

УДК 519.8

doi: 10.53816/23061456\_2024\_11–12\_38

**МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕН ПРОЛЕТОВ КОСМИЧЕСКИХ  
АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,  
ДВИЖУЩИХСЯ ПО КРУГОВЫМ ОРБИТАМ НАД ЗОНОЙ ЭКСТРЕННОГО  
ОПОВЕЩЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ**

**MODEL FOR DETERMINING FLIGHT TIMES OF EARTH REMOTE SENSING  
SPACECRAFT MOVING IN CIRCULAR ORBITS OVER THE EMERGENCY  
PUBLIC WARNING AREA**

*Д-р техн. наук Е.П. Минаков, канд. техн. наук М.А. Александров, А.В. Мищеряков,  
канд. техн. наук А.М. Зубачев*

*D.Sc. E.P. Minakov, Ph.D. M.A. Aleksandrov, A.V. Mishcheryakov, Ph.D. A.M. Zubachev*

*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского*

В статье рассматривается вопрос определения времен пролетов орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, движущихся по круговым орбитам, над зоной экстренного оповещения населения (территорией, подверженной риску возникновения быстро развивающихся во времени и пространстве опасных природных явлений и техногенных процессов, представляющих непосредственную угрозу жизни и здоровью находящихся на ней людей). В рамках решения задачи разработан алгоритм определения времен пролета орбитальной группировки, выполнены вычислительные эксперименты, получены пессимистические оценки максимального числа пролетов заданной орбитальной группировки космических аппаратов и установлены временные разрывы в наблюдаемости зоны экстренного оповещения. В основе алгоритма и модели лежит графо-аналитический метод исследования движения космических аппаратов с применением основных теорем сферической тригонометрии.

**Ключевые слова:** зона экстренного оповещения населения, наземный подвижный объект, время пролета орбитальной группировки.

The article considers the issue of determining the flight times of the orbital constellation of Earth remote sensing spacecraft moving in circular orbits over the emergency warning zone of the population (the territory at risk of the occurrence of dangerous natural phenomena and technogenic processes rapidly developing in time and space, posing an immediate threat to the life and health of people on it). As part of solving the problem, an algorithm for determining the flight times of the orbital constellation was developed, computational experiments were performed, pessimistic estimates of the maximum number of flights of a given orbital constellation of spacecraft were obtained, and time gaps in the observability of the emergency warning zone were established. The algorithm and model are based on a graph-analytical method for studying the motion of spacecraft using the basic theorems of spherical trigonometry.

**Keywords:** emergency public warning area, ground mobile object, orbital group flyby time.

## Введение

В Российской Федерации ежегодно происходит большое количество чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера (пожары, наводнения, утечки компонентов топлива) приводящие как к жертвам среди мирного населения так и к ущербу различному имуществу. Для предотвращения жертв и ущерба необходимо своевременное проведение спасательных работ в полном объеме. Успешное проведение спасательных работ достигается:

- своевременной организацией и непрерывным ведением разведки (всех видов и средств), с добыванием ею достоверных данных к установленному сроку;
- быстрым вводом формирований в очаги ЧС для выполнения задач;
- высоким профессионализмом и психологической стойкостью личного состава;
- знанием и строгим соблюдением личным составом правил и мер безопасности при выполнении работ;
- заблаговременным изучением командирами формирований особенностей выполнения работ на объектах [1].

Спасение людей при чрезвычайных ситуациях — это действия по эвакуации людей из зоны, где имеется вероятность воздействия на них опасных факторов чрезвычайных ситуаций в безопасную зону. Спасательные работы включают:

- разведку (доразведку) маршрутов движения и участков работ;
- локализацию и тушения пожаров на маршрутах движения и участках работ;

– розыск пострадавших и извлечение их из поврежденных и горящих зданий, загазованных, затопленных и задымленных помещений, завалов;

– вывоз (вывод) населения из опасных мест (зон экстренного оповещения) в безопасные районы [1].

Определение данных для маршрутизации и планирования движения наземных подвижных объектов (организованных групп осуществляющих вывоз или вывод населения), должно осуществляться с применением всех видов средств наблюдения в том числе с использованием космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), с целью постоянного мониторинга развития ЧС и маршрутов эвакуации. Требуется определение времен пролет над участками путей наземных подвижных объектов (НПО). В связи с тем, что для подавляющего числа КА ДЗЗ орбиты могут считаться круговыми, это позволяет использовать элементы сферической тригонометрии для определения времен их пролетов над участками путей НПО и делает актуальным разработку и апробацию соответствующей модели.

## Постановка задачи

Рассмотрим три конструктивно разных типа КА ДЗЗ, применяемых по областям расположенным на поверхности Земли [2, 3, 6]:

1) при требуемой ориентации и переориентации оси визирования аппаратуры, реализуемое на КА, оснащенных оптико-электронной аппаратурой (рис. 1, а);

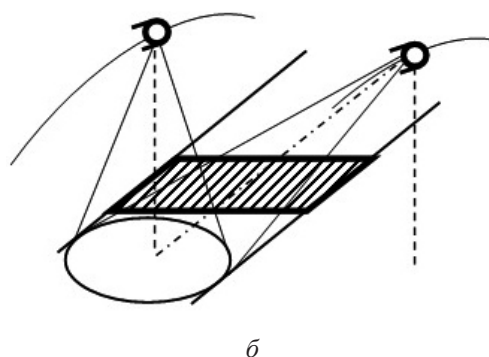
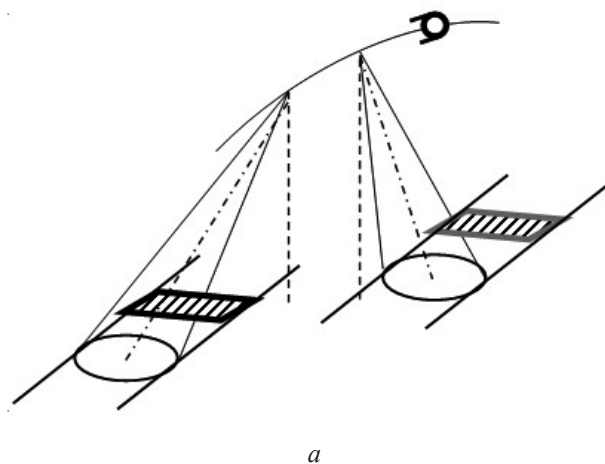


Рис. 1. Применение разнотипных КА ДЗЗ

2) при постоянной ориентации оси визирования аппаратуры в Надир, реализуемое на КА с радиолокационной аппаратурой (рис. 1, б);

3) при постоянной ориентации оси визирования аппаратуры по углу крена, реализуемое на КА с радиолокационной аппаратурой (рис. 1, б).

Расчет углового размера зоны обнаружения (ЗО) КА ДЗЗ может быть осуществлен по универсальной формуле (рис. 2) [6, 10]:

$$\varphi_{3j} = \pi / 2 - (\gamma_j + \beta_j) - \arccos \frac{R_3 + H_j}{R_3 \cdot \sin(\gamma_j + \beta_j)},$$

где  $\gamma_j$  — половина угла ЗО аппаратуры ДЗЗ  $\gamma_j = \text{const}$ ;

$\beta_j$  — половина угла крена аппаратуры ДЗЗ ( $\beta_j = \text{var}$  для КА первого типа;  $\beta_j = 0^0$  для КА второго типов;  $\beta_j \neq 0^0 = \text{const}$  для КА третьего типа).

Рис. 2, а соответствует КА первого и второго типов, рис. 2, б — КА первого и третьего типов.

В том случае, если задается линейный размер «кадра» КА ДЗЗ, соответствующий ширине мгновенной полосы обзора —  $L$ , пересчет его в угловой размер при использовании сферической модели поверхности Земли с радиусом  $R_3$  для всех типов КА может быть осуществлен по формуле:

$$\varphi_3 = L / (2 \cdot R_3).$$

Задача определения времен пролетов КА ДЗЗ, движущихся по круговым орбитам, над

участком пути НПО имеет следующую формулировку.

Пусть заданы (рис. 3):

1) участок пути НПО, моделируемый ортодромией с исходной точкой (ИТ) —  $A(\psi_A, \lambda_A, T_A)$  и конечной точкой (КТ) —  $B(\psi_B, \lambda_B, T_B)$ , где  $\psi_A$  — широта точки А в Гринвичской системе координат,  $\lambda_A$  — долгота точки А в Гринвичской системе координат,  $T_A$  — московское декретное время начала движения НПО из точки А;  $\psi_B, \lambda_B$  — аналогичные параметры для точки Б;  $T_B$  — время окончания движения НПО в точке Б [3, 11];

2) группировка КА ДЗЗ:

— общее количество КА —  $M$ ;

— параметры движения каждого  $j$ -го КА по круговой орбите —  $B_j = \langle H_j, i_j, L_{oj}, t_{oj} \rangle$ ,

где  $H_j$  — высота полета;  $i_j$  — наклонение орбиты;  $L_{oj}$  — долгота восходящего узла орбиты на начальном витке в Гринвичской системе координат;  $t_{oj}$  — московское декретное время пролета восходящего узла орбиты на начальном витке:  $t_{oj} \geq T_A$  и  $t_{oj} - T_A = \text{min}$ ;

— технические характеристики (ТХ) по каждому  $j$ -го КА —  $A_j = \langle \gamma_j, \beta_j \rangle$ , где  $\gamma_j$  — угол полураствора ЗО бортовой аппаратуры ДЗЗ;  $\beta_j$  — предельный угол крена оси визирования бортовой аппаратуры ДЗЗ;

3) долготы —  $L_{nj}$  и времена пролетов КА —  $t_{nj}$  восходящих узлов орбит на интервале времени  $[T_A, T_B]$ ;

— пусть моделирование движения  $j$ -го КА ДЗЗ осуществляется в рамках Кеплеровой теории с гравитационной постоянной Земли —  $K_3 = 398600,44 \text{ км}^3/\text{с}^2$  для ее сферической поверхности с радиусом  $R_3 = 6371 \text{ км}$  при рав-

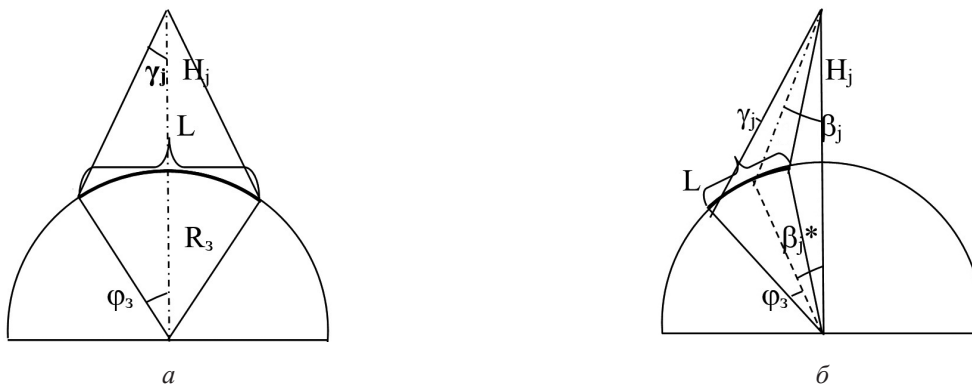


Рис. 2. Зоны обнаружения КА ДЗЗ

номерном вращении Земли вокруг своей оси с угловой скоростью  $\omega_3 = 7,2921150 \cdot 10^{-5}$  1/с [4];

– по указанным исходным данным при принятых допущениях требуется определить времена пролетов каждого  $j$ -го КА ДЗЗ над участком пути НПО в Зените —  $t_{nj}^{нз}$  и соответствующие времена и окончания начала обзора  $t_{nj}^{нн}$  и  $t_{nj}^{нк}$ .

### Алгоритм определения времен пролетов КА ДЗЗ, движущихся по круговым орбитам, над участком пути НПО

Пусть методом наклонных проекций по каждому  $j$ -му КА ДЗЗ определены долготы левой и правой границ наклонных проекций на экватор Земли  $\lambda_{лj}^в$  и  $\lambda_{пj}^в$  для восходящих ветвей и  $\lambda_{лj}^н$  и  $\lambda_{пj}^н$  для нисходящих ветвей траектории [5].

Пусть угловой размер ортодромии пути НПО не превосходит  $\pi$ .

Для определения  $t_{nj}^{нз}$ ,  $t_{nj}^{нн}$  и  $t_{nj}^{нк}$  может быть использован алгоритм, включающий в себя следующие этапы:

1) определение углового размера ортодромии пути НПО —  $s_{AB}$  по теореме косинусов для сферических треугольников [9] (рис. 4):

$$\cos s_{AB} = \sin \psi_A \cdot \sin \psi_B + \cos \psi_A \cdot \cos \psi_B \cdot \cos(\lambda_A - \lambda_B);$$

2) вычисление углового размера дуги — продолжения ортодромией пути и дугой экватора Земли —  $s_1$  двойным применением правила Непера [5, 9] (рис. 5, 6)

$$\sin \alpha = \sin \psi_A / \sin s_1;$$

$$\operatorname{ctg} s_1 = (\sin \psi_B / \sin \psi_A - \cos s_{AB}) / \sin s_{AB};$$

3) расчет угла между ортодромией пути НПО и дугой экватора Земли —  $\alpha$ ;

$$\sin \alpha = \sin \psi_A / \sin s_1;$$

4) определение дуги экватора Земли между точкой пересечения продолжения ортодромией пути экватора Земли и меридианом точки А —  $\Delta \lambda_1$  по правилу Непера (рис. 3):

$$\begin{cases} \sin \Delta \lambda_1 = \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \psi_A; \\ \operatorname{tg} \Delta \lambda_1 = \cos \alpha / \operatorname{ctg} s_1; \end{cases}$$

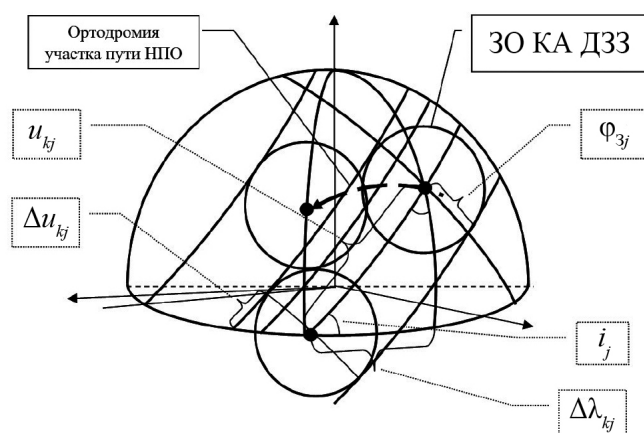


Рис. 3. Параметры покрытия точек А и Б ЗО КА ДЗЗ

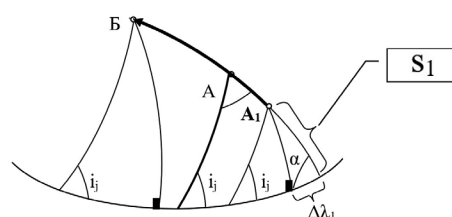


Рис. 4. К определению  $s_{AB}$ ,  $\alpha$ ,  $s_1$

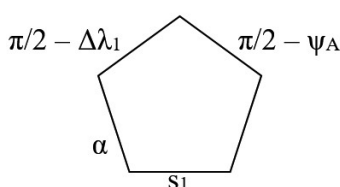


Рис. 5. Пятиугольник Непера для  $s_1$

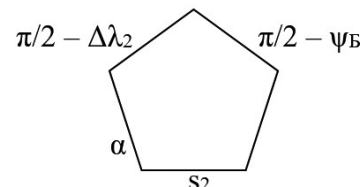


Рис. 6. Пятиугольник Непера для  $s_2$

5) вычисление долготы точкой пересечения продолжения ортодромией пути экватора Земли и меридианом точки А —  $\lambda^\alpha$

$$\lambda^\alpha = \lambda_A + \Delta\lambda_1;$$

6) расчет углового размера дуги между точкой пересечения продолжения ортодромией пути экватора Земли и меридианом точки А и долготой пролета  $j$ -го КА ДЗЗ восходящего узла орбиты на  $n$ -м витке:

$$\Delta\lambda_{nj}^\alpha = \lambda^\alpha - L_{nj};$$

7) определение угла между ортодромией участка пути и ортодромией между восходящим узлом орбиты и точкой пересечения ее ортодромии участка пути  $j$ -го КА ДЗЗ по теореме косинусов для сферических треугольников [5, 9] —  $A_1$ :

$$\cos A_1 = -\cos i_j \cdot \cos \alpha + \sin i_j \cdot \sin \alpha \cdot \cos \Delta\lambda_{nj}^\alpha;$$

8) расчет центрального угла отклонения оси визирования для КА первого и третьего типов (рис. 2, а):

$$\beta_j^* = \pi/2 - \beta_j - \arccos((H_j + R_3)/R_3 \cdot \sin \beta_j);$$

9) вычисление углового размера ортодромии между восходящим узлом орбиты и точкой пересечения ее ортодромии участка пути  $j$ -го КА ДЗЗ по теореме синусов для сферических треугольников —  $u_{\Lambda nj}$  [5, 8, 9]:

а) при ориентации оси визирования в Надир

$$\sin u_{\Lambda nj} = \sin \alpha \cdot \sin \Delta\lambda_{nj}^\alpha / \sin A_1;$$

б) при ориентации оси визирования под углом  $\beta_j$  для прямого наклонения  $j$ -го КА ДЗЗ (рис. 7, а, 8):

$$\sin \Delta\beta_j = \operatorname{ctg} i_j \cdot \operatorname{tg} \beta_j;$$

— при ориентации оси визирования вправо по направлению полета КА ДЗЗ

$$u_{\Lambda nj}^{\text{ПП}} = u_{\Lambda nj} - \Delta\beta_j;$$

— при ориентации оси визирования влево по направлению полета КА ДЗЗ

$$u_{\Lambda nj}^{\text{ЛП}} = u_{\Lambda nj} + \Delta\beta_j;$$

в) при ориентации оси визирования под углом  $\beta_j$  для обратного наклонения  $j$ -го КА ДЗЗ (рис. 7, б, 9):

$$\sin \Delta\beta_j = -\operatorname{ctg} i_j \cdot \operatorname{tg} \beta_j$$

— при ориентации оси визирования вправо по направлению полета КА ДЗЗ

$$u_{\Lambda nj}^{\text{ПО}} = u_{\Lambda nj} + \Delta\beta_j;$$

— при ориентации оси визирования влево по направлению полета КА ДЗЗ

$$u_{\Lambda nj}^{\text{ЛО}} = u_{\Lambda nj} - \Delta\beta_j;$$

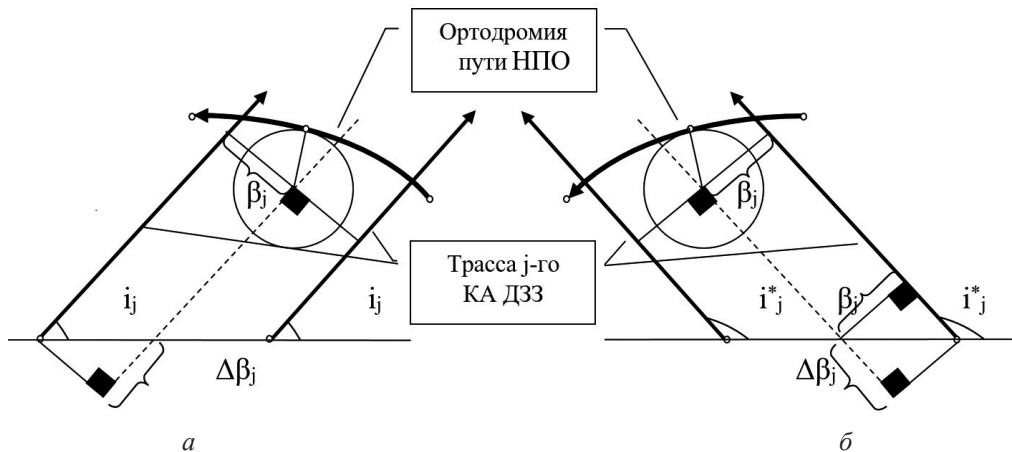


Рис. 7. Ориентация оси визирования КА ДЗЗ

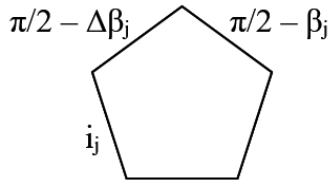


Рис. 8. Пятиугольник Непера для  $\Delta\beta_j$

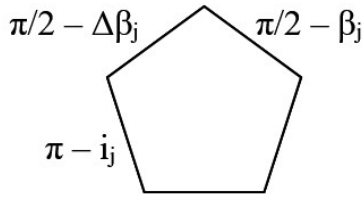


Рис. 9. Пятиугольник Непера для  $\Delta\beta_j$  для обратного наклонения  $j$ -го КА ДЗЗ

10) расчет периода обращения  $T_j$ :

$$T_j = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\{(R_3 + H_j)^3 / K_3\}};$$

11) определение времени движения  $j$ -го КА ДЗЗ от восходящего узла орбиты до точки пролета над ортодромией пути НПО в Зените —  $\Delta t_{\Lambda nj}$ :

а) при ориентации оси визирования в Надир

$$\Delta t_{\Lambda nj} = (T_j \cdot u_{\Lambda nj}) / (2 \cdot \pi);$$

б) при ориентации оси визирования под углом  $\beta_j$  для прямого наклонения  $j$ -го КА ДЗЗ:

– при ориентации оси визирования вправо по направлению полета КА ДЗЗ:

$$\Delta t_{\Lambda nj} = (T_j \cdot u_{\Lambda nj}^{\text{пр}}) / (2 \cdot \pi);$$

– при ориентации оси визирования влево по направлению полета КА ДЗЗ:

$$\Delta t_{\Lambda nj} = (T_j \cdot u_{\Lambda nj}^{\text{лп}}) / (2 \cdot \pi);$$

в) при ориентации оси визирования под углом  $\beta_j$  для обратного наклонения  $j$ -го КА ДЗЗ:

– при ориентации оси визирования вправо по направлению полета КА ДЗЗ:

$$\Delta t_{\Lambda nj} = (T_j \cdot u_{\Lambda nj}^{\text{по}}) / (2 \cdot \pi);$$

– при ориентации оси визирования влево по направлению полета КА ДЗЗ:

$$\Delta t_{\Lambda nj} = (T_j \cdot u_{\Lambda nj}^{\text{ло}}) / (2 \cdot \pi);$$

12) вычисление московского декретного времени пролета точки Зенита —  $\Delta t_{\Lambda nj}$ :

$$t_{\Lambda nj} = t_{nj} + \Delta t_{\Lambda nj};$$

13) расчет половины углового размера 30  $j$ -го КА ДЗЗ —  $\Phi_{3j}$ :

$$\Phi_{3j} = \pi / 2 - (\gamma_j + \beta_j) - \arccos \frac{R_3 + H_j}{R_3 \cdot \sin(\gamma_j + \beta_j)};$$

14) определение времени движения  $j$ -го КА ДЗЗ по дуге соответствующего углового размера —  $\Delta t_{\Phi j}$ :

$$\Delta t_{\Phi j} = (T_j \cdot \Phi_{3j}) / (2 \cdot \pi);$$

15) вычисление времени начала обзора участка пути НПО  $j$ -м КА ДЗЗ —  $t_{nj}^{\text{нп}}$ :

$$t_{nj}^{\text{нп}} = t_{\Lambda nj} - \Delta t_{\Phi j};$$

16) расчет времени окончания обзора участка пути НПО  $j$ -м КА ДЗЗ —  $t_{nj}^{\text{пк}}$ :

$$t_{nj}^{\text{пк}} = t_{\Lambda nj} + \Delta t_{\Phi j};$$

17) определение продолжительности обзора участка пути НПО  $j$ -м КА ДЗЗ —  $t_n^{\text{пк}}$ :

$$\Delta t_{nj} = 2 \cdot \Delta t_{\Phi j}.$$

В связи с тем, что скорость полета  $j$ -го КА ДЗЗ по круговой орбите —  $V_{\text{кр}j}$  существенно выше максимальной скорости движения НПО по участку пути —  $V_{\text{нпо}}^{\text{по}}$  ( $V_{\text{кр}j} \gg V_{\text{нпо}}^{\text{по}}$ ) [2, 10] уместно положить, что:

– на интервале от начальной точки касания трассой КА ДЗЗ ортодромии до пролета им точки Зенита НПО всегда будет наблюдаем с КА ДЗЗ;

– на интервале от пролета КА ДЗЗ точки Зенита до конечной точки касания трассой КА ДЗЗ НПО не будет наблюдаем с КА ДЗЗ.

### Пример определения времен пролетов КА ДЗЗ, движущихся по круговым орбитам, над участком пути НПО

Пусть круговыми считаются орбиты КА ДЗЗ, для которых относительный эксцентриситет —  $e_j \leq 10^{-2}$  [5]. В соответствии с этим можно выявить группировку, состоящую из 43 КА, оснащенных различной аппаратурой ДЗЗ (табл. 1).

Как видно из данных табл. 1 орбиты всех КА ДЗЗ могут считаться круговыми и, следовательно, может быть эффективно применен метод наклонных проекций [6].

По параметрам движения и ТХ может быть выделено 16 типов таких КА (табл. 1). По каждому из них были рассчитаны средняя высота круговой орбиты и среднее наклонение, определены соответствующая максимальная и минимальная высота (табл. 2).

Пусть продолжительность применения КА ДЗЗ по участку пути НПО составляет одни сутки, то есть  $T_k - T_n = 86400$  с.

Значения  $\gamma_j$  и  $\beta_j = \text{const}$  для всех КА и координаты ИТ и КТ участка пути НПО приведены в табл. 3.

Для решения поставленной задачи в MSExcel был разработан специальный программно-моделирующий комплекс. С его использованием по каждому типу КА ДЗЗ методом наклонных проекций для значений, соответствующих максимальной высоте и наклонению, были рассчитаны пространственно-временные параметры наклонных проекций: долгота левой границы наклонной проекции (ДЛГ НП), долгота правой границы наклонной проекции (ДПГ НП), угловой размер наклонной проекции (УР НП), время начала существования наклонной проекции (ВНС НП), время окончания существования наклонной проекции (ВОС НП), продолжительность существования наклонной проекции (ПС НП) для восходящих и нисходящих ветвей траекторий этих КА (табл. 4).

Результаты расчетов числа пролетов над участком пути для всех КА ДЗЗ приведены в табл. 5.

Из данных табл. 5 видно, что на рассматриваемом интервале при принятых исходных данных по параметрам движения и ТХ число покрытий участка пути для КА ДЗЗ изменяется от 0 до 2, а общее число пролетов группировки, состоящей из 43 КА, составляет 28 раз. Последнее число позволяет оценить величину — сред-

нее время, в течение которого над путем пролетает хотя бы один КА ДЗЗ, которое в этом случае составляет величину в 3085,714 с = 51,42857 мин и которое может служить характеристикой пути НПО.

Из данных табл. 5 видно, что максимальное число пролетов одиночного КА ДЗЗ над ортодромией пути при принятых исходных данных может быть равным двум. Это позволяет сформировать пессимистическую оценку максимального числа пролетов, равную в этом случае 86, что, в свою очередь, позволяет оценить осредненное время, в течение которого над путем пролетает хотя бы один КА ДЗЗ из группировки и которое составляет величину в 1004,651 с = 16,74419 мин, что также может служить характеристикой пути НПО.

Таблица 1

Группировка 43 КА, оснащенных различной аппаратурой ДЗЗ

| j     | $L_{oj}$ | Высота перигея | Высота апогея | $e_j$    | $i_j$ | $T_j$  |
|-------|----------|----------------|---------------|----------|-------|--------|
|       | град     | км             | км            |          | град  | мин    |
| 1 тип |          |                |               |          |       |        |
| 1     | 12       | 624            | 643           | 1,36E-03 | 97,9  | 97,4   |
| 2     | 4        | 622            | 645           | 1,64E-03 | 97,9  | 97,4   |
| 2 тип |          |                |               |          |       |        |
| 3     | 43       | 501            | 519           | 1,31E-03 | 97,5  | 94,8   |
| 4     | 74       | 491            | 508           | 1,24E-03 | 97,5  | 94,8   |
| 5     | 83       | 495            | 510           | 1,09E-03 | 97,5  | 94,6   |
| 6     | 121      | 500            | 519           | 1,38E-03 | 97,5  | 94,8   |
| 3 тип |          |                |               |          |       |        |
| 7     | 0        | 334            | 347           | 9,69E-04 | 96,92 | 91,34  |
| 4 тип |          |                |               |          |       |        |
| 8     | 0        | 622            | 623           | 7,15E-05 | 97,9  | 97,2   |
| 9     | 0        | 622            | 623           | 7,15E-05 | 97,9  | 97,2   |
| 10    | 0        | 622            | 623           | 7,15E-05 | 97,9  | 97,2   |
| 11    | 0        | 622            | 623           | 7,15E-05 | 97,9  | 97,2   |
| 12    | 0        | 621            | 648           | 1,93E-03 | 97,9  | 97,2   |
| 13    | 0        | 621            | 622           | 7,15E-05 | 97,8  | 97,1   |
| 5 тип |          |                |               |          |       |        |
| 14    | 0        | 800            | 800           | 0,00E+00 | 98,6  | 100,87 |
| 6 тип |          |                |               |          |       |        |
| 15    | 0        | 480            | 480           | 0,00E+00 | 97,3  | 94     |

Таблица 1 (продолжение)

| $j$    | $L_{oj}$ | Высота перигея | Высота апогея | $e_j$    | $i_j$  | $T_j$  |
|--------|----------|----------------|---------------|----------|--------|--------|
|        | град     | км             | км            |          | град   | мин    |
| 7 тип  |          |                |               |          |        |        |
| 16     | 0        | 1101           | 1107          | 4,01E-04 | 122,99 | 107,35 |
| 17     | 0        | 1068           | 1107          | 2,61E-03 | 123    | 107    |
| 18     | 0        | 1066           | 1081          | 1,01E-03 | 123    | 106,7  |
| 19     | 0        | 1086           | 1087          | 6,71E-05 | 123    | 106,7  |
| 8 тип  |          |                |               |          |        |        |
| 20     | 0        | 1047           | 1057          | 6,74E-04 | 106    | 106,2  |
| 21     | 0        | 710            | 729           | 1,34E-03 | 98,3   | 99,1   |
| 10 тип |          |                |               |          |        |        |
| 22     | 0        | 683            | 683           | 0,00E+00 | 98,1   | 98,42  |
| 23     | 0        | 669            | 690           | 1,49E-03 | 98,16  | 98,35  |
| 24     | 0        | 681            | 683           | 1,42E-04 | 98,1   | 98     |
| 25     | 0        | 679            | 682           | 2,13E-04 | 98,1   | 98,37  |
| 26     | 0        | 676            | 698           | 1,56E-03 | 98,2   | 98,5   |
| 27     | 0        | 679            | 696           | 1,20E-03 | 98,2   | 98,5   |
| 11 тип |          |                |               |          |        |        |
| 28     | 0        | 522            | 540           | 1,30E-03 | 97,5   | 95,25  |
| 12 тип |          |                |               |          |        |        |
| 29     | 0        | 366            | 416           | 3,70E-03 | 73,6   | 92,7   |
| 30     | 0        | 395            | 419           | 1,77E-03 | 74     | 92,7   |
| 13 тип |          |                |               |          |        |        |
| 31     | 0        | 535            | 552           | 1,23E-03 | 97,6   | 95,5   |
| 14 тип |          |                |               |          |        |        |
| 32     | 0        | 697            | 699           | 1,41E-04 | 98,2   | 98,7   |
| 33     | 0        | 678            | 691           | 9,21E-04 | 98,5   | 98,45  |
| 15 тип |          |                |               |          |        |        |
| 34     | 0        | 623            | 626           | 2,14E-04 | 97,9   | 97,2   |
| 35     | 0        | 615            | 617           | 1,43E-04 | 97,9   | 97,2   |
| 16 тип |          |                |               |          |        |        |
| 36     | 0        | 538            | 541           | 2,17E-04 | 97,6   | 95,4   |
| 37     | 0        | 550            | 557           | 5,06E-04 | 97     | 96     |
| 38     | 0        | 563            | 573           | 7,21E-04 | 96,9   | 96,02  |
| 39     | 0        | 468            | 505           | 2,70E-03 | 98,2   | 94,3   |
| 40     | 0        | 470            | 503           | 2,41E-03 | 98,19  | 94,34  |
| 41     | 0        | 473            | 496           | 1,68E-03 | 98,17  | 94,3   |
| 42     | 0        | 448            | 486           | 2,78E-03 | 98,16  | 94,4   |
| 43     | 0        | 474            | 502           | 2,04E-03 | 98,16  | 94,37  |

Таблица 2

Значения средней высоты круговой орбиты и среднего наклона и соответствующие им максимальные и минимальные высоты

| Тип КА ДЗЗ | Средняя высота | Максим. высота | Миним. высота | Среднее наклон. |
|------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|
| 0          | км             | км             | км            | град            |
| 1          | 633,5          | 633,5          | 633,5         | 97,9            |
| 2          | 505,375        | 510            | 499,5         | 97,5            |
| 3          | 340,5          | 340,5          | 340,5         | 96,92           |
| 4          | 624,3333       | 634,5          | 621,5         | 97,9            |
| 5          | 800            | 800            | 800           | 98,6            |
| 6          | 480            | 480            | 480           | 97,3            |
| 7          | 1087,875       | 1104           | 1073,5        | 122,99          |
| 8          | 1052           | 1052           | 1052          | 106             |
| 9          | 719,5          | 719,5          | 719,5         | 98,3            |
| 10         | 683,25         | 687,5          | 679,5         | 98,1            |
| 11         | 531            | 531            | 531           | 97,5            |
| 12         | 399            | 407            | 391           | 73,6            |
| 13         | 543,5          | 543,5          | 543,5         | 97,6            |
| 14         | 691,25         | 698            | 684,5         | 98,2            |
| 15         | 620,25         | 624,5          | 616           | 97,9            |
| 16         | 509,1875       | 568            | 467           | 97,6            |

Таблица 3

Координаты ИТ и КТ участка путей НПО

| $\gamma_j$ | $\beta_j$ | $\psi_{нт}$ | $\lambda_{нт}$ | $\psi_{кт}$ | $\lambda_{кт}$ | $T_{н}$ | $T_{к}$ |
|------------|-----------|-------------|----------------|-------------|----------------|---------|---------|
| град       | град      | град        | град           | град        | град           | с       | с       |
| 5          | 12        | 47,096      | 37,5471        | 47,222      | 39,72          | 3000    | 89400   |

Таблица 4

Рассчитанные значения пространственно-временных параметров наклонных проекций

| Тип<br>КА | Восходящая ветвь |           |           |           |           |           |
|-----------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|           | ДЛГ НП           | ДПГ НП    | УР НП     | ВНС НП    | ВОС НП    | ПС НП     |
|           | град             | град      | град      | с         | с         | с         |
| 1         | 47,570552        | 53,357207 | 5,7866544 | 2228,9889 | 88621,118 | 86392,129 |
| 2         | 47,3903          | 52,47188  | 5,081584  | 2249,323  | 88643,48  | 86394,15  |
| 3         | 47,10949         | 51,22926  | 4,119767  | 2272,594  | 88670,41  | 86397,82  |
| 4         | 47,56841         | 53,36073  | 5,792322  | 2249,323  | 88643,48  | 86394,15  |
| 5         | 47,99408         | 54,74132  | 6,747244  | 2228,989  | 88621,12  | 86392,13  |
| 6         | 47,23252         | 52,14197  | 4,90945   | 928,7314  | 87320,84  | 86392,11  |
| 7         | 82,60662         | 92,63778  | 10,03117  | 2249,323  | 88643,48  | 86394,15  |
| 8         | 56,07948         | 64,53533  | 8,455848  | 2095,067  | 88541     | 86445,94  |
| 9         | 47,8319          | 54,11435  | 6,282454  | 2201,889  | 88616,19  | 86414,3   |
| 10        | 47,789012        | 53,887627 | 6,0986147 | 2249,323  | 88643,475 | 86394,152 |
| 11        | 47,34538         | 52,54553  | 5,200158  | 2240,101  | 88647,16  | 86407,06  |
| 12        | 21,61243         | 26,02067  | 4,408236  | 2235,385  | 88628,97  | 86393,59  |
| 13        | 47,42969         | 52,70201  | 5,272317  | 2235,561  | 88645,04  | 86409,48  |
| 14        | 48,10153         | 54,26573  | 6,1642    | 2205,057  | 88619,21  | 86414,15  |
| 15        | 47,58984         | 53,32549  | 5,735652  | 2220,291  | 88631,83  | 86411,54  |
| 16        | 48,04542         | 53,46609  | 5,420665  | 2229,365  | 88640,14  | 86410,77  |
| тип<br>КА | Нисходящая ветвь |           |           |           |           |           |
|           | ДЛГ НП           | ДПГ НП    | УР НП     | ВНС НП    | ВОС НП    | ПС НП     |
|           | град             | град      | град      | с         | с         | с         |
| 1         | 216,11128        | 221,80407 | 5,6927881 | 859,72771 | 87251,857 | 86392,129 |
| 2         | 216,6743         | 221,6665  | 4,992212  | 914,2376  | 87308,39  | 86394,15  |
| 3         | 217,4792         | 221,516   | 4,036826  | 978,4266  | 87378,43  | 86400     |
| 4         | 216,6743         | 221,6665  | 4,992212  | 914,2376  | 87308,39  | 86394,15  |
| 5         | 216,1113         | 221,8041  | 5,692788  | 859,7277  | 87251,86  | 86392,13  |
| 6         | 216,9259         | 221,7481  | 4,822198  | 930,753   | 87322,84  | 86392,09  |
| 7         | 178,2923         | 187,7963  | 9,504003  | 952,9372  | 87204,83  | 86251,89  |
| 8         | 206,084          | 214,3552  | 8,2712    | 720,0531  | 87074,25  | 86354,19  |
| 9         | 215,5809         | 221,7651  | 6,184205  | 825,0058  | 87210,74  | 86385,73  |
| 10        | 215,72331        | 221,72481 | 6,0015027 | 838,99105 | 87225,627 | 86386,636 |
| 11        | 216,6549         | 221,7656  | 5,110708  | 906,6255  | 87297,54  | 86390,92  |
| 12        | 242,7161         | 247,3244  | 4,608379  | 996,9745  | 87381,63  | 86384,66  |
| 13        | 216,5313         | 221,7131  | 5,181815  | 901,3559  | 87291,9   | 86390,55  |
| 14        | 215,3742         | 221,4382  | 6,063991  | 835,3478  | 87221,23  | 86385,88  |
| 15        | 216,1196         | 221,7614  | 5,641819  | 866,1628  | 87254,65  | 86388,48  |
| 16        | 215,8337         | 221,1577  | 5,323998  | 892,3127  | 87281,56  | 86389,25  |

Таблица 5

Результаты расчетов числа пролетов всех КА ДЗЗ над участком путей

| Тип   | 1  |    | 2  |    |    |    | 3  | 4      |    |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|--------|----|
| $j$   | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8      | 9  |
| $N_j$ | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0      | 2  |
| Тип   | 4  |    |    |    | 5  | 6  | 7  |        |    |
| $j$   | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17     | 18 |
| $N_j$ | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 2  | 2      | 1  |
| Тип   | 7  | 8  | 9  | 10 |    |    |    |        |    |
| $j$   | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26     | 27 |
| $N_j$ | 2  | 1  | 1  | 1  | 0  | 2  | 0  | 0      | 2  |
| Тип   | 11 | 12 |    | 13 | 14 |    | 15 |        | 16 |
| $j$   | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35     | 36 |
| $N_j$ | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2      | 0  |
| Тип   | 16 |    |    |    |    |    |    |        |    |
| $j$   | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | $N=43$ |    |
| $N_j$ | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 1  | 0  | 28     |    |

### Заключение

Полученные оценки указывают на то, что в случае применения принятой группировки КА ДЗЗ с соответствующими параметрами движения и ТХ, на заданном интервале времени имеют место разрывы в наблюдаемости с их использованием пути НПО и, следовательно, существует принципиальная необходимость доразведки с помощью иных способов и средств с целью постоянного контроля состояния (наличия) маршрутов вывоза (выхода) населения из зон экстренного оповещения населения.

### Список источников

1. Гражданская оборона; под общ. ред. В.А. Пучкова; МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2016. 377 с.
2. Аверкиев Н.Ф., Власов Р.П., Богачев С.А. и др. Баллистические основы проектирования ракет-носителей и спутниковых систем: учебник. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017. 302 с.
3. Советский энциклопедический словарь; гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Сов. энциклопедия, 1988. 1600 с.

4. Инженерный справочник по космической технике. М.: Военное издательство МО СССР, 1969. 696 с.

5. Минаков Е.П., Александров М.А., Мищеряков А.В., Мищеряков С.В. Алгоритм определения параметров наклонных проекций точек на поверхности Земли для круговых орбит космических аппаратов // Труды МАИ. 2024. № 135. С. 1–34.

6. Баринов К.Н., Бурдаев М.Н., Мамон П.А. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 232 с.

7. Минаков Е.П., Мусиенко С.А., Шафигуллин И.Ш. Сборник основных терминов, понятий и определений по вопросам оценивания эффективности и моделирования применения специальных организационно-технических систем: учеб. пособие. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. 184 с.

8. Минаков Е.П., Александров М.А., Мищеряков А.В. Метод определения характеристик пролета орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли над пространственно-временными областями // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского, 2023. Вып. № 690. С. 121–134.

9. Мамон П.А., Половников В.И. Приложение теорем сферической тригонометрии к решению практических задач: учеб. пособие. Вып. 4. ВИКИ, 1973. 27 с.

10. Основы теории полета космических аппаратов; под ред. Г.С. Нариманова и М.К. Тихонова. М.: Машиностроение, 1972. 608 с.

11. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. Л.: ОГИЗ, 1946. 556 с.

12. Чернов А.А., Чернявский Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли. Лекции и упражнения. М.: Радио и связь, 2005. 200 с.

13. Глушенко А.А., Хохлов В.П. Алгоритм идентификации изменений и уточнения параметров движения техногенного объекта в околоземном космическом пространстве на основе радиолокационных измерений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Вып. 12. С. 164–170.

14. Минаков Е.П., Александров М.А., Мищеряков А.В. Модель расчета вероятности потенциально результативных пролетов космичес-

кого аппарата над заданным районом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 152–157.

15. Маштаков Я.В., Ткачев С.С. Построение углового движения спутника ДЗЗ при отслеживании маршрутов на поверхности Земли // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 20. 31 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-20> (дата обращения: 21.04.2024).

## References

1. Civil defense / Under the general editorship of V.A. Puchkov; the Ministry of Emergency Situations of Russia. M.: Federal State Budgetary Institution of the Russian Academy of Sciences (FC), 2016. 377 p.

2. Averkiev N.F., Vlasov R.P., Bogachev S.A. and others. Ballistic fundamentals of the design of launch vehicles and satellite systems: Textbook. St. Petersburg: A.F. Mozhaisky VKA, 2017. 302 p.

3. The Soviet Encyclopedic Dictionary / Chief editor A.M. Prokhorov. M.: Soviet Encyclopedia, 1988. 1600 p.

4. Engineering handbook of space technology. Military Publishing House of the USSR Ministry of Defense, 1969. 696 p.

5. Minakov E.P., Alexandrov M.A., Mishcheryakov A.V., Mishcheryakov S.V. Algorithm for determining the parameters of inclined projections of points on the Earth's surface for circular orbits of spacecraft // Proceedings of MAI. 2024. No 135. Pp. 1–34.

6. Barinov K.N., Burdaev M.N., Mamon P.A. Dynamics and the principles of building orbital systems of spacecraft. M.: Mashinostroenie, 1975. 232 p.

7. Minakov E.P., Musienko S.A., Shafigulin I.Sh. Collection of basic terms, concepts and definitions on the issues of evaluating the effective-

ness and modeling the use of special organizational and technical systems: A study guide. St. Petersburg: A.F. Mozhaisky VKA, 2012. 184 p.

8. Minakov E.P., Alexandrov M.A., Mishcheryakov A.V. A method for determining the characteristics of the flight of an orbital grouping of Earth remote sensing spacecraft over spatiotemporal regions // Proceedings of the A.F. Mozhaisky VKA, 2023. Issue No. 690. Pp. 121–134.

9. Mamon P.A., Polovnikov V.I. Application of spherical trigonometry theorems to solving practical problems: a textbook. Issue 4. WIKI, 1973. 27 p.

10. Fundamentals of the theory of spacecraft flight. Edited by G.S. Narimanov and M.K. Tikhonravov. M.: Mashinostroenie, 1972. 608 p.

11. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. Handbook of mathematics for engineers and students of higher education institutions. L.: OGIZ, 1946. 556 p.

12. Chernov A.A., Chernyavskiy G.M. Orbits of Earth remote sensing satellites. Lectures and exercises. Moscow: Radio and Communication, 2005. 200 p.

13. Glushchenko A.A., Khokhlov V.P. Algorithm of the changes identification and refinement of the man-made object motion parameters in the near-Earth space on the basis of the radar measurements (in Russian) // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2021. Vyp. 12. Pp. 164–170.

14. Minakov E.P., Alexandrov M.A., Mishcheryakov A.V. Model for calculating the probability of potentially effective spacecraft overflights over a given area // Izvestiya Tula State University. Technical Sciences. 2023. № 11. Pp. 152–157.

15. Mashtakov Y.V., Tkachev S.S. Construction of angular motion of a remote sensing satellite during tracking of routes on the Earth's surface // Preprints of M.V. Keldysh IPM. 2014. № 20. 31 p. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-20> (date of reference: 21.04.2024).