

УДК 528.88 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.48.58

## Космическая зональная съемка для определения скорости и ускорения подвижных объектов

**А. И. Бочарников**, *validacia2010@ntsomz.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**В. П. Коваленко**, *к. т. н., доцент, validacia2010@ntsomz.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**А. В. Коваленко**, *validacia2010@ntsomz.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**В. В. Тихонычев**, *к. т. н., с. н. с, validacia2010@ntsomz.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**А. В. Худяков**, *validacia2010@ntsomz.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** Рассмотрен способ определения параметров движения объектов по результатам космической зональной съемки. Предложена система уравнений для определения параметров движения при различных условиях движения (по плоскости, в трехмерном пространстве, при однократном и многократном наблюдениях). Скорости и ускорения подвижных объектов (транспортных средств и т. п.) определяются по измерениям взаимного положения зональных изображений на комплексированных материалах панхроматической и многоспектральной съемок (паншарпенинг) с учетом расположения оптико-электронных преобразователей спектральных каналов друг относительно друга в целевой съемочной аппаратуре. Сформирован признак определения направления движения объектов с использованием цветов зональных изображений. Разработаны алгоритмы расчета скорости и ускорения для случая прямолинейного движения объектов. Представлены результаты обработки реальных изображений.

**Ключевые слова:** скорость, ускорение объектов, признак направления движения, космическая съемка, паншарпенинг

## Space Zonal Survey to Determine the Speed and Acceleration of Moving Objects

**A. I. Bocharnikov**, *validacia2010@ntsomz.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**V. P. Kovalenko**, *Cand. Sci. (Engineering), associate professor, validacia2010@ntsomz.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**A. V. Kovalenko**, *validacia2010@ntsomz.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**V. V. Tikhonychev**, *Cand. Sci. (Engineering), senior Researcher, validacia2010@ntsomz.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**A. V. Khudyakov**, *validacia2010@ntsomz.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The paper considers a method for determining the motion parameters of moving objects based on the results of space zonal survey. A system of equations is proposed for determining the motion parameters under various conditions of motion of a moving object (on a plane, in three-dimensional space, and with a single and multiple observation). The speeds and accelerations of moving objects (vehicles, etc.) are determined by measuring the relative position of zonal images on complex materials of panchromatic and multispectral survey (pansharpening) taking into account the location of optoelectronic converters of spectral channels relative to each other in the target survey equipment. A feature for determining the direction of movement of moving objects using the colors of zonal images is formed. Algorithms for calculating the speed and acceleration for the case of rectilinear motion of objects are developed. The results of processing real images are presented.

**Keywords:** speed, acceleration of objects, indication of the direction of movement, space survey, pansharpening

## Введение

При дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) космическими комплексами (КК) одной из задач является определение параметров движения объектов для оценки загруженности дорог, интенсивности транспортного потока и др. Рассмотрим случай разновременной съемки объектов целевой аппаратурой (ЦА) в одном сеансе в различных спектральных диапазонах [1], по которым в том числе осуществляется комплексирование материалов съемки (паншарпенинг) с высоким разрешением (панхроматической) и многоспектральной съемки со средним разрешением [2].

На комплексированном изображении каждый неподвижный объект отображается однократно, а подвижный объект повторяется разными цветами в нескольких зонах комплексного изображения за счет съемки его разными каналами в различные моменты времени и отличия скорости его изображения от скорости изображения неподвижных объектов, что, с одной стороны, является артефактом, с другой — позволяет найти параметры движения объектов.

## Постановка задачи

Движение объекта относительно подстилающей поверхности происходит по некоторой траектории (рис. 1) с точками  $I, J, K, M$ , зафиксированными ЦА КК ДЗЗ (число точек определяется числом спектральных диапазонов). С поверхностью Земли связана прямоугольная система координат  $O_3X_3Y_3Z_3$ . Для каждого положения объекта

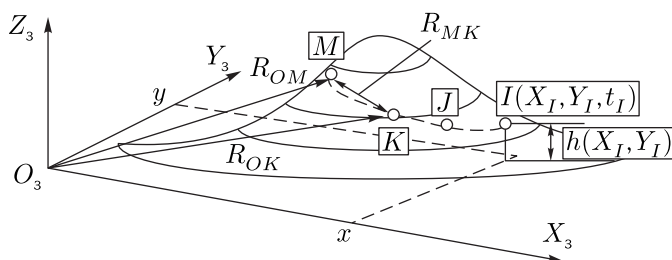


Рис. 1. Движение объекта относительно подстилающей поверхности происходит по некоторой траектории. Положение объекта в точках  $I, J, K, M$  обозначено знаком  $\circ$

известны его координаты  $X, Y, h(X, Y)$  и время съемки  $t$ . Подстилающая поверхность плоская или известна ее цифровая модель рельефа (ЦМР). Требуется найти скорости и ускорения подвижного объекта относительно подстилающей поверхности с использованием комплексированных материалов панхроматической и многоспектральной съемок.

## Алгоритм решения

С каждой точкой траектории связан радиус-вектор, проходящий через начало координат. Переход из предыдущей в последующую точку характеризуется вектором (участком траектории).

Например, для точек  $K$  и  $M$ :

$$\begin{cases} R_{OM} = (X_M, Y_M, h(X_M, Y_M)), \\ R_{OK} = (X_K, Y_K, h(X_K, Y_K)), \\ R_{MK} = R_{OM} - R_{OK}. \end{cases}$$

Пусть  $I$  — начальная точка движения. Тогда

$$\begin{cases} R_{JI} = F(V_I, A_I, t_J, t_I), \\ R_{KJ} = F(V_J, A_J, t_K, t_J), \\ R_{MK} = F(V_K, A_K, t_M, t_K), \end{cases} \quad (1)$$

где  $F(V_I, A_I, t_J, t_I)$  — функция, определяющая вектор (участок траектории)  $R_{JI}$ ;

$V_I$  и  $A_I$  — векторы скорости и ускорения движения подвижного объекта в точке  $I$ .

Система уравнений (1) может быть решена для различных условий движения подвижного объекта и космической съемки (по плоскости, в трехмерном пространстве, при однократном и многократном наблюдении).

В качестве измерителя координат подвижного объекта выступает ЦА КК ДЗЗ. Фотограмметрическая модель ЦА КК ДЗЗ представлена на рис. 2 [3].

Точка  $M$  области объектов проецируется в точку  $m$  фокальной плоскости. Координаты точки  $M$  определяются в системе координат  $O_3X_3Y_3Z_3$ , координаты точки  $m$  — в связанной с ЦА системе  $OX_{и}Y_{и}Z_{и}$ , плоскость  $OX_{и}Y_{и}$  которой расположена в фокальной плоскости, а ось  $OZ_{и}$  проходит через центр проектирования  $S$  целевой аппаратуры КК ДЗЗ.

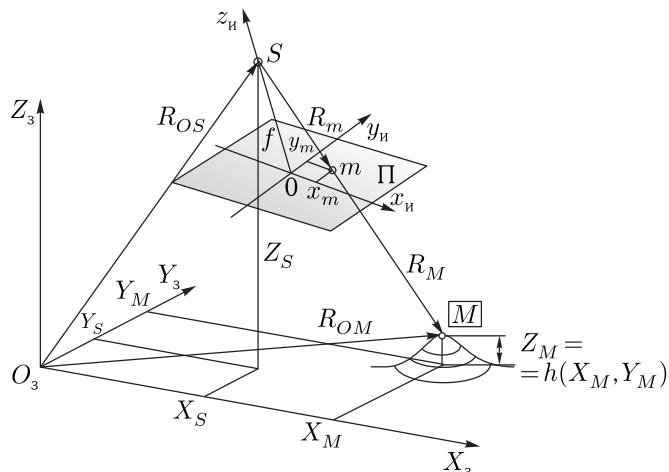


Рис. 2. Фотограмметрическая модель целевой съемочной аппаратуры

Связь координат точек  $M$  и  $m$  определяется системой уравнений (2):

$$\begin{cases} X_M = X_S + (Z_M - Z_S) \times \\ \quad \times \frac{c_{11} \cdot (x_m - x_0) + c_{12} \cdot (y_m - y_0) - c_{13} \cdot f}{c_{31} \cdot (x_m - x_0) + c_{32} \cdot (y_m - y_0) - c_{33} \cdot f}, \\ Y_M = Y_S + (Z_M - Z_S) \times \\ \quad \times \frac{c_{21} \cdot (x_m - x_0) + c_{22} \cdot (y_m - y_0) - c_{23} \cdot f}{c_{31} \cdot (x_m - x_0) + c_{32} \cdot (y_m - y_0) - c_{33} \cdot f}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $c_{11}, \dots, c_{33}$  — элементы матрицы направляющих косинусов, связывающих системы координат  $O_3 X_3 Y_3 Z_3$  и  $O X_n Y_n Z_n$  через углы разворота по тангажу, крену и курсу;

$f$  — эквивалентное фокусное расстояние комплексированного изображения, обычно соответствует фокусному расстоянию панхроматического изображения ЦА КК ДЗЗ;

$x_0, y_0$  — проекция точки  $S$  (рис. 2) на плоскость изображения  $O x_n y_n$  панхроматического канала ЦА КК ДЗЗ.

В дальнейшем рассматривается ЦА, установленная на космических аппаратах (КА), двигающихся по орбите с первой космической скоростью, формирующая изображения как строчная с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) видеосигнала (КК ДЗЗ «Ресурс-П») или кадровая с ВЗН (КК ДЗЗ типа «Канопус-В»).

По измерениям координат точек на изображении и элементам внешнего и внутреннего ориентирования ЦА КК ДЗЗ уравнения (2) можно найти

координаты точек подвижных объектов, затем по системе уравнений (1) — определить параметры движения подвижных объектов.

## Определение параметров при прямолинейном движении объектов

Для проверки возможности решения поставленной задачи рассмотрим случай определения скорости и ускорения по плановым комплексированным изображениям КК ДЗЗ «Ресурс-П» (ЦА «Геотон») [4] и КК ДЗЗ типа «Канопус-В» (синхронизированные панхроматическая съемочная система (ЦА ПСС) и многозональная съемочная система (ЦА МСС) [5,6] при прямолинейном движении подвижных объектов. Порядок формирования изображений в различных спектральных каналах ЦА позволяют представить рис. 3 и 4.

На рис. 5 представлены модели изображений.

Объекты на земной поверхности приведены по масштабу к их изображениям. Масштаб съемки определяется отношением фокусного расстояния ЦА к высоте съемки  $f/H$ . При создании цветного изображения объектов с подчеркнутыми деталями неподвижные объекты совмещаются, а подвижные объекты представляют собой зональные изображения, наложенные на изображения неподвижных объектов.

Взаимное расположение зональных изображений позволяет определить направление движения объекта и его параметры — скорость и ускорение.

Признаком наличия движения объекта в общем случае является наличие четырех изображений объекта на цветном изображении объектов с подчеркнутыми деталями. Направление движения совпадает с направлением от первоначально формируемого изображения подвижного объекта к изображениям в других зонах.

В зависимости от тона объекта в панхроматической зоне (светлого или темного) зональные изображения на объединенном изображении могут иметь различные цвета в соответствии с законами образования цветов (табл. 1). Примеры изображений представлены на рис. 8–10.

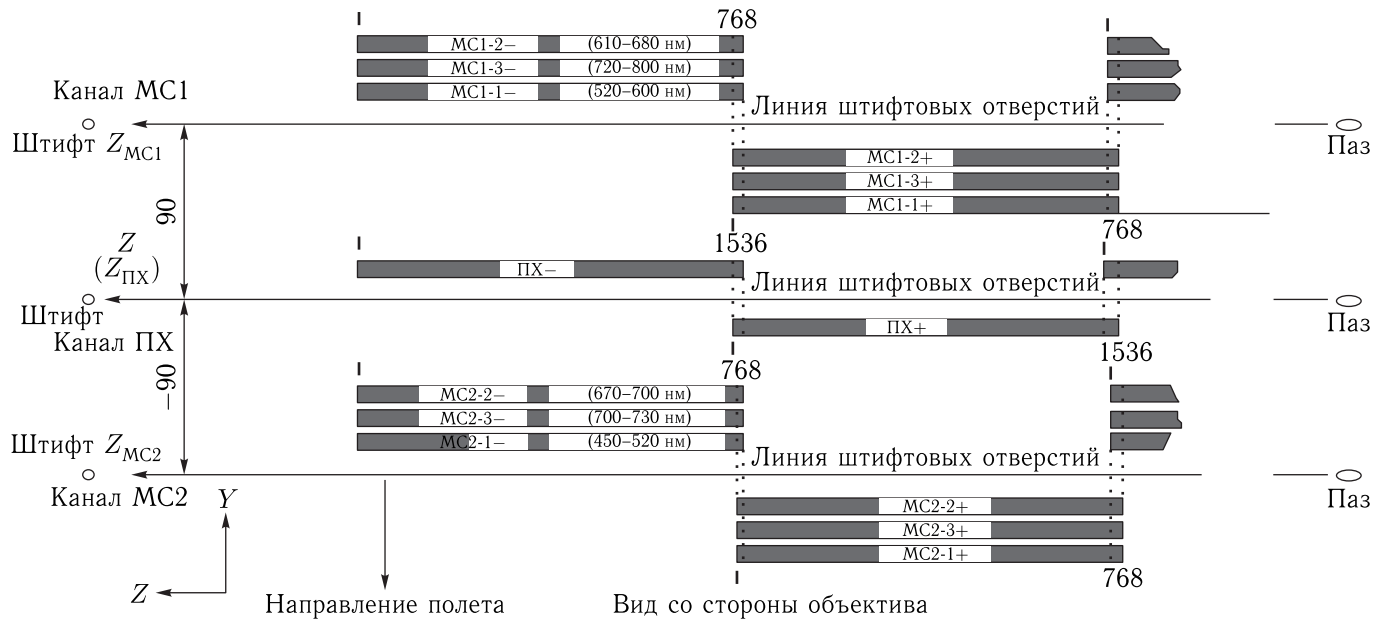


Рис. 3. Расположение ОЭП видимого излучения в фокальной плоскости ЦА «Геотон». Зоны чувствительности ОЭП: МС1-2 — красная, МС1-1 — зеленая, МС2-1 — синяя, ПХ — панхроматическая

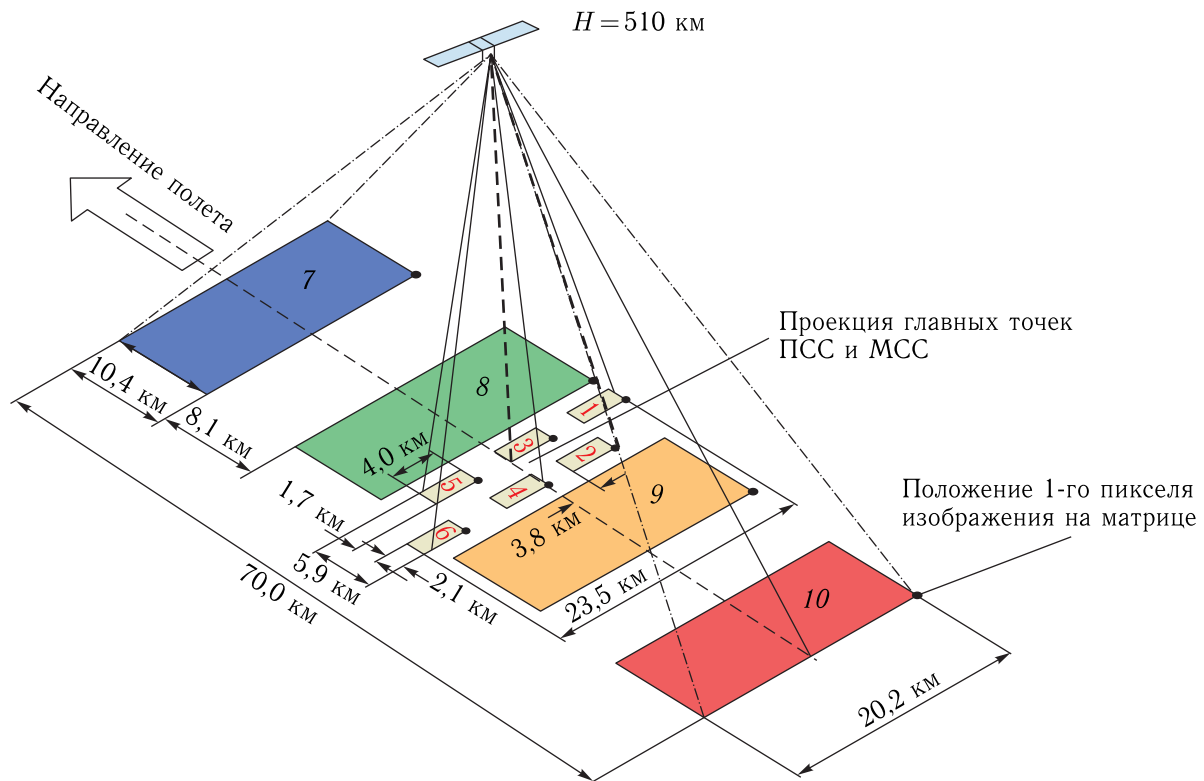


Рис. 4. Схема проекций фотоприемных матриц ЦА КК ДЗЗ «Канопус-В» на поверхность Земли при съемке в надир. Зоны чувствительности матриц: ЦА ПСС: 1-6 — панхроматическая; ЦА МСС: 7 — синяя, 8 — зеленая, 9 — красная

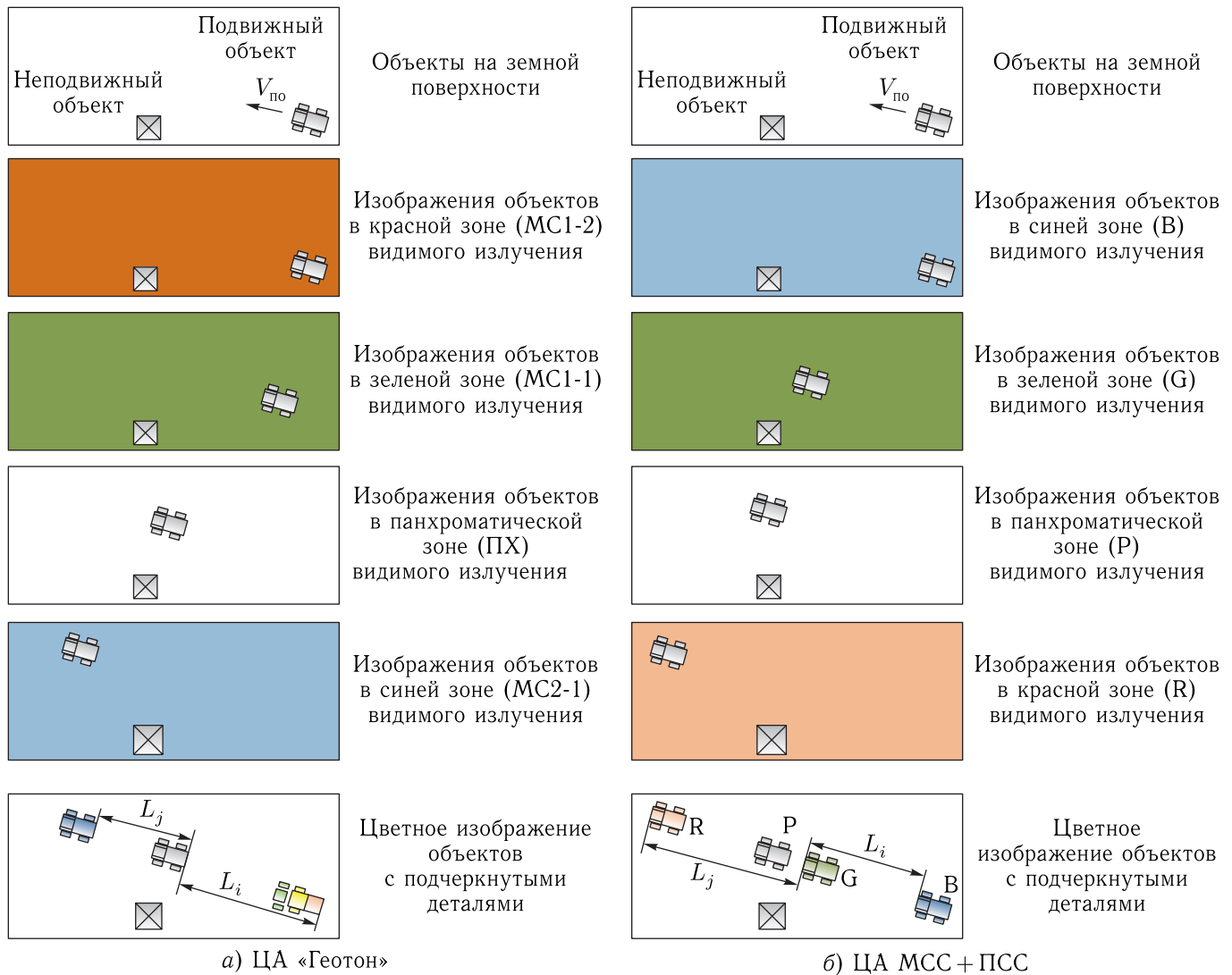


Рис. 5. Получение цветного изображения с подчеркнутыми деталями, содержащего неподвижные и подвижные объекты: а) ЦА «Геотон», б) ЦА МСС совместно с ЦА ПСС

Таблица 1. Цвет подвижного объекта на цветном изображении

| Тон объекта в панхроматической зоне | Цвет объекта в красной зоне         | Цвет объекта в области совмещения изображений в зеленой и красной зонах | Цвет объекта в зеленой зоне           | Цвет объекта в синей зоне        |
|-------------------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------------|----------------------------------|
| Светлый                             | Красный                             | Желтый  | Зеленый                               | Синий                            |
| Темный                              | Голубой (дополнительный к красному) | Темный  | Пурпурный (дополнительный к зеленому) | Желтый (дополнительный к синему) |

Возможны и другие сочетания цветов на изображениях подвижных объектов, которые зависят от цветов неподвижного фона и подвижного объекта.

Решим задачу через параметры движения изображений объекта. Найдем начальную и конечную скорости движения изображения объекта и его ускорение.

Рассмотрим случай плановой съемки ЦА, в процессе которой оптико-электронные преобразователи (ОЭП) перпендикулярны направлению результирующей скорости КА. Для расчета  $V_{rez}$  — результирующей скорости КА относительно поверхности Земли рассмотрим траекторию полета КА в системе координат, связанной с Землей (рис. 6, а), и ориентацию составляющих — скорости КА при орбитальном движении  $V_{ka}$  и скорости за счет вращения поверхности Земли  $V_{\omega}$  на широте расположения объекта (рис. 6, б).

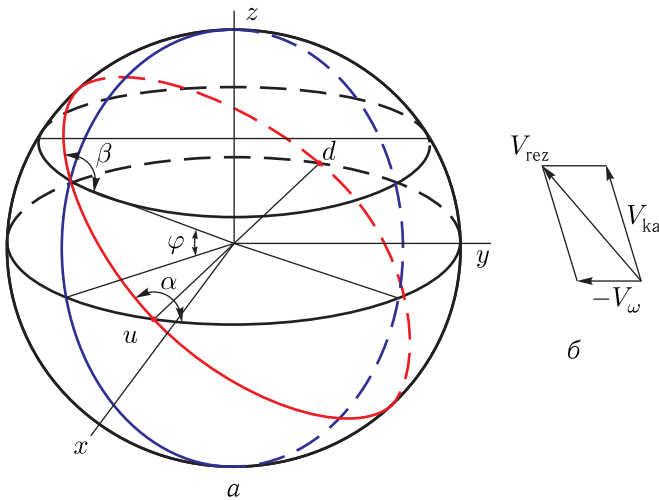


Рис. 6. а) Траектория полета КА в системе координат, связанной с Землей, б) определение результирующей скорости КА относительно поверхности Земли  $V_{rez}$

Траектория полета характеризуется следующими угловыми величинами:

$(\pi/2 - \beta)$  — азимутом проекции солнечно-синхронной орбиты КА на поверхность Земли;

$\alpha$  — наклоном плоскости орбиты КА к плоскости экватора;

$\varphi$  — широтой расположения объекта съемки.

Угол  $\beta$  рассчитывается по формуле [7]:

$$\sin \beta = (\sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2} \quad (3)$$

после преобразований,

$$\cos \beta = \cos \alpha / \cos \varphi.$$

Результирующая скорость КА рассчитывается по теореме косинусов.

Скорость движения изображения  $V_{ci}$  относительно фокальной плоскости определяется из фор-

мулы (см. рис. 7):

$$\begin{aligned} mk/S_m S_k &= f/H = V_{ci} \cdot \Delta t / (V_{рез} \cdot \Delta t), \\ V_{ci} &= V_{рез} \cdot (f/H), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Delta t$  — время, за которое точка изображения проходит расстояние  $mk$ ;

$H$  — высота съемки.

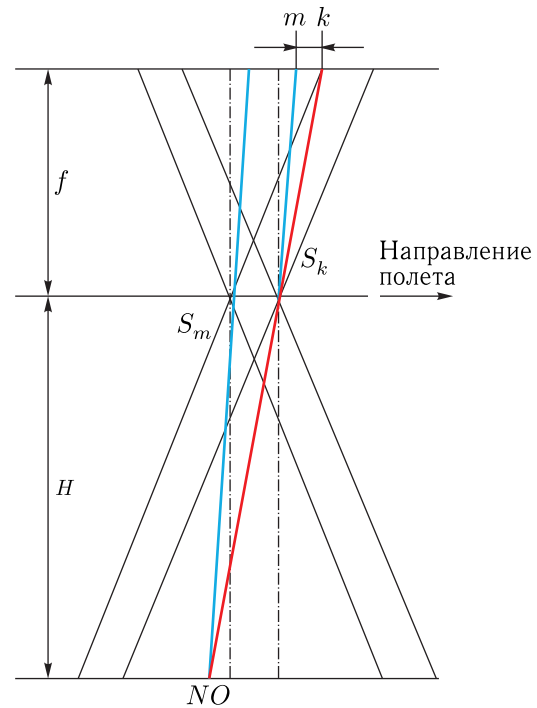


Рис. 7. Отображение точки  $NO$  в точках фокальной плоскости  $m$  и  $k$  при плановой съемке для двух спектральных каналов

Задавая значения  $mk$  в плоскости изображения между ОЭП, найдем промежутки времени, за которые изображения неподвижных относительно земной поверхности объектов перемещаются между ОЭП.

Средняя скорость изображения подвижного объекта  $V_{ci}$  на участке  $Li$

$$V_{ci} = Li/\Delta t_i, \quad (5)$$

с другой стороны,

$$V_{ci} = V_0 + a \cdot \Delta t_i/2 = V_0 + a \cdot li/(2 \cdot V_{ci}), \quad (6)$$

где  $V_0$  — начальная скорость изображения подвижного объекта на участке  $Li$ ;

$a$  – ускорение изображения подвижного объекта на участке  $Li$ ;

$\Delta t_i$  – время, за которое точка изображения проходит расстояние  $Li$ ;

$li$  – расстояние между соответствующими элементами ОЭП;

$V_{си}$  – скорость движения изображения относительно фокальной плоскости.

Средняя скорость подвижного объекта  $V_{спi}$ , соответствующая участку  $Li$ , с учетом масштаба и формул (4)–(6):

$$V_{спi} = V_{рез}d(Ni/li) = V_{п0} + a_{п}li/(2 \cdot V_{рез} \cdot f/H), \quad (7)$$

где  $d$  – размер элемента ОЭП;  $Ni$  – количество элементов ОЭП на участке  $Li$ ;  $V_{п0}$  и  $a_{п}$  – начальная скорость и ускорение подвижного объекта, соответствующие участку  $Li$ ;  $V_{рез}$  – результирующая скорость КА относительно земной поверхности.

Аналогично определяется средняя скорость подвижного объекта  $V_{спj}$ , соответствующая участку  $Lj$ .

Составим систему уравнений для участков  $Li$  и  $Lj$ :

$$\begin{cases} V_{рез}d(Ni/\Delta li) = V_{п0} + a_{п}li/(2 \cdot V_{рез} \cdot f/H), \\ V_{рез}d(Nj/\Delta lj) = V_{п0} + a_{п}[2li + lj]/(2 \cdot V_{рез} \cdot f/H). \end{cases} \quad (8)$$

Начальная скорость и ускорение подвижного объекта определяются выражениями

$$\begin{cases} a_{п} = 2 \cdot d \cdot V_{рез}^2(f/H)[(Nj/lj) - (Ni/li)]/(li + lj), \\ V_{п0} = V_{рез} \times d \times \\ \times Ni \times [2 + (lj/li) - (Nj/Ni)/(lj/li)]/(li + lj). \end{cases} \quad (9)$$

Оценим относительные среднеквадратичные отклонения (СКО) определения начальной скорости и ускорения подвижного объекта. Будем считать, что при определении  $Ni$  и  $Nj$  погрешность распределена по равномерному закону, в этом случае [8]

$$\text{СКО } Ni = \text{СКО } Nj = 1/(2 \cdot 3^{0,5}).$$

Относительные частные производные начальной скорости и ускорения подвижного объекта

по  $Ni$  и  $Nj$  равны (10) и (11):

$$\begin{cases} (V_{п0})'_{Ni}/V_{п0} = [(2 + (lj/li)]/(Ni[2 + (lj/li) - (Nj/Ni)/(lj/li)]), \\ (V_{п0})'_{Nj}/V_{п0} = \\ = [(-li/lj)]/(Ni[2 + (lj/li) - (Nj/Ni)/(lj/li)]), \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} (a_{п})'_{Ni}/a_{п} = [-1/li]/[(Nj/lj) - (Ni/li)], \\ (a_{п})'_{Nj}/a_{п} = [-1/lj]/[(Nj/lj) - (Ni/li)]. \end{cases} \quad (11)$$

Результаты расчета относительных СКО определения начальной скорости (СКО  $V$ ) и ускорения (СКО  $A$ ) подвижных объектов приведены в табл. 2.

Расчеты выполнены для следующих условий съемки ЦА.

1. Угловая скорость вращения Земли  $\Omega_3 = 0,000073$  рад/с; радиус Земли  $R_3 = 6371$  км.

2. Комплексированное изображение ЦА «Геотон»:  $d = 6$  мкм,  $f = 4000$  мм, аэродром Райт-Паттерсон, 39,5 град, с. ш.,  $H = 480$  км,  $V_{рез} = 7,766273283$  км/с;  $V_{ка} = 7,699298659$  км/с.

3. Комплексированное изображение ЦА ПСС, МСС:  $d = 7,4$  мкм,  $f = 1758$  мм, морская акватория в районе аэродрома г. Йокогама, 34,834 град с. ш.,  $H = 513$  км,  $V_{рез} = 7,756236996$  км/с;  $V_{ка} = 7,687167913$  км/с.

Анализ расчетов показывает, что ускорение определяется с СКО менее 10% при величине более 2 м/с<sup>2</sup>, а начальная скорость – с СКО менее 10% по комплексированным изображениям ЦА «Геотон» при величине более 2 м/с; ПСС, МСС при величине более 5 м/с.

Оценки скорости и ускорения транспортных средств определены с использованием программного комплекса OrthoNormScan-VS 2.0.0.2 (от 09.09.14) ПК КВИР (АО «НИИ ТП») для определения количества элементов изображения между зональными изображениями подвижных объектов.

Результаты представлены в табл. 3 и на рис. 8–10. Оценки скорости и ускорения транспортных средств соответствуют ожидаемым.

Рассмотрим влияние режима ВЗН на оценку параметров подвижных объектов.

Таблица 2. Оценка относительных СКО определения начальной скорости и ускорения подвижного объекта по комплексированным изображениям ЦА «Геотон» (КК ДЗЗ «Ресурс-П») и ЦА МСС совместно с ЦА ПСС (КК ДЗЗ типа «Канопус-В»)

| Скорость, м/с | Скорость, км/ч | Ускорение, м/с <sup>2</sup> | ЦА ПСС, МСС |          | ЦА «Геотон» |          |
|---------------|----------------|-----------------------------|-------------|----------|-------------|----------|
|               |                |                             | СКО V, %    | СКО A, % | СКО V, %    | СКО A, % |
| 1             | 3,6            | 1                           | 38,75       | 13,62    | 36,24       | 12,56    |
| 1             | 3,6            | 2                           | 38,75       | 6,81     | 21,74       | 7,54     |
| 1             | 3,6            | 5                           | 38,75       | 2,72     | 27,80       | 2,95     |
| 1             | 3,6            | 10                          | 44,56       | 1,36     | 19,59       | 1,48     |
| 2             | 7,2            | 1                           | 19,37       | 13,62    | 11,48       | 14,66    |
| 2             | 7,2            | 2                           | 22,75       | 6,81     | 11,48       | 7,33     |
| 2             | 7,2            | 5                           | 18,16       | 2,72     | 11,48       | 2,93     |
| 2             | 7,2            | 10                          | 22,54       | 1,36     | 10,77       | 1,47     |
| 5             | 18             | 1                           | 7,75        | 13,62    | 4,59        | 14,66    |
| 5             | 18             | 2                           | 7,75        | 6,81     | 4,59        | 7,33     |
| 5             | 18             | 5                           | 7,75        | 2,72     | 4,59        | 2,93     |
| 5             | 18             | 10                          | 7,75        | 1,36     | 4,59        | 1,47     |
| 10            | 36             | 1                           | 3,87        | 13,62    | 2,30        | 14,66    |
| 10            | 36             | 2                           | 3,87        | 6,81     | 2,30        | 7,33     |
| 10            | 36             | 5                           | 3,87        | 2,72     | 2,30        | 2,93     |
| 10            | 36             | 10                          | 3,87        | 1,36     | 2,30        | 1,47     |
| 20            | 72             | 1                           | 1,94        | 13,62    | 1,15        | 14,66    |
| 20            | 72             | 2                           | 1,94        | 6,81     | 1,15        | 7,33     |
| 20            | 72             | 5                           | 1,94        | 2,72     | 1,15        | 2,93     |
| 20            | 72             | 10                          | 1,94        | 1,36     | 1,15        | 1,47     |
| 50            | 180            | 1                           | 0,77        | 13,62    | 0,46        | 14,66    |
| 50            | 180            | 2                           | 0,77        | 6,81     | 0,46        | 7,33     |
| 50            | 180            | 5                           | 0,77        | 2,72     | 0,46        | 2,93     |
| 50            | 180            | 10                          | 0,77        | 1,36     | 0,46        | 1,47     |

Примечание. При скоростях более 50 м/с относительные СКО V менее 1%.

Таблица 3. Оценка параметров движения транспортных средств по комплексированным изображениям

| Начальная скорость  |        | Ускорение, м/с <sup>2</sup> | $N_i$ | $N_j$ | Относительное СКО начальной скорости, % | Относительное СКО ускорения, % |
|---|--------|-----------------------------|-------|-------|---|--------------------------------|
| м/с   | км/ч   |                             |       |       |   |                                |
| Автомобиль на автотрассе аэродрома Райт-Паттерсон             |        |                             |       |       |   |                                |
| 17,70   | 63,71  | 1,50                        | 38    | 40    | 1,3                                     | 9,78                           |
| Самолет на взлетно-посадочной полосе аэродрома Райт-Паттерсон |        |                             |       |       |   |                                |
| 77,43   | 278,74 | 10,45                       | 172   | 191   | 0,30                                    | 1,40                           |
| Самолет над морской акваторией в районе аэродрома г. Йокогама |        |                             |       |       |   |                                |
| 93,86   | 337,91 | -0,0017                     | 103   | 108   | 0,41                                    | 8,03                           |

### Учет влияния ВЗН на точность оценки скорости подвижного объекта при кадровой съемке

Пусть  $t_0$  — момент начала съемки, приведенной на рис. 4. Тогда моменты  $t_i$  начала съемки той же точки местности каналами мультиспектральной системы (МСС) будут рассчитываться по формулам

$$t_1 = t_0 - \frac{S_1}{V_{PG}} \text{ — для матрицы 7 (синий канал);}$$

$$t_2 = t_0 - \frac{S_2}{V_{PG}} \text{ — для матрицы 8 (зеленый канал);}$$

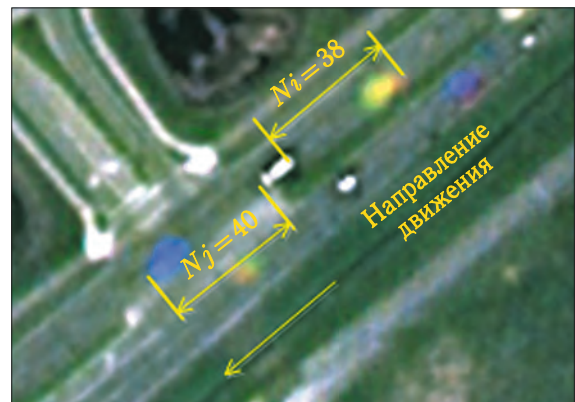


Рис. 8. Участок комплексного изображения ЦА «Геотон» аэродрома Райт-Паттерсон с автомобилем на автотрассе



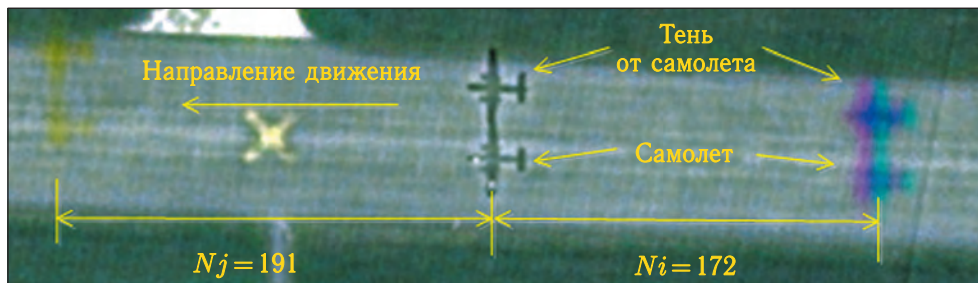


Рис. 9. Участок комплексного изображения ЦА «Геотон» аэродрома Райт-Паттерсон с взлетающим самолетом на взлетно-посадочной полосе

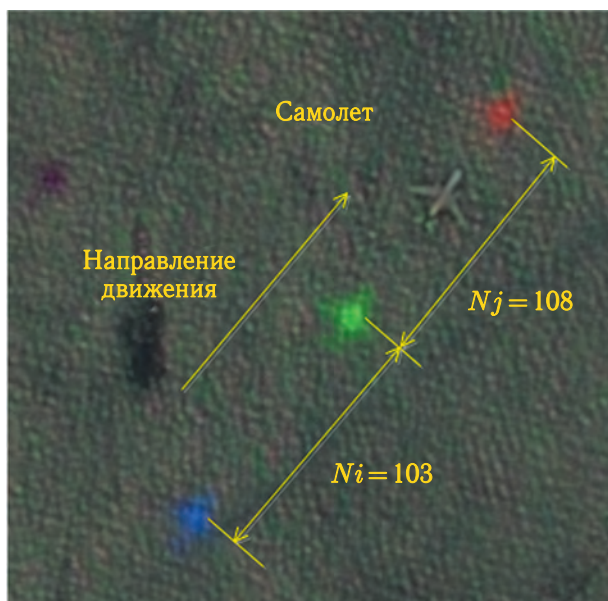


Рис. 10. Участок комплексного изображения ЦА МСС совместно с ЦА ПСС морской акватории в районе аэродрома г. Йокогама с самолетом в полете

$$t_3 = t_0 - \frac{S_3}{V_{PG}} \quad \text{— для матрицы 9 (красный канал);} \quad (12)$$

где  $S_i$  — расстояния от центральных точек матриц до проекции главных точек (ПГТ, в формулах  $PG$ ) ПСС и МСС ( $S_3$  — величина отрицательная);

$V_{PG} = V_{rez} \cdot \frac{R_E}{R_E + H}$  — скорость КА относительно подспутниковой точки  $PG$  ( $PG$  = ПГТ);

$R_E$  — радиус Земли.

Моменты  $t_i^{iz}$  окончания формирования изображения каналами МСС в режиме ВЗН определяются в соответствии с выражением

$$t_i^{iz} = t_0 - \frac{S_i}{V_{PG}} + NN_i \cdot t_{1M}, \quad i = 1 \dots 3, \quad (13)$$

где  $NN_i$  — число тактов накопления в соответствующей матрице;

$$t_{1M} = \frac{d}{V_M^{iz}} \quad \text{— время накопления на одном такте}$$

ВЗН в канале МСС;

$d$  — линейный размер пикселя матрицы МСС, ПСС;

$V_M^{iz} = V_{PG} \cdot \frac{f_M}{H}$  — скорость изображения в плоскости матрицы МСС;

$f_M$  — фокусное расстояние МСС.

После паншарпенинга (формирования цветного кадра либо изображения фрагмента маршрута из кадров МСС на базе сшитых кадров панхроматического (ПХ) канала) путем совмещения изображений неподвижных объектов получим  $t_4$  — эквивалентное время окончания формирования изображения в ПХ-канале:

$$t_4 = t_0 + NN_4 \cdot t_{1p},$$

где  $t_{1p} = t_{1M} \frac{f_M}{f_p}$  — время одного такта накопления в ПХ-канале;

$f_p$  — фокусное расстояние ПСС.

Расстояния на местности между проекциями подвижного объекта в канале номер  $i$  относительно панхроматического определяются по формуле

$$\begin{aligned} \Delta S_i &= (t_i - t_4) \cdot V_{cni} = \\ &= V_{cni} \cdot \left( -\frac{S_i}{V_{PG}} + NN_i \cdot t_{1M} - NN_4 \cdot t_{1p} \right) = \\ &= \frac{H}{f_p} \Delta s_i, \quad i = 1 \dots 3, \end{aligned}$$

где  $V_{cni}$  — средняя скорость подвижного объекта;

$\Delta l_i$  — величина смещения изображения подвижного объекта в канале номер  $i$  относительно панхроматического.

Имея хотя бы две разные  $\Delta s_i$ , а в данном случае их три, можно оценить начальную скорость  $V_0$  и ускорение  $a$  объекта:

$$V_{спi} = \frac{H}{f_p} \cdot \frac{\Delta s_i}{-\frac{S_i}{V_{PG}} + NN_i \cdot t_{1M} - NN_4 \cdot t_{1p}} =$$

$$= V_0 + \frac{a}{2} \Delta t_i, \quad i = 1 \dots 3, \quad (14)$$

где  $\Delta t_i = -\frac{S_i}{V_{PG}} + NN_i \cdot t_{1M} - NN_4 \cdot t_{1p}$ .

В выражении (14) влияние ВЗН учитывается величиной  $NN_i \cdot t_{1M} - NN_4 \cdot t_{1p}$  в знаменателе. Сравним величины в знаменателе:

$$\delta t_i = \frac{|NN_i \cdot t_{1M} - NN_4 \cdot t_{1p}|}{\frac{S_i}{V_{PG}}} \cdot 100 \%. \quad (15)$$

Выполненный расчет при близких к максимальным значениям  $NN_i$  и среднем  $NN_4$  показал следующие значения:  $\delta t_1$  (синий канал) = 0,14 %, в остальных каналах  $\delta t_i = 0,47$  %. Очевидно, что такой же является погрешность оценки средней скорости, т. е. ею можно пренебречь.

## Особенности учета влияния ВЗН на точность оценки скорости подвижного объекта при съемке «поперечной строкой» с ВЗН

Основной особенностью здесь является то, что в момент  $t_0$  матрица ЦА «Геотон» панхроматического канала также сдвинута относительно ПГТ (рис. 3), поэтому выражения для  $t_4$ , (14) и (15) принимают вид

$$t_4 = t_0 - \frac{S_p}{V_{PG}} + NN_4 \cdot t_{1p},$$

$$V_{спi} = \frac{H}{f_p} \cdot \frac{\Delta l_i}{\frac{S_p - S_i}{V_{PG}} + NN_i \cdot t_{1M} - NN_4 \cdot t_{1p}} =$$

$$= V_0 + \frac{a}{2} \Delta t_i,$$

$$\delta t_i = \frac{|NN_i \cdot t_{1M} - NN_4 \cdot t_{1p}|}{\frac{|S_i - S_p|}{V_{PG}}} \cdot 100 \%.$$

Выполненный расчет

1) при средних значениях  $NN_i$  (32) и  $NN_4$  (48) показал следующие значения:  $\delta t_1$  (красный канал) = 0,31 %,  $\delta t_2$  (зеленый канал) = 0,32 %,  $\delta t_3$  (синий канал) = 0,32 %;

2) при максимальных значениях  $NN_i$  (64) и среднем для таких значений  $NN_4$  (96) показал следующие значения:  $\delta t_1$  (красный канал) = 0,61 %,  $\delta t_2$  (зеленый канал) = 0,63 %,  $\delta t_3$  (синий канал) = 0,65 %.

Дальнейшее увеличение тактов ВЗН в панхроматическом канале  $NN_4$  приводит к уменьшению значений  $\delta t_i$ , и при максимальном  $NN_4$  (192) они становятся нулевыми.

## Выводы

1. Рассмотрен способ определения параметров движения подвижных объектов по результатам космической зональной съемки. Выполнена постановка задачи и предложен общий алгоритм определения параметров движения объектов.

2. Скорости и ускорения подвижных объектов (транспортных средств и т. п.) определяются по измерениям взаимного положения зональных изображений на комплексированных (паншарпенинг) материалах панхроматической и многоспектральной съемок с учетом расположения оптико-электронных преобразователей спектральных каналов друг относительно друга в целевой съемочной аппаратуре.

3. Сформирован признак определения направления движения подвижных объектов с использованием цветов зональных изображений.

4. Для проверки возможности решения поставленной задачи рассмотрен случай определения скорости и ускорения по плановым комплексированным изображениям, полученным при космической съемке ЦА «Геотон» (КК ДЗЗ «Ресурс-П») и ЦА ПСС, МСС (КК ДЗЗ типа «Канопус-В») при прямолинейном движении объектов.

5. Выполнена оценка достижимой точности определения скорости и ускорения подвижных объектов. Представлены результаты обработки реальных изображений. Полученные оценки скорости и ускорения транспортных средств соответствуют ожидаемым значениям.

6. Произведен учет влияния ВЗН на точность оценки параметров подвижного объекта при кадровой съемке и при съемке «поперечной строкой». Показано, что для типовых условиях влияние незначительно и составляет доли процента. Исследования целесообразно продолжить.

## Список литературы

1. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли: монография / Под ред. В. В. Еремеева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. С. 244–245.
2. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Пер. с англ. А. В. Кирюшина, А. И. Демьяникова. М.: Техносфера, 2010. С. 416.
3. Коваленко В. П. Фотограмметрическая обработка материалов видовых средств дистанционного зондирования Земли: Учеб. пособ. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2003. С. 50.
4. Архипов С. А., Бакланов А. И. Многоспектральная оптико-электронная аппаратура «Геотон» космического аппарата «Ресурс-П» // Исследование Земли из космоса, 2014, № 2. С. 47.
5. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В» № 1 / Под редакцией доктора физ.-мат. наук К. А. Боярчука, доктора техн. наук С. Н. Волкова, канд. техн. наук А. В. Горбунова, доктора техн. наук С. Г. Казанцева, доктора техн. наук Л. А. Макриденко, канд. техн. наук Р. С. Салихова. М.: ВНИИЭМ, 2011. С. 38.
6. Макушева Е. В., Некрасов В. В. Разработка динамической геометрической модели съемки оптикоэлектронных съемочных систем для перспективных космических комплексов типа «Канопус-В» // Вопросы электромеханики, 2010, т. 119, № 6. С. 25–30.
7. Лукашевич Е. Л., Саульский В. К. Выбор орбит ИСЗ для круглосуточного глобального обзора Земли // Исследование Земли из космоса, 1984, № 1. С. 110–118.
8. Музалев Г. А. Вероятностные основы авиационного оборудования. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1991. С. 61.