

УДК 621.7.01

URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/arise/nateeu/1095.html>

## ОПТИМИЗАЦИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ МНО- ГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРСОНАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА НИЗКИХ ОРБИТАХ

Д.М. Захаров

dmitrii.zakharov.a@gmail.com

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

Рассмотрен процесс моделирования и оптимизации орбитальной группировки низкоорбитальных спутников «Гонец-М1» с использованием программного комплекса Satellite Tool Kit версии 14 (STK 14). Представлена методика баллистического построения и анализа покрытия обслуживаемой территории при различных конфигурациях орбитальных плоскостей и числе космических аппаратов. На основе моделирования оценены параметры, обеспечивающие максимальное покрытие как глобальной зоны, так и территории Российской Федерации. Установлено, что конфигурация 4×7 с оптимальными углами смещения орбитальных параметров обеспечивает высокую эффективность покрытия при минимальном числе спутников. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании спутниковых систем связи стратегического и гражданского назначения.

**Ключевые слова:** орбитальная группировка, космический аппарат, баллистическое построение, «Гонец-М1», зоны радиовидимости, конфигурация спутников, Satellite Tool Kit

**Введение.** В современных условиях обеспечение глобальной спутниковой связи и передачи данных приобретает все большее значение для решения задач как гражданского, так и стратегического характера. Системы малых спутников, такие как орбитальная группировка (ОГ) «Гонец-М1», позволяют реализовать устойчивую и оперативную связь на всей территории Земли, включая труднодоступные и удаленные регионы.

Для эффективного проектирования и эксплуатации подобных группировок необходимо проводить баллистические расчеты и моделирование различных конфигураций орбитальных построений. Одним из мощных инструментов для такой работы служит программный комплекс Satellite Tool Kit версии 14 (STK 14), позволяющий моделировать движение спутников, зону их покрытия и анализировать характеристики группировки.

Цель данного исследования — анализ различных структур ОГ «Гонец-М1» с использованием комплекса STK 14, подбор оптимальных параметров построения (углов смещения плоскостей и спутников), а также оценка степени покрытия как глобальной зоны, так и территории Российской Федерации при различных конфигурациях и числе космических аппаратов.

**Методика расчета параметров орбитальной группировки в программе Satellite Tool Kit (STK 14).** Для выполнения баллистического построения и оценки характеристик ОГ «Гонец-М1» была использована программная среда STK 14. Расчеты проводились в соответствии с представленной ниже методикой.

1. *Создание сценария моделирования.* В STK создается новый сценарий с заданным временем моделирования не менее 24 ч (для учета суточного движения спутников), с выбором системы координат и всемирного координированного времени (Coordinated Universal Time — UTC).

2. *Параметризация орбит.* Орбиты спутников задаются как круговые с высотой около 1 500 км и наклонением  $82,5^\circ$ , соответствующим типовой орбите ОГ «Гонец-М1». Число орбитальных плоскостей выбирается в соответствии с рассматриваемой конфигурацией (4×7, 4×8, 4×9, 5×7, 5×8). Угол смещения плоскостей RAAN ( $\Delta\varphi$ ) и угол межплоскостного смещения КА ( $\Delta\iota$ ) задаются в соответствии с таблицами расчетов [1].

3. *Создание спутников.* RAAN каждой плоскости отличается на заданный угол  $\Delta\varphi$ . Спутники относительно двух соседних плоскостей смещаются по аргументу широты на угол  $\Delta\iota$ , обеспечивая равномерное покрытие.

4. *Добавление наземных объектов и зон обслуживания.* В сценарий добавляются объекты покрытия — либо вся поверхность Земли (для оценки глобального покрытия), либо область интереса (территория РФ), которая задается вручную или с помощью формата shapefile [2].

5. *Моделирование покрытия.* Каждому спутнику назначается сенсор с круговой зоной радиовидимости при угле места  $10^\circ$ . В разделе Coverage Definition настраивается сетка покрытия с заданным шагом, после чего рассчитывается доступность объектов покрытия от всех сенсоров спутниковой группировки.

6. *Анализ результатов.* Комплекс STK позволяет получить количественные метрики покрытия: процент покрытия территории, временные разрывы, длительность недоступности, среднее и максимальное число спутников, одновременно покрывающих точку. Также визуализируются зоны встречного движения и разрывов покрытия.

7. *Оптимизация параметров.* Путем варьирования параметров  $\Delta\varphi$  и  $\Delta\iota$  определяется конфигурация с наибольшим средним покрытием территории. Проводится сравнительный анализ вариантов группировок по покрытию глобальной зоны и территории РФ [3].

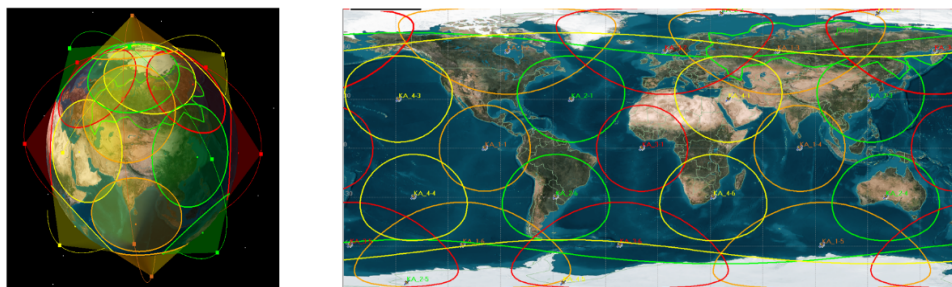
Данная методика позволяет обоснованно выбрать параметры построения ОГ с учетом заданного угла места и обеспечить требуемый уровень покрытия территории при минимальном числе космических аппаратов.

**Выбор структуры орбитальной группировки.** При проведении баллистических расчетов для управления космическим аппаратом (КА) учитываются следующие факторы, под действием сил которых орбита функционирования эволюционирует [4]:

- сопротивление атмосферы;
- влияние гравитационного поля Земли;
- влияние гравитационного поля Луны и Солнца.

Пример баллистического построения представлен на рис. 1. Баллистическое построение было выполнено со следующими параметрами:

- угол места —  $10^\circ$ ;
- ОГ — 4 плоскости по 7 КА в каждой;
- высота орбиты — 1500 км;
- наклонение —  $82,5^\circ$ ;
- период обращения — примерно 115 мин;
- количество витков — 12,5 витков/сут.



**Рис. 1.** Баллистическое построение ОГ «Гонец-М1»

Предварительный анализ показывает, что ОГ  $4 \times 7$  с зоной радиовидимости при угле места  $10^\circ$  обеспечивает покрытие территории земного шара, близкое к 100 % (рис. 2). Отметим, что наибольшие разрывы покрытия возникают при встречном движении КА в ОГ, когда КА одной плоскости на восходящем движении, а КА другой плоскости — на нисходящем движении [5].

Выделим восходящее движение КА на рис. 2 — это КА № 11, 21, 22, 32, 42, 43 (центральная часть рис. 2). Затем обозначим нисходящее движение КА — правая и левая части рис. 2 (КА № 46, 15, 25, 36, 35). Зона встречного движения КА возникает между КА № 46 и 11 с разрывом покрытия на северной широте  $40^\circ$ . Зона встречного движения между КА № 42 и 15 имеет разрыв покрытия в южном полушарии [6].

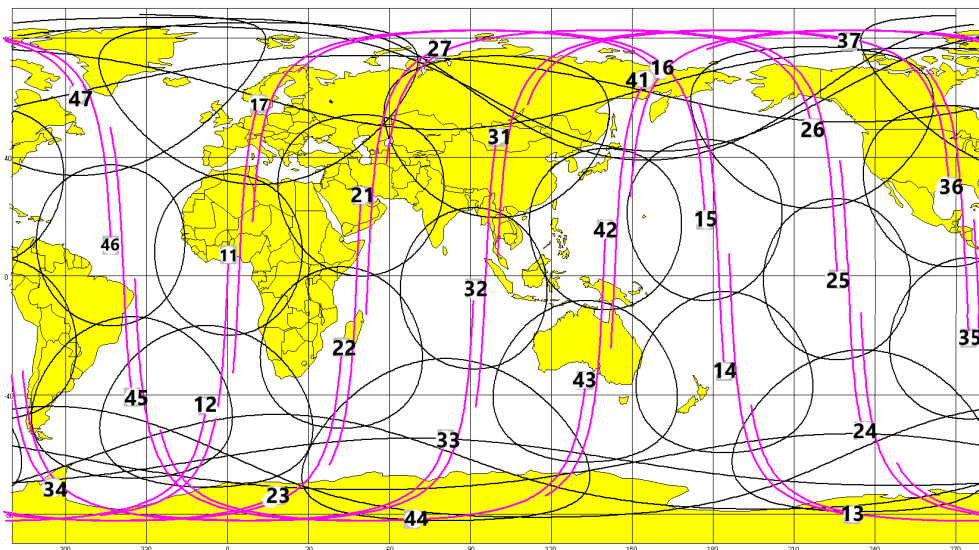


Рис. 2. Трасса движения семи КА в четырех орбитальных плоскостях

Движение КА в четырех орбитальных плоскостях с северного полюса показано на рис. 3. На рисунке использованы следующие обозначения: орбитальные плоскости, направления восходящего и нисходящего движения КА, зоны встречного движения КА.

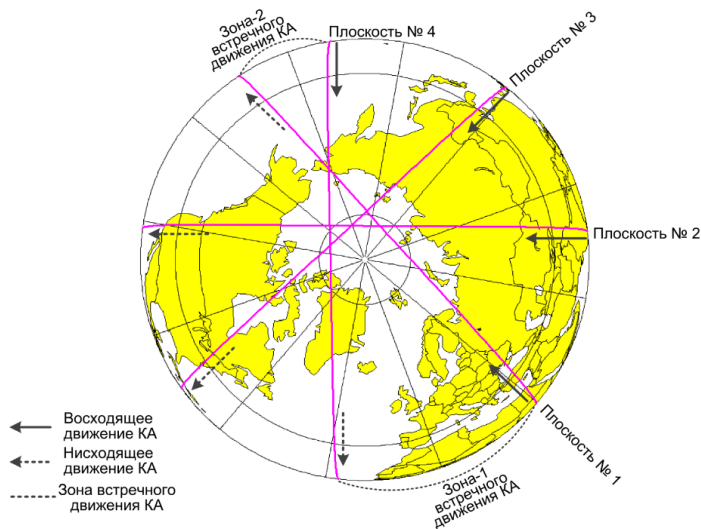


Рис. 3. Движение КА в районе северного полюса

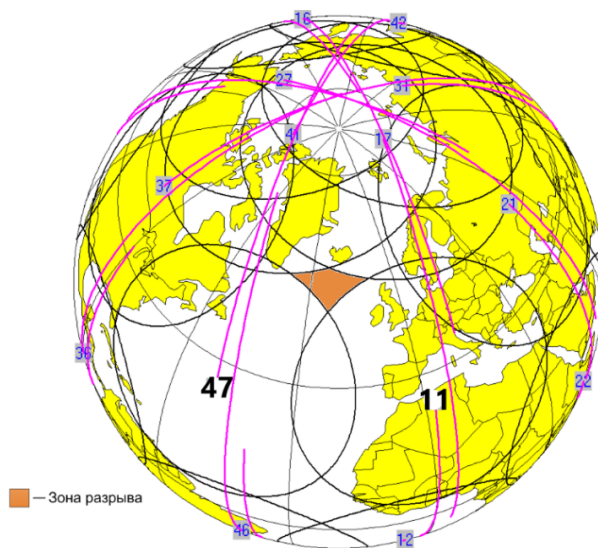


Рис. 4. Разрыв покрытия выше северной широты  $40^\circ$

При штатном составе ОГ 4×7 встречное движение происходит между плоскостями № 1 и 4. Именно при движении КА в этих плоскостях возникает разрыв покрытия выше северной и южной широт  $40^\circ$ .

На рис. 4 показана зона разрыва, образованная между плоскостями № 1 и 4 (КА № 47 и 11) ОГ 4×7 при угле места  $10^\circ$  [7].

Далее оптимизируем ОГ 4×7 по углам  $\Delta\varphi$  и  $\Delta\lambda$ , проанализировав изменение целевых характеристик ОГ при увеличении числа КА, и рассмотрим влияние наклона орбиты на целевые характеристики. Критерием оптимизации построения ОГ будем считать максимальное покрытие обслуживаемой территории.

**Оптимизация построения ОГ.** Рассмотрим влияние параметров  $\Delta\varphi$  и  $\Delta\lambda$  на площадь обслуживаемой территории. Будем выбирать эти параметры построения ОГ 4×7 в зависимости от процента покрытия обслуживаемой территории. В рассматриваемом случае возможны два варианта обслуживаемой территории [8]:

- обслуживание потребителей в глобальной зоне;
- обслуживание потребителей на территории РФ.

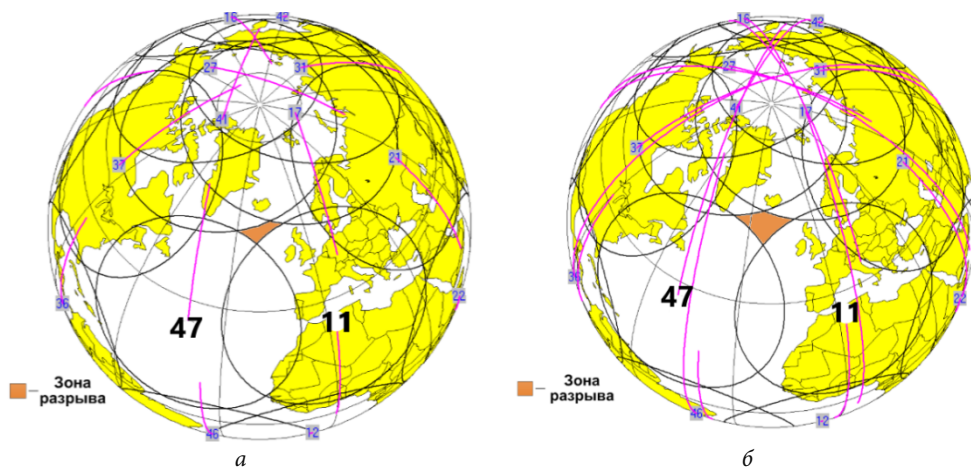
Выберем параметры построения ОГ 4×7 для двух вариантов обслуживаемой территории. Критерий выбора оптимального построения ОГ 4×7 — это наилучшее покрытие заданной территории (средний процент покрытой территории).

Средняя площадь покрываемой территории в зависимости от зоны обслуживания представлена в табл. 1.

**Таблица 1.** Процент покрытия территории ОГ 4×7 при угле места 10°

| Δφ, град | Δи, град | Покрывтие территории РФ, % | Покрывтие глобальной зоны, % |
|----------|----------|----------------------------|------------------------------|
| 49,7     | 19,2     | 99,986                     | 97,294                       |
| 46,2     | 20,0     | 99,838                     | 98,367                       |

Первый вариант параметров ОГ ( $\Delta\phi = 49,7^\circ$ ,  $\Deltaи = 19,2^\circ$ ) оптимален для территории РФ, второй вариант ( $\Delta\phi = 46,2^\circ$ ,  $\Deltaи = 20,0^\circ$ ) — для глобальной зоны. Для сравнения на рис. 5 покажем разрывы покрытия для двух вариантов ОГ 4×7.



**Рис. 5.** Зона покрытия ОГ 4×7:

*а* — разрыв при угле смещения плоскостей  $49,0^\circ$ ; *б* — разрыв при угле смещения плоскостей  $46,2^\circ$

Как видно на рисунке, в обоих случаях построение ОГ 4×7 при угле места  $10^\circ$  не обеспечивает гарантированное 100%-ное покрытие территории РФ. Углы смещения плоскостей  $49,0^\circ$  и  $46,2^\circ$  приводят к перераспределению разрывов в зоне встречного движения и зоне регулярного движения (на рис. 5 между КА № 47 и 11).

**Увеличение числа КА в ОГ.** В данном разделе будем рассматривать зависимость процента покрытия глобальной зоны от количества штатных КА в ОГ до 8 и 9 КА в орбитальной плоскости. В табл. 2 представлены параметры ОГ после оптимизации в зависимости от количества КА в ОГ и зоны обслу-

живания. Оптимизация параметров ОГ проводилась для глобальной зоны при угле места  $10^\circ$ .

**Таблица 2. Параметры ОГ для разного количества КА**

| ОГ  | $\Delta\phi$ , град | $\Delta\lambda$ , град | Покрытие глобальной зоны, % | Покрытие РФ, % |
|-----|---------------------|------------------------|-----------------------------|----------------|
| 4×7 | 47,5                | 20,0                   | 98,209                      | 99,927         |
| 4×8 | 46,4                | 16,8                   | 99,761                      | 99,967         |
| 4×9 | 46,8                | 13,0                   | 99,992                      | 99,984         |

По данным таблицы видно, что при угле места  $10^\circ$  полное покрытие глобальной зоны приближается к 100 %. Полностью закрыть зону встречного движения КА не удастся. Это говорит о том, что число КА в ОГ достигло предела эффективного наполнения ОГ при использовании четырех орбитальных плоскостей [9]. Далее можно перейти к построению ОГ при использовании пяти орбитальных плоскостей.

Рассмотрим ОГ 5×7, состоящую из 35 КА, и ОГ 5×8, состоящую из 40 КА. Для этих ОГ в табл. 3 получены результаты покрытия глобальной зоны при угле места  $10^\circ$ . Данные табл. 3 показывают, что при угле места  $10^\circ$  полное покрытие территории РФ и глобальной зоны обеспечивается при ОГ 5×8 (всего 40 КА).

**Таблица 3. Параметры ОГ для разного количества КА**

| ОГ  | $\Delta\phi$ , град | $\Delta\lambda$ , град | Покрытие глобальной зоны, % | Покрытие РФ, % |
|-----|---------------------|------------------------|-----------------------------|----------------|
| 5×7 | 38,0                | 21,5                   | 99,941                      | 99,971         |
| 5×8 | 37,8                | 13,8                   | 100                         | 100            |

С учетом требования [10] на космический комплекс о том, что ОГ должна состоять из четырех орбитальных плоскостей, а также минимизации стоимости космической системы в целом принимаем ОГ 4×7.

**Заключение.** В ходе выполнения работы была разработана методика моделирования ОГ «Гонец-М1» в программной среде STK 14. Проведен комплексный анализ различных конфигураций построения группировки, включая варианты с четырьмя и пятью орбитальными плоскостями, при различном числе КА в каждой из них.

По результатам моделирования установлено, что при использовании четырех орбитальных плоскостей (ОГ 4×7) и оптимальных углах смещения  $\Delta\phi$

и  $\Delta i$  можно достичь почти полного покрытия территории РФ и высокой степени покрытия глобальной зоны.

С учетом требований к числу плоскостей и экономических факторов оптимальным вариантом для построения ОГ «Гонец-М1» признается конфигурация 4×7, обеспечивающая высокую эффективность при минимально необходимом числе КА.

## Литература

- [1] *Satellite Tool Kit (STK) 14. User's Manual*. Analytical Graphics Inc., 2020, 968 p.
- [2] Vance J. *STK Coverage Analysis: Techniques for Advanced Satellite Network Design*. AGI Technical Series, 2018.
- [3] Кузовников А.В., Тестоедов Н.А., Агуреев В.А. Проблемы развития низкоорбитальной многофункциональной системы персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М». *Сибирский аэрокосмический журнал*, 2013, т. 14, № 6, с. 158–163.
- [4] Валов М.В., Головков В.В., Тарлецкий И.С. и др. Модернизация орбитальной группировки малых космических аппаратов многофункциональной системы персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М». *Решетневские чтения*, 2016, т. 1, с. 618–619. EDN: XEAHFF
- [5] Жаров А. Многофункциональная система персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М»: состояние и перспективы развития. *Технологии и средства связи*, 2013, № 6–2 (99), с. 72–78. EDN: RSUJJV
- [6] Матов Н.В. Анализ состояния российской группировки спутниковой связи на низких круговых орбитах. *Синтез науки и образования как инструмент решения глобальных проблем современности. Междунар. науч.-практ. конф.: сб. ст.* Уфа, ООО ОМЕГА САЙНС, 2025, с. 35–39. EDN: NGKVSR
- [7] Семериков Е.Р., Порываев А.С. Способы повышения скорости передачи информации в системе спутниковой связи «Гонец-Д1М». *Инновационная наука*, 2023, № 5–1, с. 39–40. EDN: RVKSQD
- [8] Esipenko A.A. Modernization of the small satellites constellation of the multi-functional personal communication system “Gonets-D1M”. *Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации*, 2017, № 16, с. 334–336. EDN: ZDUSFX
- [9] Данилюк А.Ю., Ревнивых С.Г., Тестоедов Н.А. ГЛОНАСС — стратегический ресурс России. *Сибирский аэрокосмический журнал*, 2013, т. 14, № 6, с. 17–23.
- [10] Немытова Е.В., Белова А.А., Шилов А.К. Системы спутниковой связи. *Теория и практика современной науки*, 2016, № 4 (10), с. 514–519.

**Поступила в редакцию 02.06.2025**



**Захаров Дмитрий Михайлович** — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Васильева Татьяна Владимировна, старший преподаватель «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация. E-mail: vtv64@mail.ru

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Захаров Д.М. Оптимизация баллистического построения многофункциональной системы персональной спутниковой связи и передачи данных с космических аппаратов на низких орбитах. *Политехнический молодежный журнал*, 2026, № 02 (103). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/arise/nateeu/1095.html>

## OPTIMIZATION OF BALLISTIC DEPLOYMENT FOR A MULTIFUNCTIONAL SYSTEM OF PERSONAL SATELLITE COMMUNICATION AND DATA TRANSMISSION FROM LOW EARTH ORBIT SPACECRAFT

D.M. Zakharov

dmitrii.zakharov.a@gmail.com

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

This article discusses the process of modeling and optimizing the orbital constellation of low Earth orbit satellites “Gonets-M1” using the STK 14 software suite. A methodology is presented for ballistic deployment and analysis of service area coverage under various orbital plane configurations and numbers of spacecraft. Based on simulation results, parameters were evaluated that ensure maximum coverage of both global zones and the territory of the Russian Federation. It was established that a 4×7 configuration with optimal orbital parameter offsets provides high coverage efficiency with a minimal number of satellites. This work can be applied in the design of satellite communication systems for both strategic and civilian purposes.

**Keywords:** orbital constellation, spacecraft, ballistic deployment, “Gonets-M1”, radio visibility zones, satellite configuration, Satellite Tool Kit

***Received 02.06.2025***

**Zakharov D.M.** — student of Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Vasilieva T.V., Senior Lecturer of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. E-mail: vtv64@mail.ru

**Please cite this article in English as:**

Zakharov D.M. Optimization of ballistic deployment for a multifunctional system of personal satellite communication and data transmission from low earth orbit spacecraft. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal*, 2026, no. 02 (103). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/arise/nateeu/1095.html>