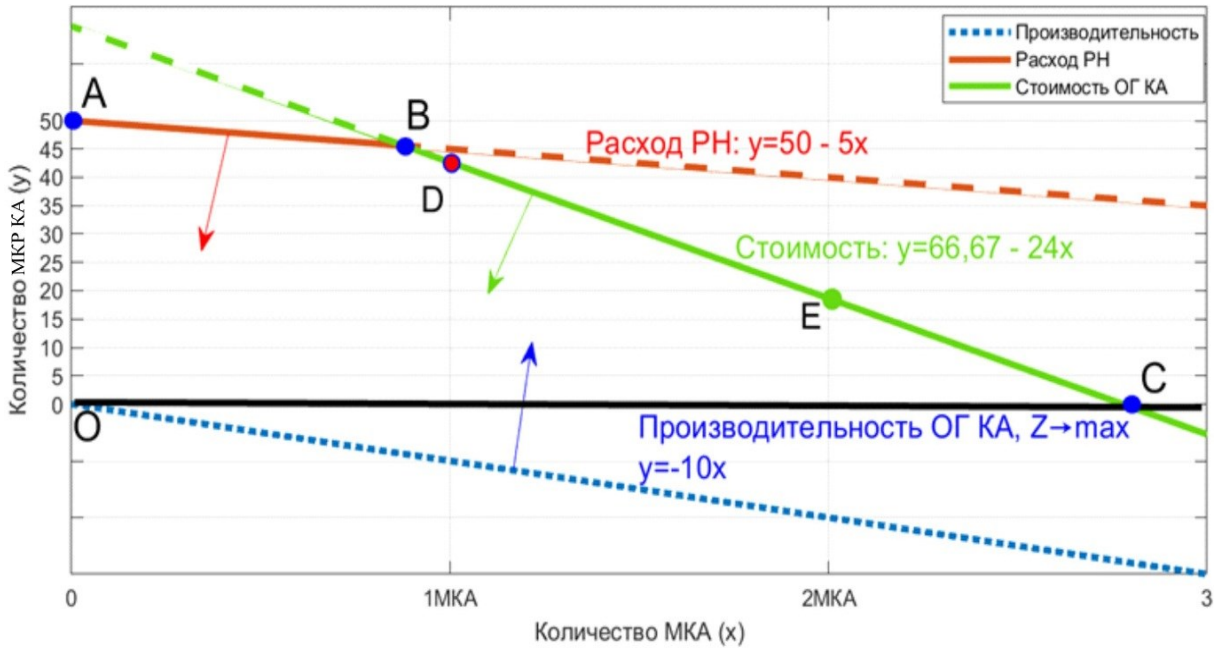


Рисунок 3 – Область допустимых решений целевой функции Z

Таблица 2 – Результаты расчётов в вершинах ОДР

№ п/п	Точка	*x*	*y*	Производ., об/сут.	Стоимость, млрд руб.	Расход РН, ед.	Примечание
1	D	1	42	520	9,9	5 (4,7)	Максимальная производительность
2	A	0	50	500	7,5	5	Высокая производительность при низкой стоимости
3	E	2	18	380	9,9	3 (2,8)	Высокая оперативность развертывания при низком расходе РН

Результаты, получаемые при увеличении расхода РН на 1 единицу (т.е. на 20%) или бюджета на создание ОГ на 1 млрд руб. (на 10%), представлены в таблице 3 и на рисунках 4а, 4б. Примечательно, что наличие возможности для дополнительного запуска РН позволяет почти пропорционально (на 15%) увеличить общую производительность системы при снижении общей стоимости её создания. При этом изменяется и искомый состав ОГ.

Конечно, стоимость производства РН должна оцениваться. Однако в настоящее время с появлением большого числа проектов РН СЛК с диапазоном стоимости выведения 1 кг от 1000 до 45000 долл [11] учёт каких-либо обобщений затруднён. Однако очевидно, что с уменьшением общей массы полезной нагрузки и уменьшается и стоимость запуска РН. Причём, если, например, представить стоимость выведения полезной нагрузки в 4000 долл за килограмм, то для максимальной в рассматриваемых условиях массы 600 кг стоимость РН составит менее 0,2 млрд руб., что значительно меньше полученной экономии (точка А1 в таблице 3 и на рисунке 4а).

Для сравнения, прямое увеличение стоимости ОГ КА, ушедшее на создание дополнительных 3 МКР КА в обеспечение более полной загрузки 5-й РН (по сравнению с математически получаемым значением 4,7), позволяет получить лишь несущественный прирост производительности ОГ (точка D в таблице 2; точка D2 в таблице 3 на рисунке 4б).

Таким образом, в области имеющихся заданных ограничений может быть получено решение (точка А1), обеспечивающее наилучшую производительность ОГ, составленное только из МКР КА.

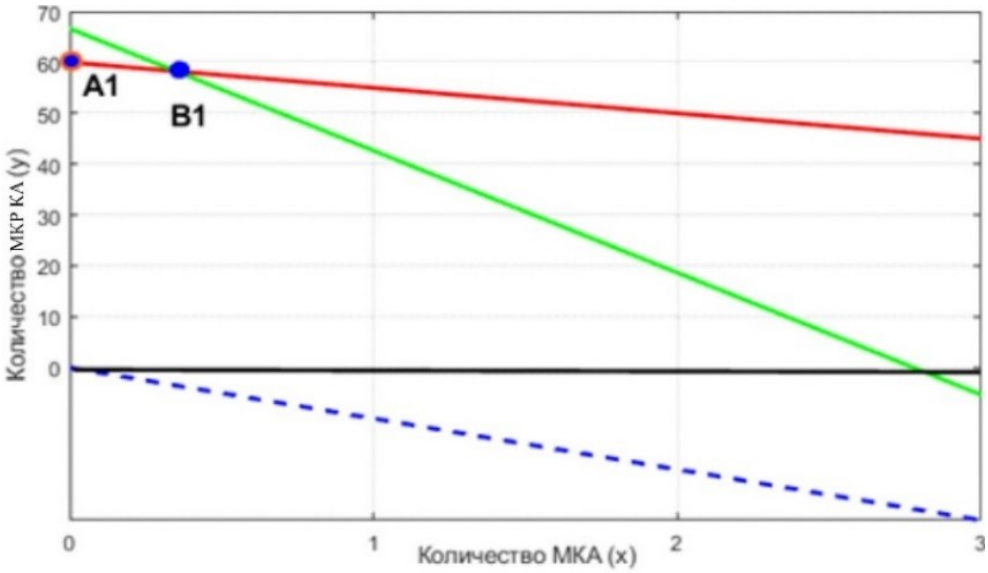
Таблица 3 – Оценивание чувствительности результата к изменению ограничений по количеству РН и стоимости ОГ

№ п/п	Точка	*x*	*y*	Производ., об/сут.	Стоимость, млрд руб.	Расход РН, ед.	Дополнительные ресурсы
1	А1	0	60	600 (+15%)	9 (-10%)	6 (+20%)	доп. 1 РН (+20%)
2	D2	1	45	550 (+6%)	10,35 (+5,5%)	5	доп. 1 млрд. (+10%)

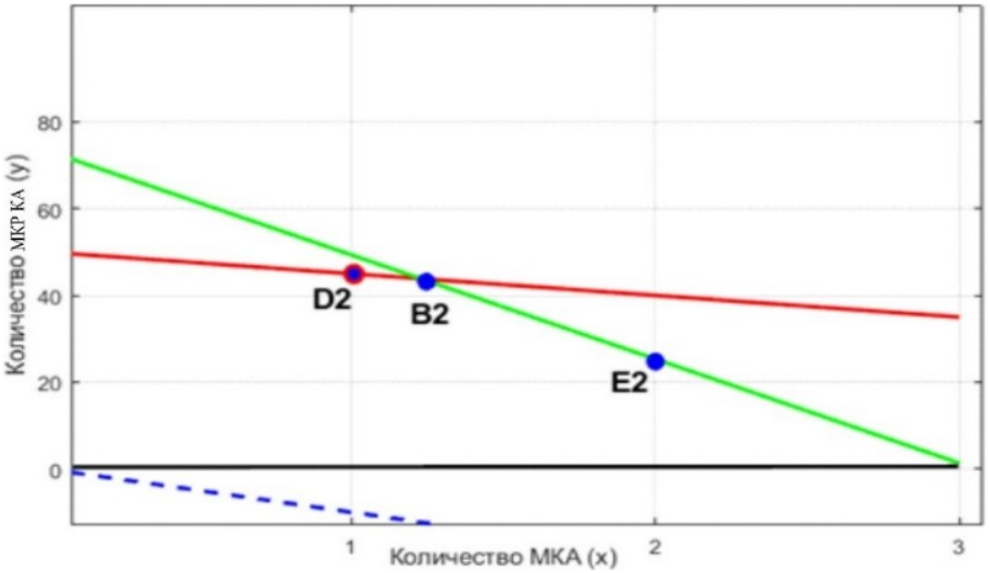
Также в работе выполнялись исследования с учётом требований к гарантийному сроку активного существования (САС) КА (таблица 1).

В интервале 6 лет итоговая производительность ОГ, выраженная в количестве отснятых объектов, будет определяться зависимостью вида $Z_2 = 2 \cdot 365 \cdot 100x + 6 \cdot 365 \cdot 10y \rightarrow max$, т.е. на координатной плоскости необходимо построить

$$y = -30x. \quad (4)$$



а) при дополнительной РН



б) при дополнительных затратах

Рисунок 4 – Изменения области допустимых решений целевой функции

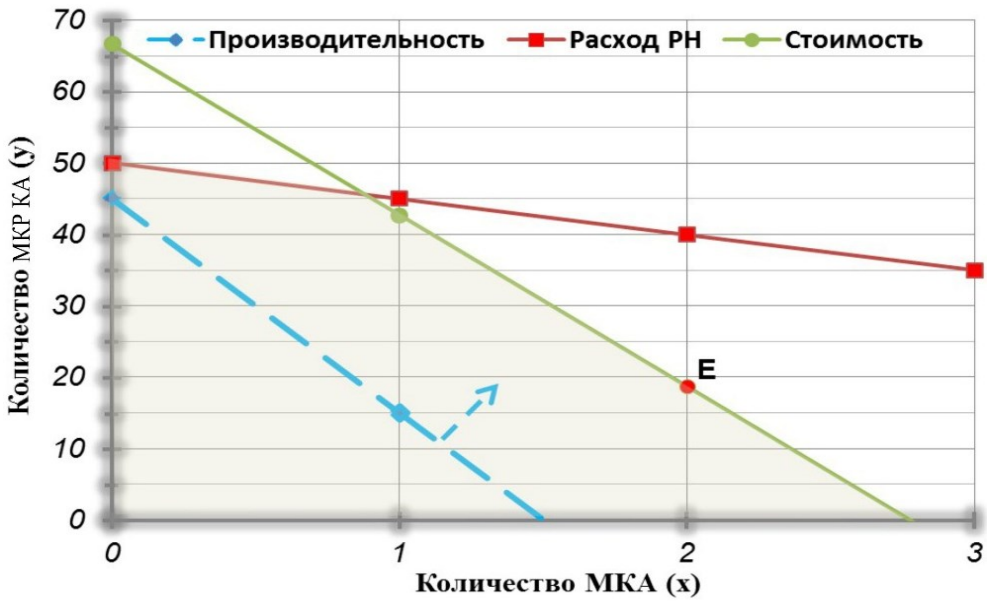


Рисунок 5 – Состав ОГ КА (2 МКА, 18 МКР КА)
при максимизации итоговой производительности через 6 лет

На рисунке 5 представлена прежняя область допустимых решений с новой прямой производительности ОГ Z_2 в течение 6 лет. Как видно, требуемый состав ОГ КА включает 2 МКА и 18 МКР КА (т. Е в таблице 2). Полученное решение снижает количество потребных РН, что повышает оперативность разворачивания такой ОГ, и за весь период эксплуатации ОГ КА будет отснято $Z_2 = 6 \cdot 365 \cdot 100 \cdot 2 + 2 \cdot 365 \cdot 10 \cdot 18 = 569400$ объектов.

Необходимо отметить, что МКР КА, имеющие САС в принятой постановке задачи 2 года, выполняют дополняющую роль, реализуя остаток финансовых ресурсов после изготовления максимально доступного числа МКА с большим САС. Да, без запуска МКР КА производительность орбитальной группировки значительно ниже (т. Е в таблице 2). Но наблюдаемый от использования МКР КА фактически 2-кратный прирост производительности Z2 будет только на относительно коротком интервале эксплуатации ОГ. Таким образом, в условиях неопределённости момента возникновения ЧС необходимо задавать дополнительные требования к минимально допустимому значению производительности ОГ, которая должна обеспечиваться малыми КА с длительным САС. В предельном случае от использования МКР КА целесообразно отказаться. Однако приращению численного состава орбитальной группировки из

малых КА будет соответствовать и значительный рост её стоимости. На рисунке 4 показана т. Е2, которой соответствует фактически двукратный рост стоимости орбитальной группировки. Для данной ОГ обеспечивается минимальная производительность не менее 500 объектов в сутки в течение 6 лет за счёт использования 5 малых КА.

Результатами моделирования являются следующие выводы:

1. Применение геометрического метода линейного программирования позволяет в первом приближении обосновывать рациональный состав ОГ, состоящей из КА разного типа.

2. Достижение существенного увеличения производительности создаваемой ОГ, включающей МКР КА, или даже снижения её стоимости возможно путем более полной загрузки РН и некоторого перераспределения финансирования, в частности, на изготовление и пуск дополнительной РН. Другими словами, в области, близлежащей к ОДР, возможно наличие лучшего решения. Эффективность применения ОГ, включающей в свой состав МКР КА, может быть значительно повышена использованием РН СЛК.

3. Максимальная производительность ОГ достижима при включении в её состав КА нескольких типов, количественно подобранных в соответствии с ситуационными ограничениями. При этом состав ОГ существенно зависит от требования к гарантийному САС. Для решения задачи оперативного разворачивания орбитальной группировки в изредка возникающих ЧС целесообразно применение ОГ, состоящей преимущественно или полностью из МКР КА. По мере увеличения значения требуемого гарантийного САС целесообразность включения в состав ОГ МКР КА снижается и определяется либо причинами неэкономической природы, либо стоимостью предполагаемого ущерба от рассматриваемых ЧС.

В заключение необходимо отметить, что решение задачи обоснования состава ОГ КА является сложным и наукоемким. В рамках данной публикации рассмотрен лишь частный случай указанной задачи, ограниченный принятыми исходными данными и допущениями. Комплексное её решение позволит не только достоверно оценить стоимость запуска и эксплуатации ОГ КА, но и ответить на главный вопрос: «В каком направлении двигаться отечественной отрасли ракетостроения?».

Список использованных источников

1. Лисов И.А. «Куайчжоу» – новый космический аппарат и новый носитель // Новости космонавтики. 2013. №11(370). Т.23. – С. 49-52.

2. Аверкиев Н.Ф., Хасанов А.Ю. Групповое выведение космических аппаратов наблюдения с целью развертывания орбитальной группировки со слабой баллистической структурой // Сб. трудов XXXV Межведомственной научно-технической конференции космодрома «Плесецк». Мирный: 1 ГИК Минобороны России, 2019. – С. 151-156.

3. Горбулин В.И., Евдокимов Р.А., Фадеев А.С. Обоснование стратегии развертывания и восполнения орбитальных систем космических аппаратов на основе комплексной оптимизации управления организационно-технической системой // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2012. №3. Т.128. – С. 35-40.

4. Мосин Д.А., Абдурахимов А.А., Ляшевский А.В. Обоснование направлений применения низкоорбитальных многоспутниковых группировок сверхмалых космических аппаратов // Сб. трудов XXXV Межведомственной научно-технической конференции космодрома «Плесецк». Мирный: 1 ГИК Минобороны России, 2019. – С. 106-109.

5. Мосин Д.А., Абдурахимов А.А., Ляшевский А.В. Перспективные направления применения многоспутниковых группировок на основе малых космических аппаратов в интересах Минобороны России // Материалы 54-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского (Калуга, 17-19 сентября 2019 г.). Ч.1. Калуга: Политоп, 2019. – С. 51-55.

6. Фатеев В.Ф. Космическая оборона зарубежных стран на технологиях малых космических аппаратов // Сб. трудов ВКА им. А.Ф. Можайского. 2013. №640. – С. 140-156.

7. Фатеев В.Ф. Большие возможности при малых размерах // Воздушно-космическая оборона. 2013. №6. – С. 24-34.

8. Башляев Н.А., Николаев А.Ю., Дуга В.В., Мосин Д.А. Опыт и перспективы запусков отечественных малых космических аппаратов с космодрома «Плесецк» // Космическая техника и технология. 2021. №3(34). – С. 69-82.

9. Наумочкин Д.В., Петухов И.А., Полуян М.М. Анализ тенденций развития сверхмалых космических аппаратов // Вооружение и экономика. 2019. №4(50). – С. 37-43.

10. Мосин Д.А., Дуга В.В. Методика оценки возможностей инфраструктуры испытательного космодрома по запуску малых космических аппаратов с целью наращивания возможностей национальной орбитальной группировки // Наукоемкие технологии в космических исследованиях земли. 2018. №5. Т.10. – С. 37-44.

11. Клюшников В.Ю. Ракеты-носители сверхлегкого класса: ниша на рынке пусковых услуг и перспективные проекты // Воздушно-космическая сфера. 2019. №3(100). – С. 58-71.