

УДК 004.932.4

## АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

© В. В. Шипко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»,  
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а

<sup>2</sup> Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,  
117342, Москва, ул. Бутлерова, 15  
E-mail: shipko.v@bk.ru

Рассматривается модель формирования гиперспектрального изображения сканирующей по пространству системой за счёт поступательного движения беспилотного летательного аппарата, на котором она установлена. Определена связь углового отклонения летательного аппарата по крену с характером геометрических искажений формируемых строк гиперспектрального изображения. Представлен алгоритм коррекции вносимых искажений по данным инерциальной навигационной системы. Результаты моделирования и обработки реальных изображений показали приемлемое качество коррекции и вычислительную простоту разработанного алгоритма.

*Ключевые слова:* гиперспектральные изображения, геометрические искажения, беспилотный летательный аппарат, моделирование, коррекция, навигационная система.

DOI: 10.15372/AUT20230205

**Введение.** Современный этап развития средств дистанционного зондирования в оптическом диапазоне характеризуется бурным развитием гиперспектральных систем. Современные образцы гиперспектральной аппаратуры позволяют получать изображения в сотнях узких полос ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра [1]. Результаты гиперспектральных измерений могут эффективно использоваться для решения сложных задач обнаружения малоразмерных объектов [2], идентификации объектов исследуемой поверхности, определения их состояния и динамики, выделения различий между близкими классами объектов [3–5].

Наиболее распространённым типом гиперспектральных систем на сегодняшний день являются сканирующие по пространству системы, построенные по технологии «pushbroom», которая обеспечивает поперечный обзор узкой полосы зондируемой поверхности с развёрткой вдоль трассы полёта носителя за счёт его поступательного движения. В этом случае каждая регистрируемая строка изображения характеризуется своими элементами внешнего ориентирования. Такой способ весьма удобен при решении задач дистанционного зондирования, где сканирование организуется за счёт движения аппарата на орбите. Однако при установке подобной аппаратуры неподвижно (гиростабилизация отсутствует) на беспилотный летательный аппарат (БПЛА), подвергающийся неизбежным возмущениям по углам Эйлера [6], возникают геометрические искажения формируемых изображений, что может значительно снизить эффективность решения задач обнаружения [2], распознавания и классификации заданных объектов [3–5] по их пространственно-спектральным признакам. Угловые колебания по углу тангажа приводят к тому, что строки сканируемой местности либо накладываются друг на друга, либо образуют пропуски. Рыскание приводит к веерообразному развороту строк, сопровождающемуся пропусками

и наложениями их концов. Наиболее существенные искажения формируемых изображений вызывают угловые колебания БПЛА по крену [7–9], приводящие к смещению контурных точек на формируемом изображении, поэтому далее будет рассматриваться коррекция именно таких искажений.

Решение этой проблемы за счёт установки гиперспектральной аппаратуры на гиросtabilизированную платформу позволяет частично скомпенсировать возникающие искажения. При этом существенными ограничениями такой стабилизации являются большой вес и энергопотребление, что неприемлемо для малогабаритных БПЛА.

Существует множество других альтернативных решений этой проблемы, например использование дополнительного кадрового сенсора (видеокамеры), синхронизированного с гиперспектральной системой [9–11] в целях получения опорных изображений. Дальнейшая обработка может быть реализована путём сопоставления отдельных кадров видеокамеры в порядке их последовательности, определения сдвига и поворота каждого последующего кадра относительно предыдущего, формирования линии траектории съёмки и внесения соответствующих поправок в гиперспектральное изображение (ГСИ) [9]. Ещё один подход [10, 11] заключается в поиске опорных точек или линий, соответствующих одним и тем же объектам на гиперспектральном и опорном изображениях, и в минимизации их неравномерности.

Существенными недостатками анализируемых методов и алгоритмов коррекции геометрических искажений ГСИ являются необходимость дополнительной полезной нагрузки в виде кадрового сенсора и их синхронизация, а также достаточно высокая вычислительная сложность алгоритмов совместной цифровой обработки гиперспектральных и видеоизображений, позволяющая проводить коррекцию исключительно на наземных пунктах обработки.

Поэтому актуальным является разработка достаточно простого и эффективного алгоритма геометрической коррекции ГСИ, формируемых в условиях угловых колебаний БПЛА по крену.

В качестве опорной информации для коррекции предлагается использовать данные углового положения БПЛА от штатной инерциальной навигационной системы при условии жёсткой фиксации гиперспектральной системы.

Цель исследования — разработка алгоритма коррекции геометрических искажений ГСИ на основе угловых данных от инерциальной навигационной системы, обладающего вычислительной простотой и высокой точностью коррекции.

**Модель формирования ГСИ в условиях угловых колебаний по крену.** Модель формируемого по строкам  $i$  и столбцам  $j$   $L$ -компонентного ГСИ в общем случае можно представить в следующем виде:

$$X_{i,j,l} = [X_{i,j,1} \quad X_{i,j,2} \quad \cdots \quad X_{i,j,L}], \quad (1)$$

где  $i = 1, \dots, I$ ;  $j = 1, \dots, J$ ;  $I, J$  — число строк и столбцов изображения соответственно;  $X_{i,j,l} \in [0, \dots, 2^N - 1]$  — значения яркости  $i, j$ -го элемента компоненты  $l$ ;  $l$  — индекс спектральной компоненты ГСИ,  $l = 1, \dots, L$ ;  $N$  — степень квантования яркости компонент изображения.

При этом каждая формируемая  $i$ -я строка изображения  $X_{i,j,l}$  будет характеризоваться угловым положением БПЛА по крену:

$$\gamma_i = [\gamma_1 \quad \gamma_2 \quad \cdots \quad \gamma_L]. \quad (2)$$

На рис. 1 показана обобщённая схема сканирования местности щелевым гиперспектрометром:  $f$  — фокусное расстояние;  $2\omega$  — угол поля зрения при угле крена  $\gamma$ ;  $D1$  — область обзора при съёмке в надир;  $D2$  — область обзора при съёмке с креном;  $D'$  —

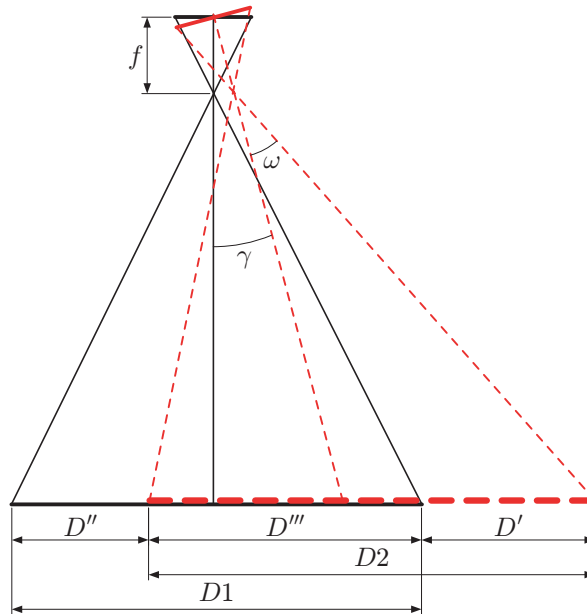


Рис. 1. Схема гиперспектральной съёмки

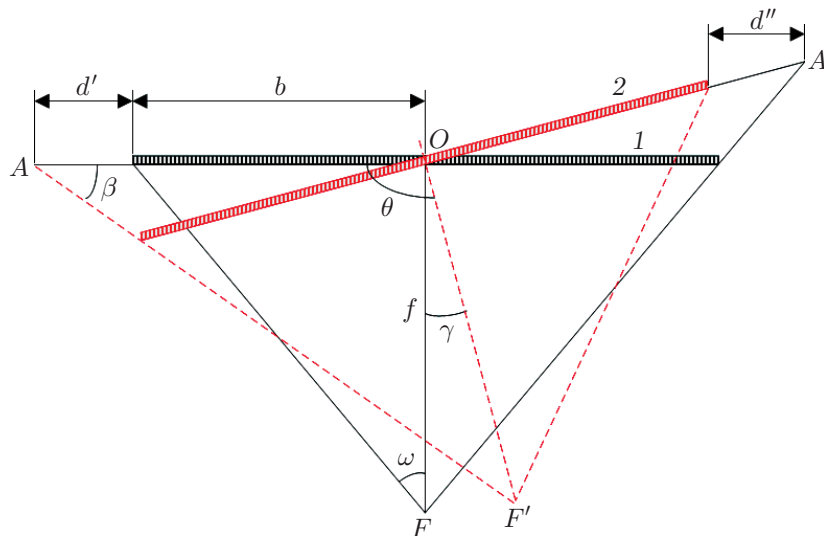


Рис. 2. Принцип формирования строки гиперспектрального изображения

участок области  $D_2$ , выходящей из области  $D_1$ ;  $D''$  — участок области  $D_1$ , не входящий в область  $D_2$ , а  $D'''$  — участок общего обзора областей  $D_1$  и  $D_2$ .

На рис. 2 в соответствии с рис. 1 показан принцип формирования строки ГСИ матрицей фоточувствительных элементов с поперечным размером  $2b = 2f \tan \omega = aJ$ , где  $a$  — размер пиксела.

При условии, что центр  $O$  матрицы в положениях 1 и 2 будет общим, размеры проекций  $d'$  и  $d''$  участков обзора  $D'$  и  $D''$  на плоскостях 1 и 2 соответственно определяют смещение  $\Delta j = d'/a = d''/a$  пикселей формируемой строки изображения при угле крена  $\gamma$  относительно положения в надир (рис. 3).

Вследствие очевидного равенства треугольников  $AOF'$  и  $A'OF$  для нахождения смещения  $\Delta j$  достаточно рассмотреть один из них, например  $AOF'$ .

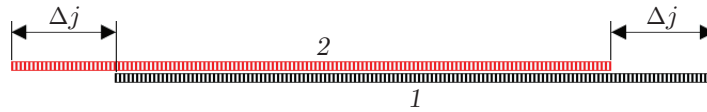


Рис. 3. Смещение формируемой строки изображения при угле крена

Воспользовавшись теоремой синусов [12], найдём сторону  $AO$  по формуле

$$AO = \frac{f \sin \omega}{\sin \beta}, \quad (3)$$

где  $\beta = 180^\circ - \theta - \omega$ ,  $\theta = 90^\circ + \gamma$ .

По известному размеру матрицы фоточувствительных элементов и размеру её единичного пиксела найдём искомое смещение

$$\Delta j = \frac{AO - b}{a}. \quad (4)$$

Тогда модель искажённого изображения  $Y_{i,j,l}$  при положительных отклонениях по крену (крен вправо) относительно эталонного изображения  $X_{i,j,l}$  (без крена) можно представить в следующем виде:

$$Y_{i,j,l}^{+\gamma} = \begin{cases} X_{i,j-\Delta j,l}, & j \in [\Delta j, \dots, J]; \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (5)$$

В случае отрицательных значений крена (крен влево) модель искажения примет вид

$$Y_{i,j,l}^{-\gamma} = \begin{cases} X_{i,j+\Delta j,l}, & j \in [1, \dots, J - \Delta j]; \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (6)$$

В качестве исходных данных при моделировании может использоваться любое изображение необходимого размера, технические параметры оптической системы:  $a$ ,  $b$ ,  $f$ ,  $\omega$ , а также угловые значения крена, полученные от реальной навигационной системы либо аналитически по выражению

$$\gamma_i = A_1 \sin(\omega_1 i) + A_2 \sin(\omega_2 i) + \eta_i, \quad (7)$$

где первый член суммы имитирует низкочастотные  $\omega_1$  колебания с большой амплитудой  $A_1$ ; второй член имитирует высокочастотные  $\omega_2$  колебания с относительно малой амплитудой  $A_2$ ;  $\eta_i$  — случайная составляющая, распределённая по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и некоторым среднеквадратическим отклонением  $\sigma_\eta$ .

Такая модель достаточно адекватно описывает характер реальных изменений угла крена в процессе аэросъёмки с БПЛА.

На рис. 4 представлены результаты моделирования геометрических искажений изображения при параметрах оптической системы  $a = 5,5$  мкм,  $b = 5,63$  мм,  $f = 17,86$ ,  $\omega = 17,5^\circ$  и изменении угла крена в соответствии с выражением (7) с параметрами  $I = 1341$ ,  $A_1 = 4$ ,  $A_2 = 1$ ,  $\omega_1 = 0,004$ ,  $\omega_2 = 0,04$ ,  $\sigma_\eta = 0,2$ . Моделирование искажений выполнялось по направлению движения машин (снизу вверх).

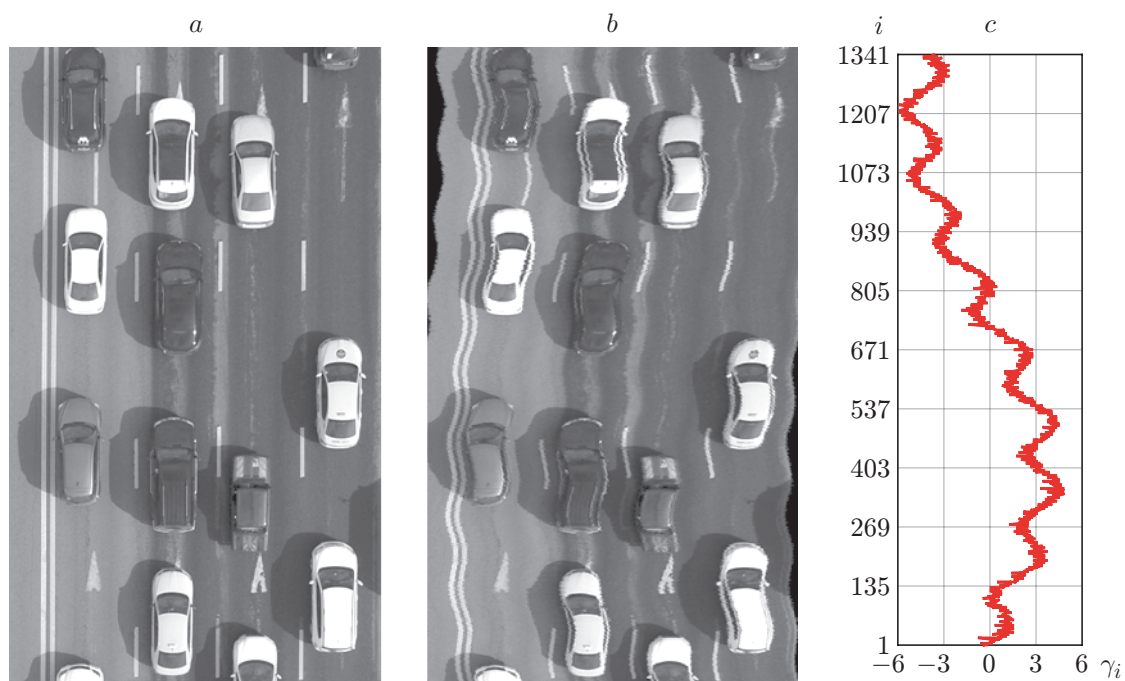


Рис. 4. Результат моделирования геометрических искажений:  $a$  — изображение без искажений,  $b$  — искажённое изображение,  $c$  — модель угловых отклонений по крену

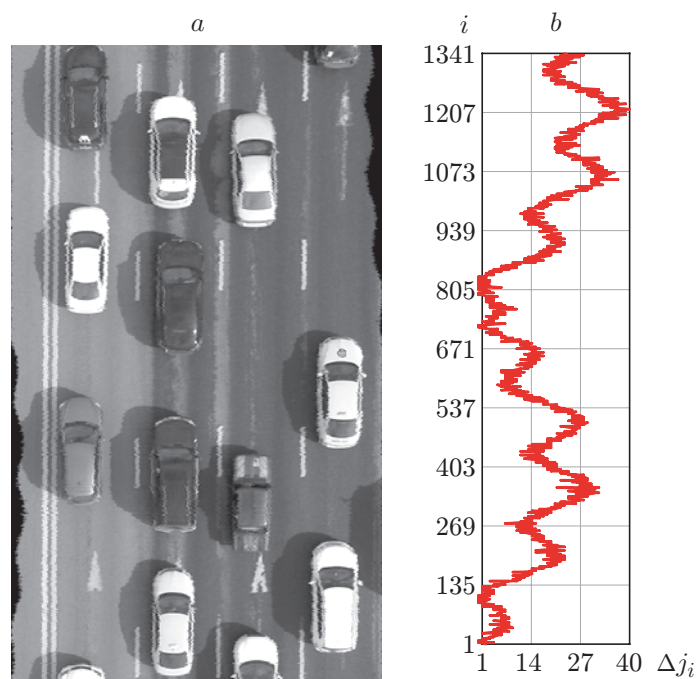


Рис. 5. Результат коррекции смоделированных геометрических искажений:  $a$  — скорректированное изображение,  $b$  — рассчитанное количество пикселей смещения в строке

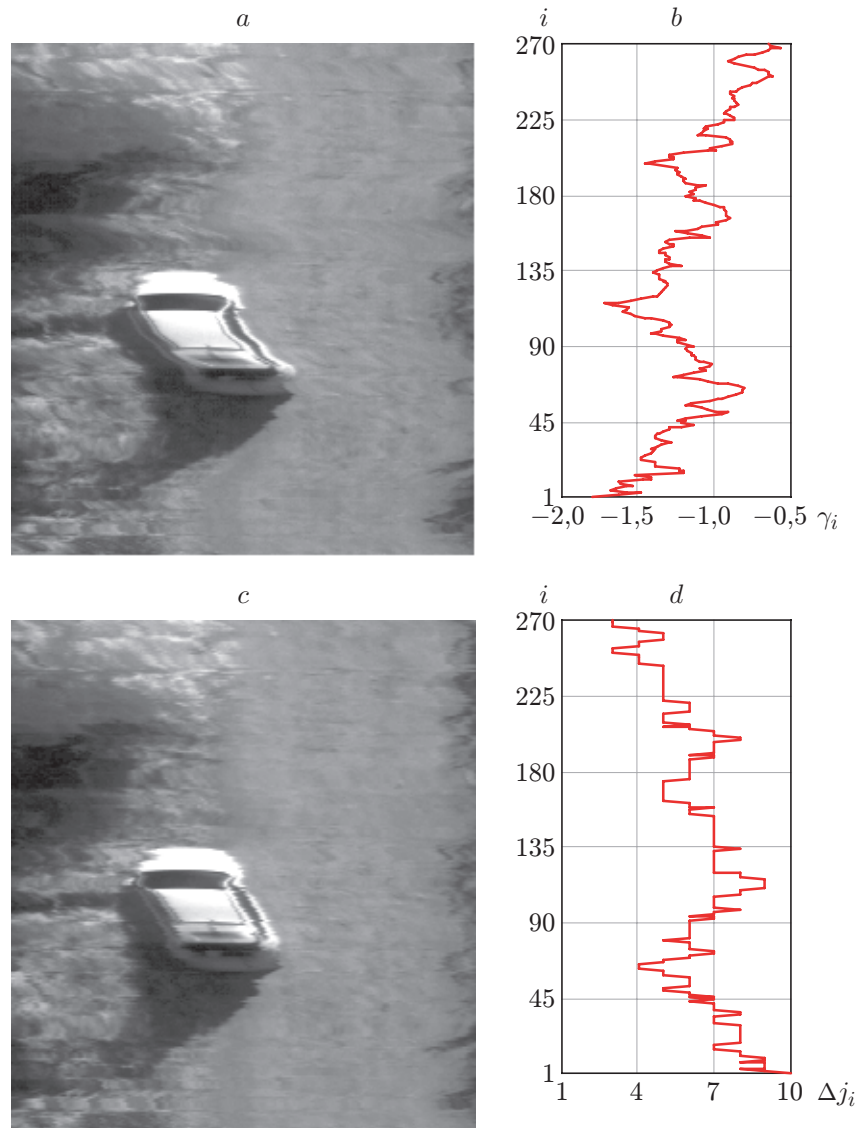


Рис. 6. Результат коррекции реальных геометрических искажений: *a* — фрагмент искажённого изображения, *b* — угловые отклонения по крену, *c* — скорректированное изображение, *d* — рассчитанное количество пикселей смещения в строке

**Алгоритм коррекции геометрических искажений.** В соответствии с представленной моделью формирования ГСИ в условиях угловых колебаний БПЛА по крену алгоритм коррекции искажений  $i$ -й строки будет состоять из следующих этапов.

Шаг 1. Синхронное получение  $i$ -й строки изображения  $X_{i,j,l}$  и соответствующего  $i$ -го значения крена  $\gamma_i$ .

Шаг 2. Вычисление угла  $\theta_i = 90^\circ + \sqrt{(\gamma_i)^2}$ .

Шаг 3. Вычисление угла  $\beta_i = 180^\circ - \theta_i - \omega$ .

Шаг 4. Определение по выражению (3) длины отрезка  $AO$  в  $i$ -й момент времени.

Шаг 5. Определение целого количества пикселей  $\Delta j_i$  для смещения  $i$ -й строки по выражению (4).

Шаг 6. По данным направления изменения угла крена ( $\pm\gamma$ ) выполняется смещение  $i$ -й

строки на  $\Delta j_i$  пикселей в соответствии с выражениями

$$\hat{Y}_{i,j,l}^{+\gamma} = \begin{cases} X_{i,j+\Delta j_i,l}, & j \in [1, \dots, J - \Delta j_i]; \\ 0, & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (8)$$

$$\hat{Y}_{i,j,l}^{-\gamma} = \begin{cases} X_{i,j-\Delta j_i,l}, & j \in [\Delta j_i, \dots, J]; \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (9)$$

На рис. 5 приведены результаты коррекции геометрических искажений для модели на рис. 4 при среднеквадратической ошибке измерения угла крена  $\sigma_\gamma = 0,2$ .

На рис. 6 представлены результаты коррекции разработанным алгоритмом реальных искажений одного из спектральных каналов ГСИ, полученных гиперспектрометром ВИД-ИКЗ [1]. Съёмка выполнялась на высоте около 100 м с синхронной фиксацией угловых значений крена по данным бортовой инерциальной навигационной системы в моменты формирования строк изображения.

Анализ работы алгоритма показал достаточно высокую эффективность коррекции геометрических искажений ГСИ, вызванных колебаниями БПЛА по углу крена. Остаточные искажения могут быть обусловлены погрешностью измерения крена навигационной системой, наличием колебаний по другим углам, изменением высоты полёта. Тем не менее разработанный алгоритм является вычислительно простым, не требует дополнительной бортовой аппаратуры и позволяет проводить коррекцию в реальном масштабе времени на борту БПЛА.

**Заключение.** Таким образом, рассмотренная модель формирования ГСИ сканирующей по пространству системой типа «pushbroom» устанавливает связь углового отклонения летательного аппарата по крену с характером геометрических искажений, а разработанный алгоритм коррекции таких искажений позволяет компенсировать неравномерность формируемых строк по данным инерциальной навигационной системы. Достаточная простота реализации представленного алгоритма позволяет вести обработку в реальном масштабе времени на борту летательного аппарата. Дальнейшие исследования могут быть направлены на реализацию рассмотренного подхода для устранения искажений, обусловленных угловыми отклонениями по углам рыскания и тангажа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Виноградов А. Н., Егоров В. В., Калинин А. П. и др.** Линейка авиационных гиперспектрометров ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов // Оптический журнал. 2016. **88**, № 4. С. 54–62.
2. **Юхно П. М., Огреб С. М., Тишанинов М. В.** Статистический синтез гиперспектрального обнаружителя // Автометрия. 2015. **51**, № 3. С. 61–69.
3. **Борзов С. М., Потатуркин О. И.** Спектрально-пространственные методы классификации гиперспектральных изображений. Обзор // Автометрия. 2018. **54**, № 6. С. 64–86. DOI: 10.15372/AUT20180607.
4. **Нежевенко Е. С.** Нейросетевая классификация трудноразличимых типов растительности по гиперспектральным признакам // Автометрия. 2019. **55**, № 3. С. 62–70. DOI: 10.15372/AUT20190308.
5. **Козик В. И., Нежевенко Е. С.** Классификация гиперспектральных изображений с помощью свёрточных нейронных сетей // Автометрия. 2021. **57**, № 2. С. 13–21. DOI: 10.15372/AUT20210202.

6. **Вавилов Ю. А.** Системы автоматического управления полётом. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2009. 412 с.
7. **Журкин И. Г., Никишин Ю. А.** Расчёт параметров формирования изображений, полученных в условиях нестабилизированной гиперспектральной аэросъёмки // Изв. ВУЗов. Сер. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2011. № 4. С. 47–52.
8. **Василейский А. С.** Коррекция геометрических искажений видеоданных с цифровых аэросъёмочных камер, вызываемых угловыми колебаниями носителя по крену // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. 1, вып. 2. С. 203–209.
9. **Казанцев А. О.** Эффективный алгоритм коррекции геометрических искажений в авиационных гиперспектральных изображениях // Исследование Земли из космоса. 2009. № 5. 49–55.
10. **Журкин И. Г., Никишин Ю. А.** Методика и технология геометрической коррекции нестабилизированных изображений бортового гиперспектрометра // Изв. ВУЗов. Сер. Геодезия и аэрофотосъёмка. 2010. № 5. С. 86–92.
11. **Ильин А. А., Виноградов А. Н., Егоров В. В. и др.** Метод геометрической коррекции гиперспектральных изображений земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. 9, № 1. С. 39–46.
12. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1978. 838 с.

*Поступила в редакцию 06.10.2022*

*После доработки 17.11.2022*

*Принята к публикации 29.12.2022*

---