

УДК 528.8

О факторах, влияющих на точность формирования изображений

Е. В. Козин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Козин Е. В. О факторах, влияющих на точность формирования изображений // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 3. С. 155–164. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-155-164

Аннотация

Цель: в настоящей статье автор исследует, как основные физические факторы, возникающие в процессе аэрокосмической съемки участка местности, влияют на точность определения координат точек (объектов) местности. Для решения задачи устранения влияния этих факторов, как правило, применяется аналитический фотограмметрический подход определения поправок (приращений) в соответствующие координаты точек местности снимков. **Методы:** в качестве основных методов учета и устранения основных факторов, влияющих на точность формирования изображений, предлагается применять аналитические фотограмметрические методы обработки изображений, полученных в процессе аэрокосмической съемки, в том числе методы проективной геометрии. **Результаты:** устранение основных факторов, влияющих на точность формирования изображений, производится путем ввода соответствующих поправок в соответствующие координаты точек местности, измеренных на снимках с применением высокоточных фотограмметрических систем и программных комплексов. Поправки (приращения координат), определенные с помощью аналитических выражений вычисления приращений координат точек местности, распознаваемых на изображениях, вводятся в измеренные координаты точек местности. **Практическая значимость:** применяемая в настоящее время практика фотограмметрической обработки изображений (снимков), проводимые научные исследования и эксперименты доказывают, что для повышения точности определения координат на аэрокосмическом изображении (снимке) необходимо учитывать поправки (приращения) в соответствующие координаты точек, вызванные влиянием кривизны подстилающей поверхности Земли, атмосферной рефракции, дисторсии оптической системы применяемой аппаратуры наблюдения.

Ключевые слова: точка, поверхность, смещение точки, координата, изображение, снимок

Введение

Анализ современных отечественных и зарубежных исследований по предлагаемой теме демонстрирует, что для повышения точности определения плоских (пиксельных) координат точек местности на снимках, которые получены в процессе аэрокосмической съемки участка местности, проведенной с достаточно больших высот полета, необходим учет погрешностей, вызванных в том числе некоторыми физическими факторами. Поэтому учет и устранение влияния этих факторов повышают информативность снимков, получаемых в процессе аэрокосмической съемки местности. В настоящей статье предлагается рассмотреть влияние некоторых физических факторов, связанных с особенностями влияния земной поверхности, атмосферной рефракции, а также дисторсии объектива применяемой бортовой аппаратуры наблюдения.

Влияние кривизны Земли на положение изображения точки на снимке

Для упрощения математических выражений при определении координат точек местности в фотограмметрической системе координат $SXYZ$ по измеренным координатам их изображений предполагается, что земная поверхность является плоской. Однако при увеличении высоты съемки и мгновенного поля зрения оптической системы это предположение приводит к возникновению больших погрешностей в определении координат точек местности, обуславливаемых кривизной земной поверхности. Для анализа этих погрешностей предлагается рассмотреть влияние кривизны земной поверхности по сравнению с плоской поверхностью на положение точек на снимке [1]. Предположим, что земная поверхность представляет собой поверхность шара, а снимок является горизонтальным (рис. 1).

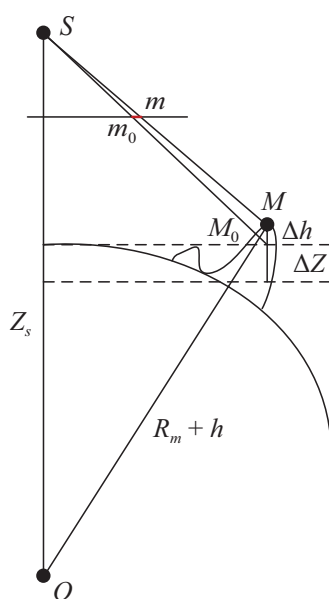


Рис. 1. Смещение (сдвиг) изображения точки на снимке, вызванное влиянием кривизны Земли

Для определения приращений (погрешностей) плоских прямоугольных координат точек снимка, вызванных влиянием кривизны Земли, предлагается воспользоваться известными в классической фотограмметрии аналитическими выражениями связи пространственных координат и измеренных плоских прямоугольных координат точки (объекта) на снимке [2, 3]:

$$x = \frac{a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_s)}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_s)}, \quad y = \frac{a_{12}X + a_{22}Y + a_{32}(Z - Z_s)}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_s)}, \quad (1)$$

где X, Y, Z — геоцентрические пространственные координаты точки M на земной поверхности;

X_s, Y_s, Z_s — линейные элементы внешнего ориентирования, определяющие положения точки съемки (центра проектирования) S в пространстве;

$a_{11} \dots a_{33}$ — направляющие косинусы вектора луча визирования в системе координат применяемой камеры (сенсора, бортовой аппаратуры наблюдения) [4]. Для этого на первом этапе логарифмируют обе части уравнений:

$$\begin{aligned}\ln x &= \ln(a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_S)) - \ln(a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)), \\ \ln y &= \ln(a_{12}X + a_{22}Y + a_{32}(Z - Z_S)) - \ln(a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)).\end{aligned}\quad (2)$$

На втором этапе получают производные функции формул (2) по координатам x и y (приращения координат Δx , Δy) [5]:

$$\begin{aligned}\Delta x &= x \left(\frac{a_{11}\Delta X + a_{21}\Delta Y + a_{31}\Delta Z}{a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_S)} - \frac{a_{13}\Delta X + a_{23}\Delta Y + a_{33}\Delta Z}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)} \right), \\ \Delta y &= y \left(\frac{a_{12}\Delta X + a_{22}\Delta Y + a_{32}\Delta Z}{a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_S)} - \frac{a_{13}\Delta X + a_{23}\Delta Y + a_{33}\Delta Z}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)} \right).\end{aligned}\quad (3)$$

Зная, что:

$$\begin{aligned}\Delta X &= X \frac{\Delta h}{R_M + h}; \\ \Delta Y &= Y \frac{\Delta h}{R_M + h}; \\ \Delta Z &= Z \frac{\Delta h}{R_M + h},\end{aligned}\quad (4)$$

выражения (3) принимают вид:

$$\begin{aligned}\Delta x &= x \frac{\Delta h}{R_M + h} \left(\frac{a_{21}}{a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_S)} - \frac{a_{23}}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)} \right), \\ \Delta y &= y \frac{\Delta h}{R_M + h} \left(\frac{a_{22}}{a_{11}X + a_{21}Y + a_{31}(Z - Z_S)} - \frac{a_{23}}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)} \right).\end{aligned}\quad (5)$$

После элементарных математических преобразований формулы (5) приращения плоских координат точки принимают следующий вид:

$$\begin{aligned}\Delta x &= -q \frac{\Delta h}{R_M + h} (a_{21} - xa_{23}), \\ \Delta y &= -q \frac{\Delta h}{R_M + h} (a_{22} - ya_{23}),\end{aligned}\quad (6)$$

$$\text{где } q = \frac{1}{a_{13}X + a_{23}Y + a_{33}(Z - Z_S)}.$$

Результирующее линейное смещение изображения точки на снимке Δl вычисляется по формуле:

$$\Delta l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (7)$$

или

$$\Delta l = \sqrt{\left[-q \frac{\Delta h}{R_M + h} (a_{21} - x a_{23})\right]^2 + \left[-q \frac{\Delta h}{R_M + h} (a_{22} - y a_{23})\right]^2}. \quad (8)$$

Для точки центра проекции на снимке формула (8) принимает вид:

$$|\Delta l_0| = q \frac{\Delta h}{R_m + h} \sqrt{1 - a_{23}^2}. \quad (9)$$

На основании анализа вышеуказанных аналитических выражений можно сделать вывод, что смещение изображения точки в центре снимка Δl не зависит от угла его поворота относительно оптико-электронной системы наблюдения. Более того, при известных значениях линейных и угловых элементов внешнего ориентирования, а также модели подстилающей поверхности можно рассчитать значения данных погрешностей по всей площади снимка.

Современные научные исследования показывают, что отклонение изображения точки на горизонтальном снимке вследствие кривизны земной поверхности зависит от ряда факторов, включая высоту съемки, расстояние от точки до центра снимка и фокусное расстояние объектива [6, 7].

Влияние атмосферной рефракции на положение изображения точки на снимке

Из научных исследований известно, что атмосфера представляет собой очень сложную неоднородную среду, показатель преломления которой изменяется с изменением высоты съемки. Съемка подстилающей поверхности выполняется через толщу атмосферы, что вызывает сложности различного характера: влияние облачности, поглощение лучей определенных длин волн атмосферой, рассеивание лучей и влияние атмосферной дымки [8, 9]. Это свойство атмосферы изменяет траекторию светового (проектирующего) луча. В научной среде это явление называется атмосферной рефракцией¹. Данное обстоятельство приводит к линейному сдвигу изображения точки на снимке относительно его истинного положения в случае прямолинейного распространения проектирующего луча (рис. 2).

¹ Атмосферной рефракцией называется искривление траектории оптического луча при прохождении через среду переменной плотности.

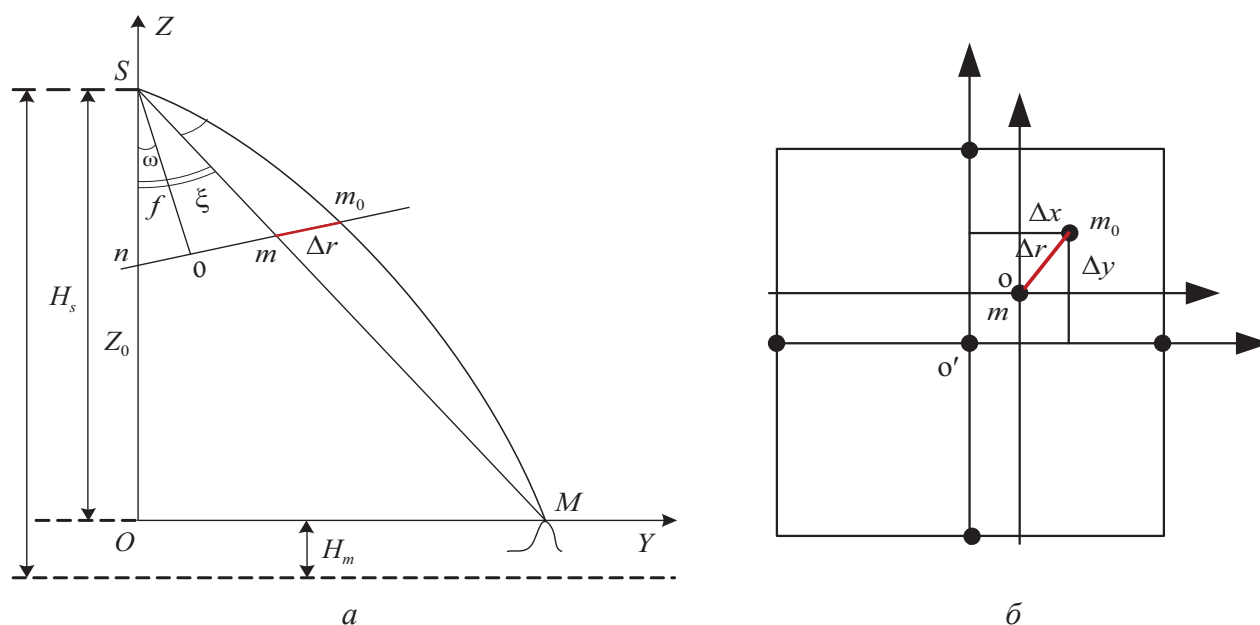


Рис. 2. Влияние атмосферной рефракции на линейный сдвиг изображения точки:
a — в пространстве, *б* — на снимке

Для определения линейного смещения изображения точки на снимке вследствие влияния атмосферной рефракции Δr применяется аналитическое выражение:

$$\Delta r = f[1 + \operatorname{tg}^2(\xi - \omega)] \cdot 2,332 \cdot 10^{-3} \frac{\operatorname{tg} \xi}{H_s} e^{-0,1423 H_m}, \quad (10)$$

где Δr — линейное смещение изображения точки на снимке вследствие влияния атмосферной рефракции;

H_s, H_m — абсолютные высоты точек съемки и местности над уровнем Балтийского моря, км;

ω — угол наклона снимка;

ξ — угол смещения луча визирования от надира;

f — фокусное расстояние применяемой камеры.

Анализ формулы (10) показывает, что из-за влияния атмосферной рефракции изображение точки на снимке не смещается только в точке надира (n). В этом случае траектория светового луча не корректируется ($\xi = 0$). Во всех остальных случаях по мере увеличения угла ξ линейное смещение изображения точки на снимке, вызванное атмосферной рефракцией, возрастает.

Приращения плоских координат изображения точки на снимке, вызванные атмосферной рефракцией, вычисляются с помощью следующих аналитических формул:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta r \cdot \cos \varphi, \\ \Delta y &= \Delta r \cdot \sin \varphi, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{y - y_n}{x - x_n} \right). \quad (12)$$

где φ — угол, составленный радиусом-вектором с осью x ,

x_n и y_n — плоские прямоугольные координаты точки надира n .

Исследование формул (11) и (12) позволяет установить, что для определения приращений координат изображения точки на снимке (Δx , Δy), вызванных влиянием атмосферной рефракции, необходимо более точно измерять плоские прямоугольные координаты определяемой точки, точки надира. Как правило, измерение плоских прямоугольных координат выполняется с применением высокоточных фотограмметрических приборов (систем) либо в современных программных средах обработки аэрокосмических изображений.

Влияние дисторсии объектива применяемой бортовой аппаратуры наблюдения на положение изображения точки на снимке

Из теории известно, что дисторсия оптической системы приводит к отклонению проектирующих лучей. Это искажение (сдвиг) в оптической системе вызывает линейное смещение положения изображения точки на снимке (Δd). Смещение становится более значительным по мере удаления от центра кадра. В результате изображение объекта (предмета) на снимке искажается и становится геометрически не подобным оригиналу.

После анализа возникновения линейного сдвига изображения точки на снимке, вызванного дисторсией объектива, необходимо отметить, что смещение положения точки на изображении от идеального происходит в общем случае не только по оси ординат, но и по оси абсцисс на величины приращений плоских координат Δx , Δy .

Экспериментально доказано: дисторсия характеризуется тем, что ее величина нелинейно зависит от величины предмета, то есть линейное увеличение различно для разных точек поля снимка. На рис. 3 приводится пример смещения (сдвига) изображения точки по оси ординат.

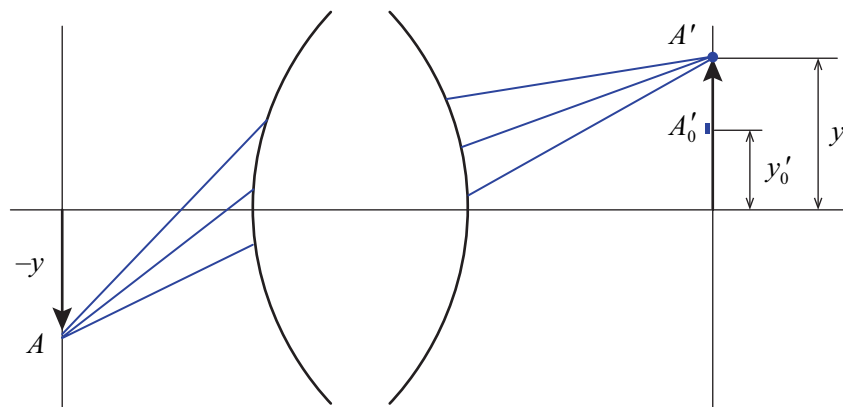


Рис. 3. Линейный сдвиг изображения точки на снимке, вызванный дисторсией объектива по оси ординат

Как правило, на практике в процессе фотограмметрической обработки применяются аналитические выражения для вычисления приращений плоских координат изображения точки на снимке Δx_i и Δy_i :

$$\Delta d = \varepsilon d^3, \Delta x = \varepsilon x d^2, \Delta y = \varepsilon y d^2 \text{ (общий вид)}, \quad (13)$$

или

$$\begin{aligned} \Delta d_1 &= \varepsilon d_1^3, & \Delta x_1 &= \varepsilon x_1 d_1^2, \\ \Delta d_2 &= \varepsilon d_2^3, & \Delta x_2 &= \varepsilon x_2 d_2^2, \\ \dots\dots\dots, & \dots\dots\dots, \\ \Delta d_i &= \varepsilon d_i^3, & \Delta x_i &= \varepsilon x_i d_i^2, \end{aligned} \quad (14)$$

где d_i — измеренное расстояние от определяемой точки до главной точки снимка; x_i, y_i — измеренные плоские прямоугольные координаты определяемой точки снимка;

ε — коэффициент дисторсии оптической системы.

Проведенный анализ аналитических выражений (14) позволяет сделать следующие выводы о влиянии дисторсии оптической системы бортовой аппаратуры наблюдения на нарушение геометрического подобия объекта (предмета) на снимке:

1. В случае смещения Δd точки от центра снимка изображение объекта принимает подушкообразную форму (положительная дисторсия $\varepsilon \geq 0$).

2. В случае смещения Δd точки к центру снимка изображение объекта принимает бочкообразную форму (отрицательная дисторсия, $\varepsilon \leq 0$).

В качестве примера приведены два варианта искаженного изображения квадрата (объекта) при наличии в оптической системе бортовой аппаратуры положительной и/или отрицательной дисторсии [10].

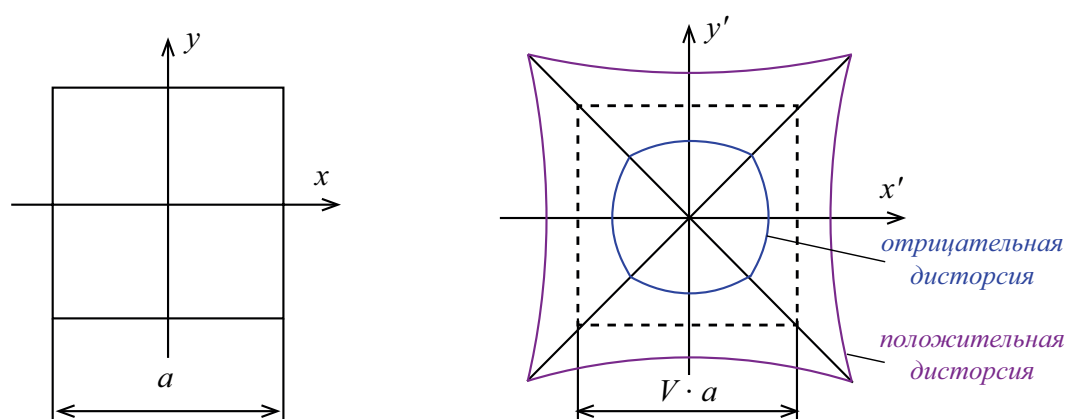


Рис. 4. Объект и его изображение при наличии дисторсии в оптической системе

Стоит отметить, что исправление дисторсии в оптической системе бортовой аппаратуры наблюдения является очень важным этапом работ по повышению качества получаемых в процессе аэрокосмической съемки снимков для последующей их фотограмметрической обработки.

Заключение

Таким образом, проведенные отечественные и зарубежные исследования по определению координат точек (объектов) местности на аэрокосмических изображениях (снимках) показывают, что для повышения точности их определения необходимо учитывать поправки (приращения) в соответствующие координаты точек, вызванные кривизной подстилающей поверхности, атмосферной рефракцией, дисторсией объектива бортовой аппаратуры наблюдения. В настоящей статье автором приведены основные аналитические выражения по определению поправок (приращений координат) в плоские координаты точек местности, изображенных на аэрокосмических снимках.

Список источников

1. Владимиров В. М. Дистанционное зондирование Земли. М.: ИНФРА-М, 2017. 572 с.
2. Козин Е. В., Карманов А. Г., Карманова Н. А. Фотограмметрия. СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2019. 142 с.
3. Тюфлин Ю. С. Космическая фотограмметрия при изучении планет и спутников. М.: Недра, 1986. 247 с.
4. Козин Е. В. Об определении направляющих косинусов вектора луча визирования в системах координат различных камер (сенсоров) // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 46–53.
5. Козин Е. В. Анализ оценивания точности определения координат подспутниковых точек // Наука, бизнес, производство — проблемы и перспективы (Национальный открытый институт, 21–22 апреля 2025 года). СПб., 2025. С. 98–101.
6. Гарбук С. В., Гершензон В. Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М., 2003. 344 с.
7. Есмагамбет И. Данные дистанционного зондирования Земли. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 116 с.
8. Шамаева О. Г., Старостина О. В. Факторы, влияющие на дешифровочные свойства космических снимков // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe* (East European Scientific Journal). 2019. №. 10 (50). С. 33–36.
9. High Resolution Optical Satellite Imagery / I. Dowman [et al.]. Whittles Publishing, 2012. 230 p.
10. Жимбуева Л. Д. Метод определения суммарной дисторсии цифровых изображений // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35, № 3. С. 347–355.

Дата поступления: 25.06.2026

Решение о публикации: 20.08.2026

Контактная информация:

КОЗИН Евгений Вячеславович — кандидат техн. наук, доцент; ekozin1970@mail.ru

About the Factors Affecting the Accuracy of Image Formation

E. V. Kozin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kozin E. V. About the Factors Affecting the Accuracy of Image Formation // Bulletin of Scientific Research Results, 2026, iss. 3, pp. 155–164. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-3-155-164 (In Russian)

Abstract

Objective: in this article, the author explores how the main physical factors that arise during the process of aerospace surveying of a terrain area affect the accuracy of determining the coordinates of terrain points (objects). To address the issue of eliminating the influence of these factors, an analytical photogrammetric approach is typically used to determine corrections (increments) to the corresponding coordinates of terrain points in the images. **Methods:** as the main methods for accounting for and eliminating the main factors affecting the accuracy of image formation, it is proposed to use analytical photogrammetric methods for processing images obtained during aerospace surveying, including methods of projective geometry. **Results:** the influence of the main factors affecting image generation accuracy is eliminated by introducing appropriate corrections to the corresponding coordinates of ground points measured in images using high-precision photogrammetric systems and software packages. Corrections (coordinate increments), determined using analytical expressions for calculating the increments of the coordinates of ground points recognized in the images, are introduced into the measured coordinates of the ground points. **Practical significance:** current photogrammetric image processing practices, along with ongoing scientific research and experiments, demonstrate that to improve the accuracy of coordinate determination in an aerospace image (photograph), it is necessary to consider corrections (increments) to the corresponding point coordinates caused by the influence of the main physical factors, including: the curvature of the Earth's underlying surface, atmospheric refraction, and lens distortion of the observation equipment used.

Keywords: point, surface, point offset, coordinate, image, photograph

References

1. Vladimirov V. M. Distancionnoe zondirovanie Zemli [Earth Remote Sensing], Moscow, INFRA-M, 2017, 572 p. (In Russian)
2. Kozin E. V., Karmanov A. G., Karmanova N. A. Fotogrammetriya [Photogrammetry], St. Petersburg, SPb.: SPb NIU ITMO [Saint Petersburg, National Research University of Information Technologies], 2019, 142 p. (In Russian)
3. Tyuflin Yu. S. Kosmicheskaya fotogrammetriya pri izuchenii planet i sputnikov [Space Photogrammetry in the Study of Planets and Satellites], Moscow, Nedra [The Bowels], 1986, 247 p. (In Russian)

4. Kozin E. V. Ob opredelenii napravlyayushchikh kosinusov vektora luchy vizirovaniya v sistemakh koordinat razlichnykh kamer (sensorov) [On Determining the Direction Cosines of the Sighting Ray Vector in Coordinate Systems of Different Cameras (Sensors)], *Izvestiya vuzov "Geodeziya i aerofotos"yemka* [Proceedings of Universities "Geodesy and Aerophotography"], 2025, vol. 69, no. 5, pp. 46–53. (In Russian)
5. Kozin E. V. Analiz otsenivaniya tochnosti opredeleniya koordinat podsputnikovyykh toчек [Analysis of Estimating the Accuracy of Determining the Coordinates of Sub-Satellite Points], *Nauka, biznes, proizvodstvo — problemy i perspektivy, Nacional'nyj otkrytyj institut, 21–22 aprelya 2025 goda* [Science, Business, Production — Problems and Prospects, National Open Institute, April 21–22, 2025], St. Petersburg, 2025, pp. 98–101. (In Russian)
6. Garbuk S. V., Gershenson V. E. Kosmicheskie sistemy distancionnogo zondirovaniya Zemli [Space Systems for Earth Remote Sensing], Moscow, 2003, 344 p. (In Russian)
7. Esmagambet I. Dannye distancionnogo zondirovaniya Zemli [Earth Remote Sensing Data], Moscow, LAP Lambert Academic Publishing, 2013, 116 p.
8. Shamaeva O. G., Starostina O. V. Faktory, vliyayushchie na deshifrovochnye svoystva kosmicheskikh snimkov [Factors Affecting the Interpretation Properties of Space Images], *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe* [East European Scientific Journal], 2019, no. 10 (50), pp. 33–36. (In Russian)
9. Dowman I., et al. High-Resolution Optical Satellite Images, Whittles Publishing, 2012, 230 p.
10. Zhimbueva L. D. Metod opredeleniya summarnoy distorsii tsifrovyykh izobrazheniy [Method for Determining the Total Distortion of Digital Images], *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2011, vol. 35, no. 3, pp. 347–355. (In Russian)

Received: June 25, 2026

Accepted: August 20, 2026

Author's information:

Evgeny V. KOZIN — PhD in Engineering, Associate Professor; ekozin1970@mail.ru