

## РАДИОФИЗИКА

---

УДК 528.8:004.93

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).658-670

ГРНТИ 47.49.27+28.23.15

Специальность ВАК 1.3.4

*Научная статья*

### ДВУХКАНАЛЬНАЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ СИСТЕМА

Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А., Карачинов В. А.,  
Гаврушко В. В., Быстров Н. Е.

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого  
(Великий Новгород, Россия)*

**Аннотация** В статье обсуждаются вопросы построения систем телевизионной гиперспектральной визуализации. Приводятся примеры практического использования разномасштабных изображений. Рассматривается комбинированная гиперспектральная система, имеющая два канала: первый для наблюдения в мелком масштабе, выполняемый на базе интерферометра Фабри-Перо, и второй для наблюдения в крупном масштабе, выполняемый на базе призмы. Рассматриваются принципы построения каналов комбинированной гиперспектральной системы, основанных на сканировании по пространственной и спектральной координате. Предлагается вариант построения многоуглового (многощелевой) гиперспектральной системы для призмного варианта на основе принципа сканирования по пространственной координате. Анализируется возможность реализации многоуглового канала при использовании мегапиксельного фотоприемника с повышенной чувствительностью. Приводятся исходные и расчетные данные. Рассматриваются структурные электрические и оптические схемы, анализируются достигаемые технические характеристики.

**Ключевые слова:** дистанционный мониторинг, гиперспектральные системы, гиперспектральные изображения

**Для цитирования:** Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А., Карачинов В. А., Гаврушко В. В., Быстров Н. Е. Двухканальная гиперспектральная система // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 658-670. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).658-670

*Research Article*

### TWO-CHANNEL HYPERSPECTRAL SYSTEM

Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebriakov D. A., Karachinov V. A.,  
Gavrushko V. V., Bystrov N. E.

*Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)*

**Abstract** The article discusses the construction of television hyperspectral imaging systems. Examples of practical use of multi-scale images are given. A combined hyperspectral system with two channels is considered: the first one performed on the basis of the Fabry-Perot interferometer is for small-scale observation, and the second one performed on the basis of a prism is for large-scale observation. The principles of constructing channels of a combined hyperspectral system based on scanning by spatial and spectral coordinates are considered. A variant of constructing a multi-angle (multi-slit) hyperspectral system for the prism variant based on the principle of scanning by spatial coordinate is proposed. The possibility of implementing a multi-angle channel using a megapixel photodetector with increased sensitivity is analyzed. The initial and calculated data are given. Structural electrical and optical circuits are considered, and resulting technical characteristics are analyzed.

**Keywords:** remote monitoring, hyperspectral systems, hyperspectral images

**For citation:** Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebriakov D. A., Karachinov V. A., Gavrushko V. V., Bystrov N. E. Two-channel hyperspectral system // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 658-670. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).658-670

## Введение

Технология дистанционного зондирования при различных масштабах получаемых при этом изображений часто применяется в самых различных практических приложениях. Примером может служить мониторинг сельскохозяйственных культур с целью оценки их состояния [1-5]. Дистанционное зондирование с помощью беспилотных воздушных судов (БВС) обеспечивает точный мониторинг отдельных областей за счет низкой высоты полета и данных с высоким разрешением. Ниже рассматривается комбинированная гиперспектральная система (ГСС), имеющая два канала: первый для получения изображений в мелком масштабе, выполняемый на базе интерферометра Фабри-Перо, и второй для получения изображений в крупном масштабе, выполняемый на базе призмы. Структурная схема двухканальной ГСС приведена на рисунке 1.

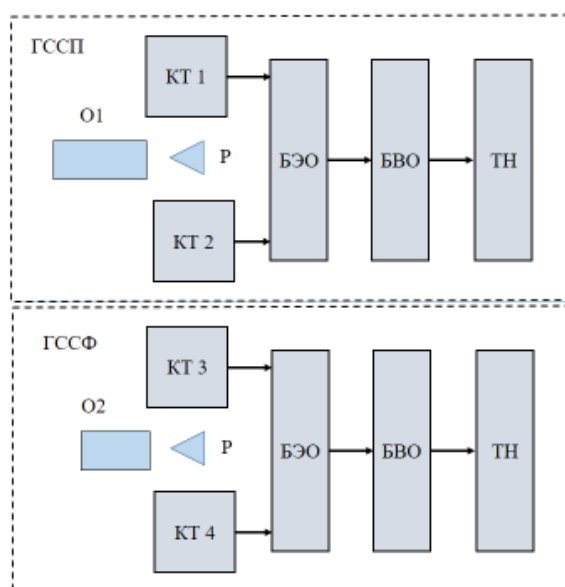


Рисунок 1. Структурная схема ГСС: ГССП – гиперспектральный канал на призме, ГССФ – гиперспектральный канал на Фабри-Перо интерферометре, О1, О2 – объективы, Р – светоделительная призма, КТ1 и КТ3 – камеры телевизионных каналов наблюдения, КТ2 и КТ4 – камеры телевизионных гиперспектрометров

ГСС содержит два канала: гиперспектральный канал на призме (ГССП) и гиперспектральный канал на интерферометре Фабри-Перо (ГССФ). Каждый гиперспектральный канал содержит отдельный канал наблюдения (КН), реализованный на цветных видеокамерах КТ1 и КТ3. Оптические потоки с объектива О1 и О2 разбиваются призмами Р на два потока для каналов наблюдения на КТ1, КТ3 и для гиперспектрометров (ГС), выполненных с использованием черно-белых видеокамер КТ2, КТ4. Чувствительность при этом уменьшается в два раза, но, достигается простота юстировки изображений КН и ГС на одну оптическую ось. Принцип построения ГССФ ранее рассмотрен в [8, 9].

Ниже рассматривается более подробно ГССП, построенной на основе принципа сканирования по пространственной координате за счет движения носителя – БВС [10]. Оптическая схема ГС на базе призмы [10] приведена на рисунке 2.

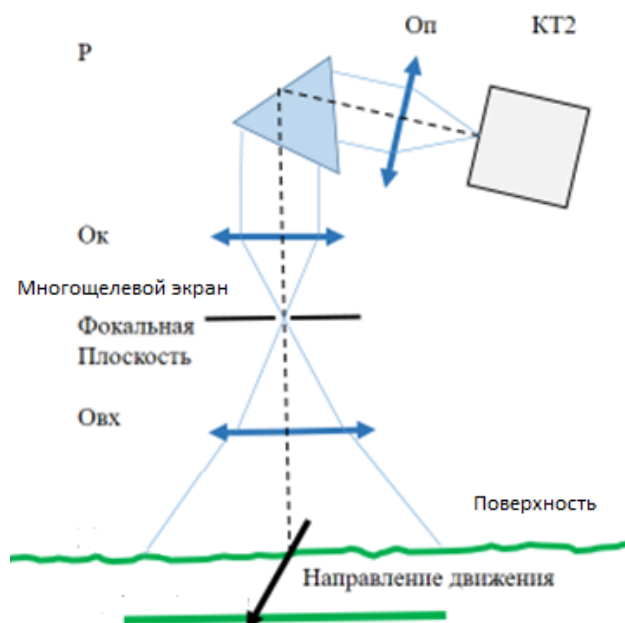


Рисунок 2. Оптическая схема ГС: Р – призма; Ок – объектив коллиматорный; Овх – объектив входной; Оп – объектив переноса.

В отличие от оптической схемы [10] в фокальной плоскости устанавливаются многощелевые экраны, примеры которых приведены на рисунке 3: первый имеет три щели, второй четыре. Если в ГССП например, установить экран, который будет формировать четыре щели, то, учитывая работу сенсора КТ2 с повышенной кадровой частотой до  $f_k=300\text{Гц}$ , возможно получение 40 спектров за время кадра  $f_k=30\text{Гц}$  КТ1.

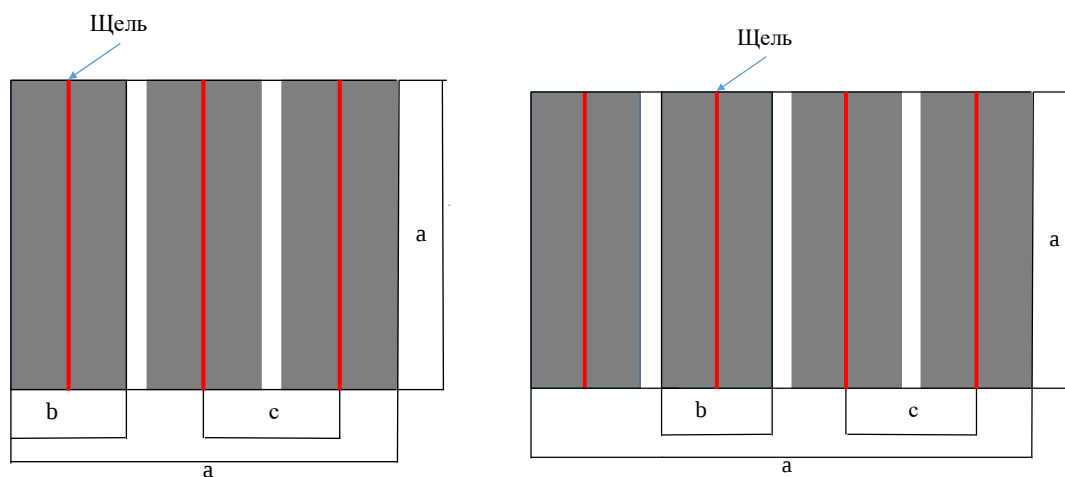


Рисунок 3. Экраны для ГС: а – размер экрана, b – область, которую занимает спектр сформированный щелью, с – расстояние между щелями

При построении ГСС необходимо свести к минимуму ограничения на влияние внешних условий: высота Солнца над горизонтом, высота полета БВС, угол места и тангаж БВС, скорость полета и т.п. Угол зондирования  $\alpha$ , как и высоту полета  $h$  и скорость полета  $v$  (рисунок 4) необходимо сделать управляемыми для обеспечения единства измерений при изменении условий освещенности.

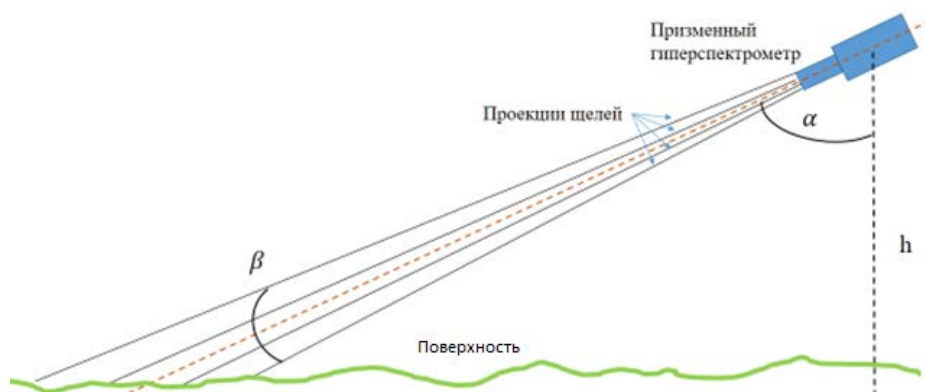


Рисунок 4. Проекция щелей на визуализируемую поверхность

Поля зрения ГССП и ГССФ для получения гиперспектральной информации приведены на рисунке 5. При планировании эксперимента, составлении полетного задания, вычисляются параметры поля зрения ГССП, по которым затем вычисляются параметры поля зрения ГССФ.

Потоки видеоинформации от КТ1 и КТ2 поступают на блок электронной обработки (БЭО), в котором осуществляется предварительная обработка КН и ГС. БЭО управляет временем экспозиции видеокамер, кадровой частотой, бинированием и т.д.

В блоке вторичной обработки (БВО) осуществляется подготовка видеоинформации для записи на твердотельный накопитель (ТН): сжатие по стандарту JPEG, формирование блока данных кадра, сжатая видеоинформация плюс служебная информация о параметрах полета. Каждый из каналов ГСС может работать автономно. При совместной работе ГССП и ГССФ необходима общая синхронизация и управление.

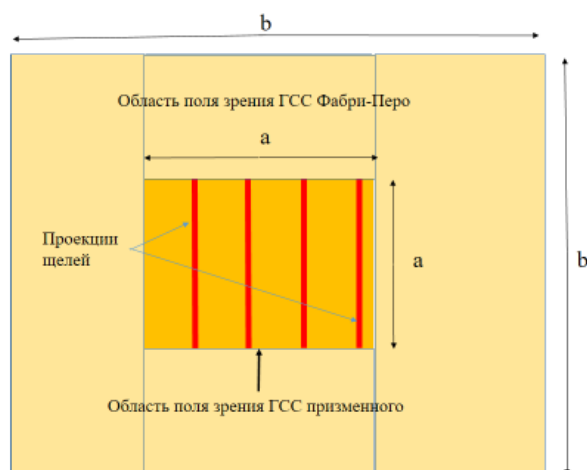


Рисунок 5. Поля зрения ГССП и ГССФ

### Канал наблюдения

Канал наблюдения предназначен как для непосредственного визуального контроля области поля зрения ГСС, так и для повышения его разрешения путем слияния панхроматического изображения высокого разрешения со спектральным

изображением [11] пониженного разрешения в случае бинирования. Для канала наблюдения может быть использован, в частности, цветной сенсор высокого разрешения GSENSE2020 фирмы Gpixel, КНР [12]. Достигаемые технические характеристики видеокамеры КТ1 (см. структурную схему ГСС, рисунок 1), выполненной на сенсоре GSENSE2020, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики видеокамеры

| Характеристика (параметр)                                            | Величина параметра       |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Фокусное расстояние входного объектива, мм                           | 80                       |
| Диаметр зрачка входного объектива, мм                                | 60                       |
| Количество элементов разложения                                      | 2048 x 2048              |
| Размер пикселя линейный, мкм                                         | 6,5 x 6,5                |
| Частота кадров (частота измерений), Гц                               | от 1 до 300              |
| Динамический диапазон, дБ                                            | 70                       |
| Разрядность оцифровки сигнала изображения, бит                       | 10                       |
| Чувствительность, $e^-/((Вт/м^2)с)$                                  | $6 \cdot 10^7: 2$        |
| Угол поля зрения канала наблюдения                                   | $9^\circ \times 9^\circ$ |
| Размер пикселя на местности мм, при $\alpha = 45^\circ$ , $h = 30$ м | 3,5                      |
| Размер пикселя на местности мм, при $\alpha = 45^\circ$ , $h = 40$ м | 5                        |
| Размер пикселя на местности мм, при $\alpha = 45^\circ$ , $h = 50$ м | 6                        |

### Оптическая схема гиперспектрометра

Ниже рассматриваются расчетные данные, выполненные с использованием формул, приведенных, в частности, в литературе [10,13-15] На рисунке 6 приведена детализированная оптическая схема ГС [10, 14], на которой показан ход лучей для находящейся в бесконечности точки, лежащей на оси входного объектива.

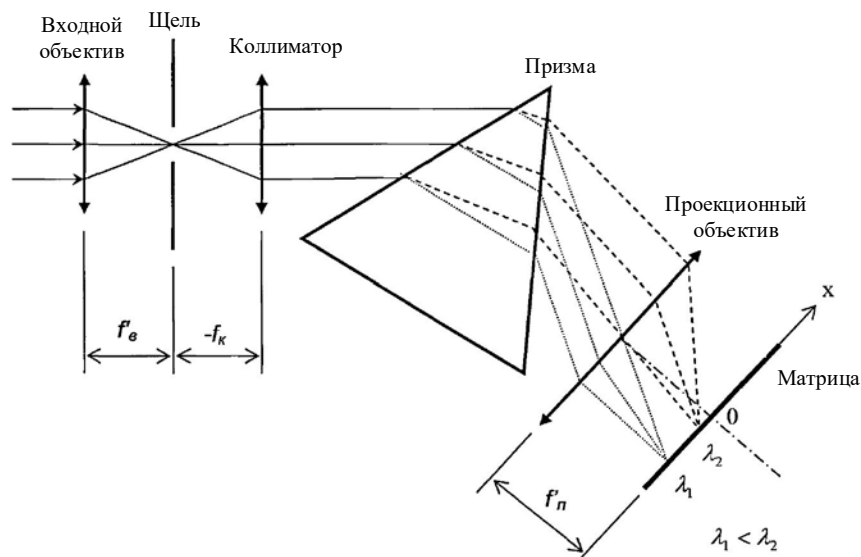


Рисунок 6. Оптическая схема ГС

Изображение исследуемой поверхности формируется на задней фокальной плоскости входного объектива. Изображение, прошедшее щель, преобразуется коллимирующим объективом в пучки параллельных лучей. Разложение излучения в спектр осуществляется призмой. Призма имеет следующие параметры: призмный угол  $60^\circ$ ; основание 50мм; стекло ТФ2 (тяжелый флинт). Разложенное в спектр изображение полосы проецируется объективом на фотоприемник, который выполнен на черно-белом сенсоре для расширения спектрального диапазона ГС до 1000 нм.

В таблице 2 приведены основные расчетные характеристики оптико-электронного тракта ГС. Коэффициент пропускания оптической системы равен:  $\tau = \tau_{\text{в}} \cdot \tau_{\text{к}} \cdot \tau_{\text{п}} \cdot \tau_{\text{пр}}$ , где  $\tau_{\text{в}}$  – коэффициент пропускания входного объектива;  $\tau_{\text{к}}$  – коэффициент пропускания объектива коллиматора;  $\tau_{\text{п}}$  – коэффициент пропускания объектива переноса;  $\tau_{\text{пр}}$  – коэффициент пропускания призмы. Световые потери в призме возникают из-за отражения от граней, а также из-за поглощения света в материале призмы.

Таблица 2. Характеристики оптико-электронного тракта ГС

| Характеристика (параметр)                                       | Величина параметра       |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Фокусное расстояние входного объектива, мм                      | 80                       |
| Диаметр зрачка входного объектива, мм                           | 60                       |
| Фокусное расстояние коллимационного объектива, мм               | 65 (80)                  |
| Фокусное расстояние объектива переноса, мм                      | 20                       |
| Количество элементов разложения                                 | 2048 x 2048              |
| Размер пикселя линейный, мкм                                    | 6,5 x 6,5                |
| Частота кадров (частота измерений), Гц                          | от 1 до 300              |
| Динамический диапазон, дБ                                       | 70                       |
| Чувствительность, $\text{e}^-/((\text{Вт}/\text{м}^2)\text{с})$ | $6 \cdot 10^7 : 2$       |
| Разрядность оцифровки сигнала изображения, бит                  | 10                       |
| Угол поля зрения гиперспектрометра                              | $9^\circ \times 9^\circ$ |

Коэффициент пропускания призмы (рисунок 7 а) определяется по формуле:  $\tau_{\text{пр}} = \tau_{\text{отр}} \cdot \tau_{\text{погл}}$ , где  $\tau_{\text{отр}}$  – коэффициент пропускания, определяемый отражением от граней;  $\tau_{\text{погл}}$  – коэффициент пропускания, определяемый прозрачностью призмы.

Если коэффициент пропускания каждого объектива равен 0,8, то коэффициент пропускания всех объективов равен:  $\tau_{\text{об}} = \tau_{\text{в}} \tau_{\text{к}} \tau_{\text{п}} \sim 0,51$ . На рисунке 7 б показан коэффициент пропускания оптической системы. Будем считать коэффициент пропускания оптической системы  $\tau = 0,4$ . Ход луча в плоскости главного сечения призмы приведен на рисунке 8 а. Угол падения для минимального угла отклонения, рисунок 8 а, равен:  $\alpha_1 = \arcsin(n \cdot \sin(A/2)) = 63^\circ$ , где  $n = 1,671$ . Диапазон изменения угла падения для ГС с одной щелью в зависимости от длины волны приведен на рисунке 8 б. Угловой размер изображения на матрице для минимального угла отклонения равен:  $\Delta\varphi = \frac{2 \cdot \sin(A/2)}{\sqrt{1 - n_{\text{ср}}^2 \sin^2(A/2)}}$ , где  $n_{\text{ср}} = (n_{\text{н}} + n_{\text{к}})/2$ ,  $n_{\text{н}}$  и  $n_{\text{к}}$  соответствует

показателям преломления для начала и конца спектрального диапазона  $\Delta\varphi=0,198$  рад или  $\Delta\varphi=11^\circ$ . Размер изображения на матрице Ни количество строк изображения  $N$  равны:  $H=f_n\Delta\varphi$ , где  $f_n$  – фокусное расстояние проекционного объектива,  $N=N/p=436$ , где  $p$  – размер пиксела. Для  $f_n=65$  мм  $H=13$  мм  $N=1980$ . Для  $f_n=20$  мм  $H=4$  мм  $N=610$ .

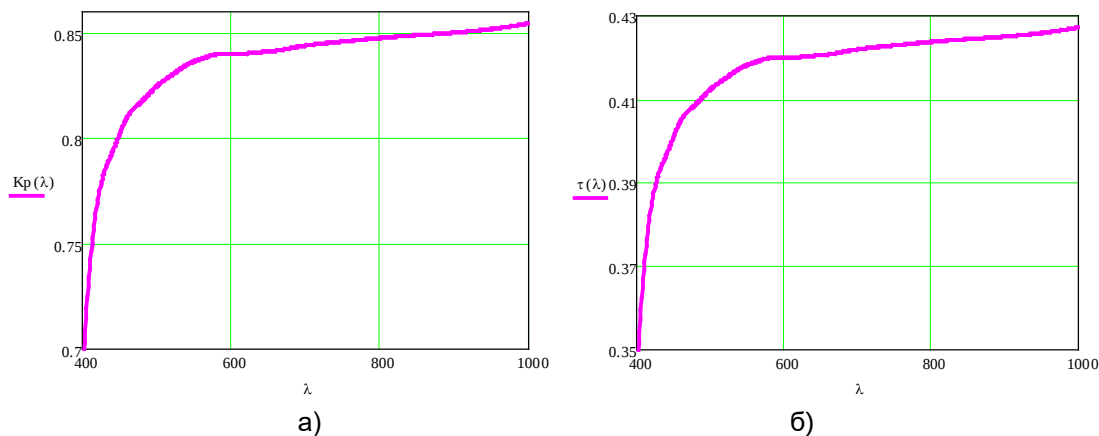
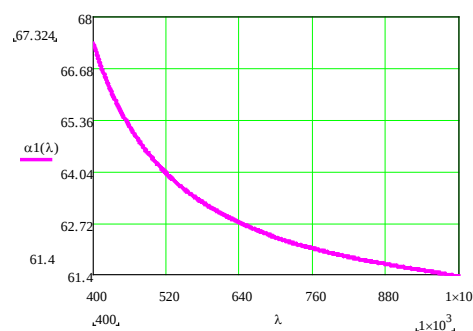
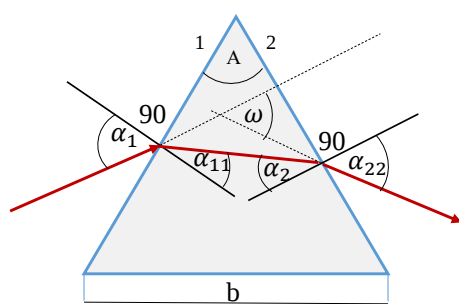


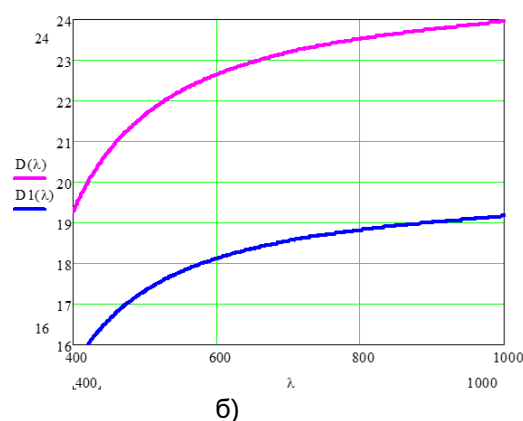
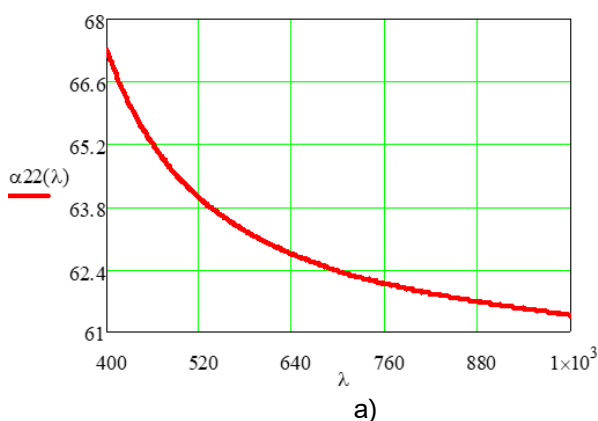
Рисунок 7. Коэффициент пропускания, а – призмы, б – оптической системы



а)

б)

Рисунок 8. Ход луча в плоскости главного сечения призмы (а), диапазон изменения угла падения (б)



а)

б)

Рисунок 9. Зависимость угла  $\alpha_{22}$  на выходе призмы от длины (а), зависимость диаметра пучка от длины волны (б),  $D(\lambda)$  для  $b = 50$  мм,  $D1(\lambda)$  для  $b = 40$  мм

На рисунке 9 показана зависимость угла  $\alpha_{22}$  на выходе призмы от длины волны. Данный рисунок демонстрирует один из главных недостатков призмных ГС – нелинейную зависимость угла, а следовательно, спектра от длины волны.

В длинноволновом диапазоне видимого света из-за этого теряется разрешающая способность ГС, но для исследования живых систем это не является существенным недостатком. Диаметр светового пучка:  $D(\lambda) = b \cdot \frac{\cos(\alpha_{22})}{2 \sin(\frac{A}{2})}$ , где  $b$  размер стороны призмы.

Функция соответствия проекционной координаты  $x$  длине волны  $\lambda$ :  $x(\lambda) = (\alpha_{22}(\lambda) - \varphi_0) f_n$ . Если нуль на оси  $X$  соответствует середине спектрального диапазона, то  $\varphi_0 = \alpha_{22}((\lambda_{\min} + \lambda_{\max})/2)$ , если нуль на оси  $X$  соответствует концу спектрального диапазона, то  $\varphi_0 = \alpha_{22}(\lambda_{\max})$ . На рисунке 10 а приведена функция соответствия проекционной координаты  $x$  длине волны  $\lambda$  для нуля в середине диапазона длин волн для одной щели  $f_n = 65$  мм. На рисунке 10 б приведена функция соответствия проекционной координаты  $x$  длине волны  $\lambda$  для нуля в середине диапазона длин волн для трех щелей  $f_n = 20$  мм. Для перемещения центра проекционной координаты необходимо рассчитать угловое положение щели  $\varphi_y$  на сенсоре.

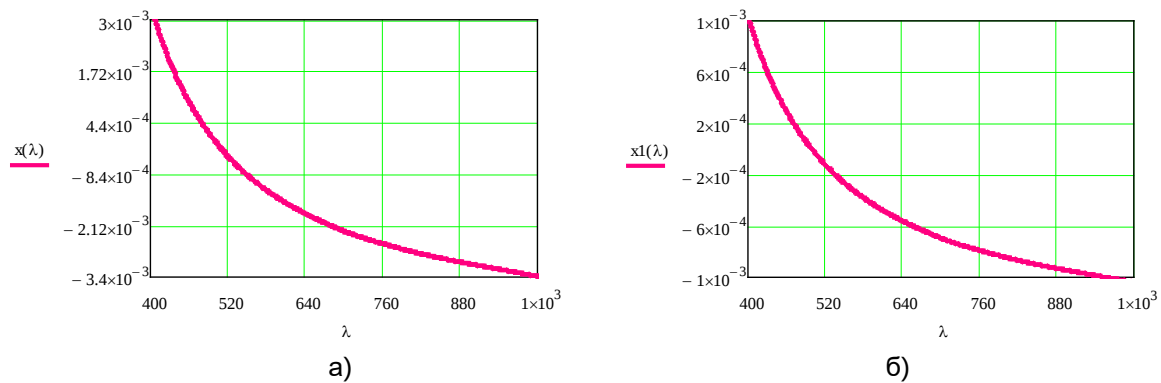


Рисунок 10. Соответствия проекционной координаты  $x$  длине волны: а при  $f_n = 65$  мм, б при  $f_n = 20$  мм

Приведенные рисунки показывают, что при увеличении количества щелей необходимо изменять коэффициент передачи оптического тракта. Спектральное разрешение определяется по формуле:  $\Delta\lambda = \frac{a}{2f_k} \sqrt{\sin^2(A/2) - n^2} \left(\frac{dn}{d\lambda}\right)^{-1}$ , где  $a$  – высота щели;  $f_k$  – фокусное расстояние коллиматорного объектива.

Ширина спектральных каналов:  $\Delta\lambda_k = \frac{p}{2f_p} \sqrt{\sin^2(A/2) - n^2} \left(\frac{dn}{d\lambda}\right)^{-1}$ , где  $p$  – размер пикселя;  $f_p$  – фокусное расстояние объектива переноса.

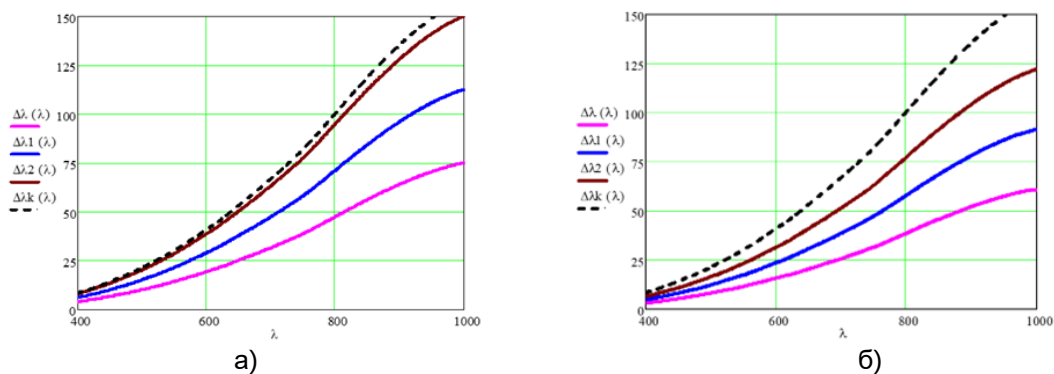


Рисунок 11. Спектральное разрешение  $\Delta\lambda$  и ширина спектральных каналов  $\Delta\lambda_k$ : а – при  $f_k = 65$  мм  $\Delta\lambda$  при ширине щели 10 мкм,  $\Delta\lambda$  при ширине щели 15 мкм,  $\Delta\lambda_2$  при ширине щели 20 мкм; б – при  $f_k = 80$  мм  $\Delta\lambda$  при ширине щели 10 мкм,  $\Delta\lambda$  при ширине щели 15 мкм,  $\Delta\lambda_2$  при ширине щели 20 мкм

На рисунке 11 а показано изменение спектрального разрешения в зависимости от ширины щели при  $f_k = 65$  мм, а на рисунке 12 б при  $f_k = 80$  мм, фокусное расстояние объектива переноса  $f_p = 20$  мм.

При изменении длины волны от 400 нм до 1000 нм спектральное разрешение ухудшается примерно в 16 раз. Если отношение  $\Delta\lambda/\Delta\lambda_k < 1$ , то спектры ГС не перекрываются. Из-за не идеальности оптической системы возможны в ГС два вида дисторсий. Дисторсия «keystone», трапецеидальное искажения, которые свойственны для линз и объективов и дисторсии «smile», улыбка, прогиб спектральных линий, рисунок 12 а. Дисторсии «smile», возникают из-за того, что входная щель имеет конечные значения ширины и высоты, поэтому лучи падающие на призму из точек щели выше и ниже оси коллиматора пересекут призму под углом к главному сечению. Чем дальше точка от центра щели, тем сильнее лучи отклоняются к основанию призмы. Спектральная линия искривляется по дуге окружности с выпуклостью, обращенной в длинноволновую область.

Смещение  $\Delta x$  относительно координаты  $x$  в главном сечении для минимума отклонения равно:

$$\Delta x = \left(\frac{y}{f_k}\right)^2 \frac{f_n(n^2-1)}{n \cdot \sqrt{\sin^2\left(\frac{A}{2}\right) - n^2}}$$

На рисунке 12 б показано смещение спектральной линии  $\Delta x$  для щели длиной  $y = 12$  мм.

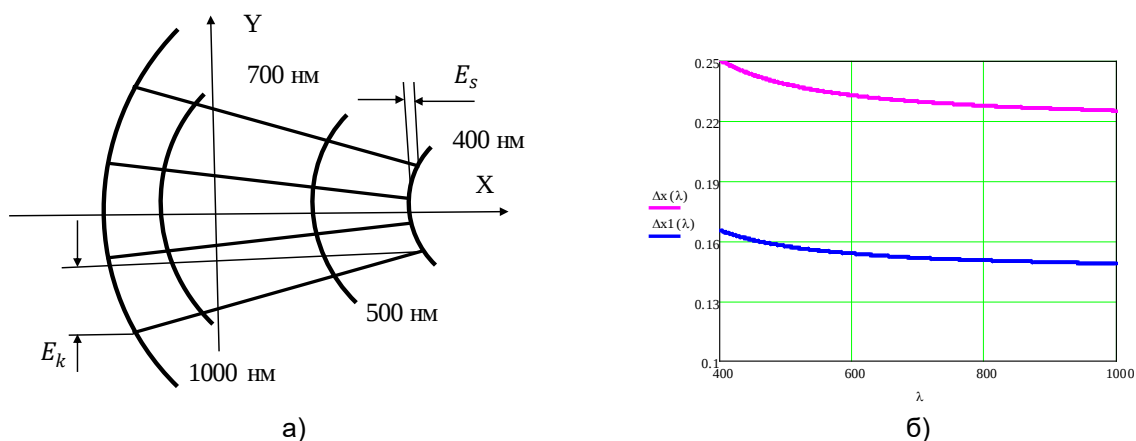


Рисунок 12. Изображение на сенсоре, образованное спектральными и пространственными изолиниями (а); зависимость смещения спектральной линии от длины волны (б):  $\Delta x$  при  $f_k = 65$  мм,  $\Delta x_1$  при  $f_k = 80$  мм

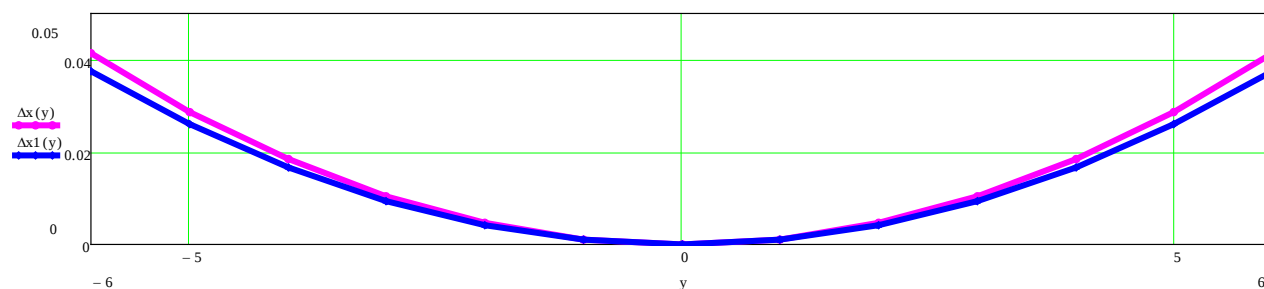


Рисунок 13. Спектральные линии:  $\Delta x$  для длины волны  $\lambda = 0,4$  мкм;  $\Delta x_1$  для длины волны  $\lambda = 0,9$  мкм

На рисунке 13 показаны спектральные линии для длин волн  $\lambda = 0,4$  мкм и  $\lambda = 0,9$  мкм, при  $f_k = 80$  мм. Радиус кривизны спектральной линии равен:  $R = \frac{\left(\frac{y}{2}\right)^2 - \Delta x^2}{2\Delta x}$ .

Искривление спектральных линий ГС, это второй недостаток спектрометра, что приводит к «рассыпанию» яркости пиксела по соседним пикселям. Зная радиус кривизны спектральной линии, можно собрать «осколки» пиксела и выпрямить спектральную линию.

Чувствительность ГС уменьшается из-за деления светового потока на 2 на выходе входного объектива  $k = 2$ ; потерь в оптической системе  $\tau \sim 0,4$ ; виньетирования изображения по краям изображения  $v \sim 4$ ; различной квантовой эффективности сенсора по спектру  $\gamma$  до 7. Можно считать, сигнал на выходе сенсора при равных условиях при установке его в ГС уменьшается примерно в  $K \sim 100$  раз. Две последние потери чувствительности ГС можно компенсировать при обработке видеосигнала при не превышении заданного отношения сигнал/шум. В таблице 3 приведены значения освещенности от Солнца.

Таблица 3. Значения освещенности

| Условия               | Освещенность, лк |
|-----------------------|------------------|
| Яркое солнце          | 50 000–100 000   |
| Солнечный день в тени | 5000–7000        |
| Пасмурный день        | 500–1000         |
| Заход солнца          | 100–130          |

Количество электронов, накопленное в потенциальной яме сенсор, а равно:  $NSF = XS(\lambda) \times CE(\lambda) \times \frac{\lambda}{h \times c} \times T \times A \times P \times (1/K)$ , где  $XS(\lambda)$  – спектральное излучение Солнца, рисунок 8а;  $CE(\lambda)$  – квантовая чувствительность сенсора, рисунок 8б;  $\lambda$  – длина волны от 400нм до 1000нм;  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света;  $T=33$ мс – время экспозиции;  $A=p^2$  – площадь пиксела;  $P=10^{-3}$  Вт – энергетическая облученность (1Вт=1/683лк);  $K$  – коэффициент ослабления. На рисунке 14 показано количество накопленных в потенциальной яме электронов при определенных выше условиях.

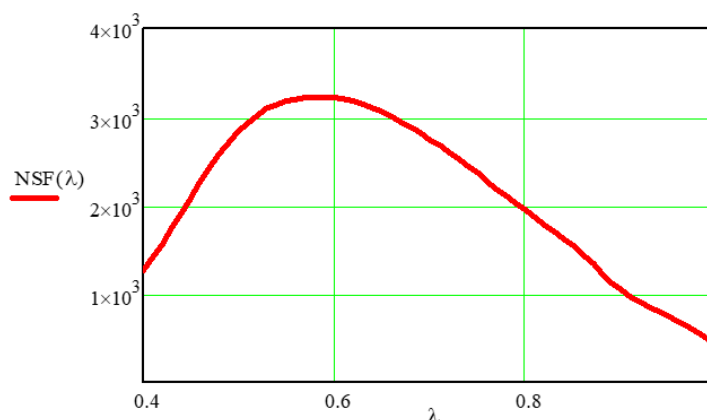


Рисунок 14. Количество накопленных электронов при освещенности 1 лк

Учитывая, что шум считывания сенсора составляет не более 4ε, ГС на сенсоре GSENSE2020 имеет большой запас по чувствительности, что обеспечит возможность работы ГС в сумерках. Имеется дополнительная возможность повышения чувствительности в обмен на разрешающую способность путем бинирования.

### **Заключение**

Применение современных мегапиксельных высокочувствительных матричных фотоприемников обеспечивает возможность технической реализации многоракурсной (многощелевой) гиперспектральной системы.

Полученная за один кадр спектральная многоракурсная картина позволяет оперативно оценить состояние поверхности в «точке» (по линии щели), а принцип сканирования по пространственной координате обеспечивает возможность формирования непрерывного потока спектральных измерений.

Управление кадровой частотой ГСС позволяет регулировать объемом поступающей видеоинформации с целью устранения избыточности и повышения быстродействия системы в целом.

### **Список литературы**

1. Gitelson A. Remote sensing estimation of crop biophysical characteristics at various scales // *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation* / P. S. Thenkabail, J. G. Lyon, A. Huete and eds. Boca Raton, FL, USA, 2011. P. 329-358. DOI: 10.1201/b11222-21
2. Hunt E. R., Daughtry, C. S. T. What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? // *International Journal of Remote Sensing*. 2017. 39(4). 1-32. DOI: 10.1080/01431161.2017.1410300
3. Aasen H., Honkavaara E., Lucieer A., Zarco-Tejada P. J. Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: A review of sensor technology, measurement procedures, and data correction workflows // *Remote Sensing*. 2018. 10(7). 1091. DOI: 10.3390/rs10071091
4. Kanning M., Kühling I., Trautz D., Thomas Jarmer T. High-Resolution UAV-Based Hyperspectral Imagery for LAI and Chlorophyll Estimations from Wheat for Yield Prediction // *Remote Sensing*. 2018. 10(2). 2000. DOI: 10.3390/rs10122000
5. Грушко Г. В., Линченко С. Н., Хан В. В. Характеристики и условия распространения фузариоза колоса на посевах озимой пшеницы южных регионов России // *Современные проблемы науки и образования*. 2005. 2. 70-73. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=6214> (Дата обращения: 27.10.2023).
6. Yang B., Wang M., Sha Z., Wang B., Chen J., Yao X., Cheng T., Cao W., Zhu Y. Evaluation of Aboveground Nitrogen Content of Winter Wheat Using Digital Imagery Unmanned Aerial Vehicles // *Sensors*. 2019. 16(20). 4416. DOI: 10.3390/s19204416
7. Yue J., Yang G., Tian Q., Feng H., Xu K., Zhou C. Estimate of winter-wheat above-ground biomass based on UAV ultrahigh-ground-resolution image textures and vegetation indices // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019. 150. 226-244. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.02.022

8. Гареев В. М., Гареев М. В., Лебединский Н. И., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Гиперспектральная система видимого диапазона на базе интерферометра Фабри-Перо // Вестник НовГУ. 2022. 3(128). 78-83. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).78-83

9. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Особенности формирования изображений в гиперспектральной системе на базе интерферометра Фабри-Перо // Вопросы радиоэлектроники Серия. Техника телевидения. 2023. 1. 128-132.

10. Калинина А. П., Орлов А. Г., Родионов И. Д. Авиационный гиперспектрометр // Вестник Московского государственного технического университета им. Баумана. Серия: Приборостроение. 2006. 3(64). 11-24.

11. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Методы повышения четкости цифровых телевизионных спектральных изображений // Вопросы радиоэлектроники. Серия. Техника телевидения. 2023. Вып. 2. 19-24.

12. GSESE Series // Gpixel: официальный сайт. URL: [https://www.gpixel.com/en/pro\\_details\\_1193.html](https://www.gpixel.com/en/pro_details_1193.html) (Дата обращения: 31.10.2023).

13. Гоголева Е. М., Фарафонтова Е. П. Прикладная оптика. Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2016. 184 с.

14. Виноградов А. Н., Егоров В. В., Калинин А. П., Мельникова Е. М., Родионов А. И., Родионов И. Д., Сысоева Е. Я. Многокурсовый гиперспектрометр для аэрокосмического дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. 10(2). 316-326.

15. Ильин Р. С., Федотов Г. И., Федин Л. А. Лабораторные оптические приборы. Москва: Машиностроение, 1966. 496 с.

## References

1. Gitelson A. Remote sensing estimation of crop biophysical characteristics at various scales // Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation / P. S. Thenkabail, J. G. Lyon, A. Huete and eds. Boca Raton, FL, USA, 2011. P. 329-358. DOI: 10.1201/b11222-21

2. Hunt E. R., Daughtry, C. S. T. What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? // International Journal of Remote Sensing. 2017. 39(4). 1-32. DOI: 10.1080/01431161.2017.1410300

3. Aasen H., Honkavaara E., Lucieer A., Zarco-Tejada P. J. Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: A review of sensor technology, measurement procedures, and data correction workflows // Remote Sensing. 2018. 10(7). 1091. DOI: 10.3390/rs10071091

4. Kanning M., Kühling I., Trautz D., Thomas Jarmer T. High-Resolution UAV-Based Hyperspectral Imagery for LAI and Chlorophyll Estimations from Wheat for Yield Prediction // Remote Sensing. 2018. 10(2). 2000. DOI: 10.3390/rs10122000

5. Grushko G. V., Linchenko S. N., Khan V. V. Kharakteristiki i usloviia rasprostraneniia fuzarioza kolosa na posevakh ozimoi pshenitsy iuzhnykh regionov Rossii [Characteristics and conditions of distribution of the head blight of winter wheat in the southern regions of Russia] // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia. 2005. 2. 70-73. Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=6214> (Accessed: 27.10.2023).

6. Yang B., Wang M., Sha Z., Wang B., Chen J., Yao X., Cheng T., Cao W., Zhu Y. Evaluation of Aboveground Nitrogen Content of Winter Wheat Using Digital Imagery Unmanned Aerial Vehicles // Sensors. 2019. 16(20). 4416. DOI: 10.3390/s19204416

7. Yue J., Yang G., Tian Q., Feng H., Xu K., Zhou C. Estimate of winter-wheat above-ground biomass based on UAV ultrahigh-ground-resolution image textures and vegetation indices // ISPRSJ. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2019. 150. 226-244. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.02.022
8. Gareev V. M., Gareev M. V., Lebedinskii N. I., Kornyshev N. P., Serebriakov D. A. Giperspektral'naia sistema vidimogo diapazona na baze interferometra Fabri – Pero [Hyperspectral visible range system based on the Fabry-Pérot interferometer] // Vestnik NovSU. 2022. 3(128). 78-83. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).78-83
9. Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebriakov D. A. Osobennosti formirovaniia izobrazhenii v giperspektral'noi sisteme na baze interferometra Fabri-Pero [Features of image formation in a hyperspectral system based on the Fabry-Perot interferometer] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniia. 2023. 1. 128-132.
10. Kalinin A.P., Orlov A. G., Rodionov I. D. Aviatsionnyi giperspektrometr [Aviation hyper-spectrometer] // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2006. 3(64). 11-24.
11. Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebriakov D. A. Metody povysheniia chetkosti tsifrovyykh televizionnykh spektral'nykh izobrazhenii [Methods of increasing the clarity of digital television spectral images] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniia. 2023. 2. 19-24.
12. GSESE Series // Gpixel: official website. Available at: [https://www.gpixel.com/en/pro\\_details\\_1193.html](https://www.gpixel.com/en/pro_details_1193.html) (Accessed: 31.10.2023).
13. Gogoleva E. M., Farafontova E. P. Prikladnaia optika [Applied optics]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. Un-ta, 2016. 184 p.
14. Vinogradov A. N., Egorov V. V., Kalinin A. P., Mel'nikova E. M., Rodionov A. I., Rodionov I. D., Sysoeva E. Ia. Mnogorakursnyi giperspektrometr dlia aerokosmicheskogo distantsionnogo zondirovaniia Zemli [Multi-angle push-broom hyperspectrometer for Earth remote sensing] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2013. 10. 2. 316-326.
15. Il'in R. S., Fedotov G. I., Fedin L. A. Laboratornye opticheskie pribory [Laboratory optical instruments]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 496 p.

#### Информация об авторах

*Гареев Владимир Михайлович* – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией «Техническое зрение», Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород), ORCID: 0009-0003-1585-6792, Vladimir.Gareev@novsu.ru

*Гареев Михаил Владимирович* – ведущий инженер лаборатории «Техническое зрение», Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID 0009-0007-1392-2169, Mikhail.Gareev@novsu.ru

*Корнышев Николай Петрович* – доктор технических наук, доцент, профессор, инженер лаборатории «Техническое зрение», Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород), ORCID: 0009-0005-3177-2040, Nikolai.Kornishev@novsu.ru

*Серебряков Дмитрий Александрович* – инженер лаборатории «Техническое зрение», Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0000-5994-5090, s231099@std.novsu.ru

*Карачинов Владимир Александрович* – доктор технических наук, профессор, профессор, ведущий научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-9252-2233, Vladimir.Karachinov@novsu.ru

*Гаверушко Валерий Владимирович* – доктор технических наук, профессор, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-8704-6751, Valery.Gavrushko@novsu.ru

*Быстров Николай Егорович* – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0009-1998-8868, Nikolay.Bystrov@novsu.ru