

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ ШИРОКОЗАХВАТНОГО ОПТОЭЛЕКТРОННОГО СКАНЕРА С СИСТЕМОЙ РЕГИСТРАЦИИ, ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

*М. Н. КОВАЛЕНКО<sup>1)</sup>, А. А. МИНЬКО<sup>1)</sup>,  
Я. И. ДИДКОВСКИЙ<sup>1)</sup>, М. Р. ПОСЛЕДОВИЧ<sup>1)</sup>, С. Н. ШАРАШКИН<sup>1)</sup>*

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Представлен ряд наиболее значимых научных результатов, полученных на кафедре физической оптики и прикладной информатики при выполнении заданий по программам Союзного государства «Космос-НТ» и «Мониторинг-СГ». В рамках последней создан экспериментальный образец оптоэлектронного сканера с системой регистрации, хранения и обработки данных в составе многоспектрального инфракрасного радиометра. Анализируется структура указанного образца и технические характеристики его составных частей: аппаратуры управления фотоприемным устройством, специализированного видеопроцессора, блока синхронизации, блока углового сканирования и калибратора инфракрасного фотоприемника.

**Ключевые слова:** экспериментальный образец; фотоприемное устройство; оптоэлектронный сканер; видеопроцессор; калибратор инфракрасного фотоприемника.

### Образец цитирования:

Коваленко МН, Минько АА, Дидковский ЯИ, Последович МР, Шарашкин СН. Экспериментальный образец широкозахватного оптоэлектронного сканера с системой регистрации, хранения и обработки данных. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2018;3:31–37.

### For citation:

Kovalenko MN, Minko AA, Didkovsky YI, Pasliadovich MR, Sharashkin SN. Prototype of a wide-angle optoelectronic scanner with a system for data recording, storage, and processing. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2018;3: 31–37. Russian.

### Авторы:

**Максим Николаевич Коваленко** – заведующий научно-исследовательской лабораторией спектроскопических систем кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета.

**Анатолий Антонович Минько** – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой физической оптики и прикладной информатики физического факультета.

**Ярослав Иванович Дидковский** – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории спектроскопических систем кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета.

**Михаил Романович Последович** – кандидат физико-математических наук, доцент; ведущий инженер кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета.

**Сергей Николаевич Шарашкин** – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории спектроскопических систем кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета.

### Authors:

**Maksim N. Kovalenko**, head of the research and development laboratory of spectroscopic systems, department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.

*kovalenkom@bsu.by*

**Anatoli A. Minko**, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.

*minko@bsu.by*

**Yaroslav I. Didkovsky**, senior researcher of the research and development laboratory of spectroscopic systems, department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.

*yaroslav-didkovskij@yandex.ru*

**Mikhail R. Pasliadovich**, PhD (physics and mathematics), docent; leading engineer at the department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.

*posledov@bsu.by*

**Sergei N. Sharashkin**, senior researcher of the research and development laboratory of spectroscopic systems, department of physical optics and applied informatics, faculty of physics.

*sharashkin@bsu.by*

## PROTOTYPE OF A WIDE-ANGLE OPTOELECTRONIC SCANNER WITH A SYSTEM FOR DATA RECORDING, STORAGE, AND PROCESSING

*M. N. KOVALENKO<sup>a</sup>, A. A. MINKO<sup>a</sup>, Y. I. DIDKOVSKY<sup>a</sup>,  
M. R. PASLIADOVICH<sup>a</sup>, S. N. SHARASHKIN<sup>a</sup>*

<sup>a</sup>*Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

*Corresponding author: A. A. Minko (minko@bsu.by)*

Most significant scientific results obtained at the department of physical optics and applied informatics in this field within the scope of the Union State Research Programs «Kosmos-ST» and «Monitoring-US» are presented. The goal of the Monitoring-US Project was the development and manufacturing of a prototype of the optoelectronic scanner with a system for data recording, storage, and processing as a part of a multispectral infrared radiometer. The structure of the developed prototype is analyzed; the technical characteristics of its components such as the control equipment of photodetector device, specialized video processor, synchronization unit, angular scanning unit, and infrared photodetector calibrator are given.

**Key words:** prototype; photodetector device; optoelectronic scanner; video processor; infrared photodetector calibrator.

### Введение

Научные исследования по созданию антенн космических аппаратов начались в Белорусском государственном университете в 1970-х гг. под руководством ректора БГУ академика А. Н. Севченко и проректора по научной работе Л. В. Володько.

В области разработки аппаратуры и методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса исследования начаты в 1985 г., возглавляемые ректором БГУ академиком Л. И. Киселевским и в ту пору кандидатом физико-математических наук Б. И. Беляевым (ныне – доктор физико-математических наук, профессор).

На кафедре физической оптики<sup>1</sup> работы по созданию аппаратуры для зондирования Земли в инфракрасном (ИК) диапазоне ведутся с 2003 г. (А. А. Минько, М. Н. Коваленко) по программам Союзного государства «Космос-СГ», «Космос-НТ» [1; 2] и «Мониторинг-СГ» [3].

Мониторинг окружающей среды и чрезвычайных ситуаций невозможен без привлечения данных наблюдения Земли из космоса. В настоящее время для съемок из космоса наиболее часто используются многоспектральные оптико-механические системы (сканеры), установленные на искусственных спутниках Земли различного назначения. При помощи таких систем формируются изображения, состоящие из множества отдельных, последовательно получаемых элементов. Термин «сканирование» обозначает развертку изображения при помощи сканирующего элемента (качающегося или вращающегося зеркала), поэлементно просматривающего местность поперек движения носителя и посылающего лучистый поток в объектив и далее на точечный датчик, преобразующий световой сигнал в электрический. Сканируемые изображения можно получить во всех спектральных диапазонах, но особенно эффективными являются видимый и ИК-диапазон [4; 5].

В данной работе рассматриваются вопросы разработки спектральной аппаратуры для ДЗЗ в ИК-области спектра. Эффективность аэрокосмической ИК-съемки обусловлена устойчивыми индикационными свойствами температурного поля многих объектов и явлений на земной поверхности, которые не обнаруживаются другими дистанционными методами. Важным достоинством ИК-съемки является возможность получать информацию как в дневное, так и в ночное время.

### Структурная схема экспериментального образца широкозахватного оптоэлектронного сканера с системой регистрации, хранения и обработки данных

Нами был разработан и изготовлен экспериментальный образец (ЭО) широкозахватного оптоэлектронного сканера с системой регистрации, хранения и обработки данных в составе многоспектрального ИК-радиометра для спутников ДЗЗ. Работа проводилась совместно с ФГУП «ЦНИИМаш», где был

<sup>1</sup>Кафедра физической оптики создана в сентябре 1953 г. Возглавил кафедру А. Н. Севченко и руководил ею до 1978 г. Позже кафедру возглавляли: М. Р. Последович (1978–1979), А. М. Бельский (1979–1981), И. П. Зятьков (1981–1993). С 1993 г. кафедрой физической оптики (с 1 сентября 2017 г. – кафедра физической оптики и прикладной информатики) руководит А. А. Минько.

получен многоэлементный многоспектральный ИК-фотоприемник и оптическая система формирования изображения, а также с Государственным оптическим институтом имени С. И. Вавилова, где проводятся работы по созданию многоэлементного матричного многоспектрального ИК-фотоприемника и ИК-телескопа.

ЭО широкозахватного оптоэлектронного сканера с системой регистрации, хранения и обработки данных включает: аппаратуру управления фотоприемным устройством (ФПУ), специализированный видеопроцессор (СВ) для ФПУ, блок синхронизации, блок углового сканирования, калибратор ИК-фотоприемника с электронно-механическим приводом. Схема подключения составных частей приведена на рис. 1.



Рис. 1. Подключение составных частей ЭО широкозахватного оптоэлектронного сканера  
Fig. 1. Connection of the components of the prototype of a wide-angle optoelectronic scanner

Аппаратура управления ФПУ предназначена для регистрации изображения с четырех либо шести матричных ИК-фотоприемников. Она также позволяет контролировать их основные электрические параметры и измерять рабочие напряжения и температуру. С помощью системы формируются все постоянные и импульсные напряжения управления мультиплексором фотоприемников. Постоянные напряжения регулируются с помощью 12-разрядных цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). Выходной сигнал фотоприемника поступает на 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) блока, преобразуется в цифровую форму и передается в компьютер, где происходит измерение его параметров.

Входящий в систему контроллер формирования синхросигналов и видео ЦАП обеспечивает создание композитного видеосигнала для просмотра изображения с ИК-фотоприемника на телевизионном мониторе.

Аппаратура управления ФПУ состоит из электронных блоков с интерфейсом LVDS для скоростной передачи данных видеопроцессору, формирования управляющих сигналов в соответствии с циклограммой работы радиометров и считывания данных от 16-разрядных АЦП. На рис. 2 показаны соединения отдельных блоков между собой и с фотоприемниками.



Рис. 2. Структурная схема аппаратуры управления ФПУ  
Fig. 2. Block diagram for the photodetector control unit

Питание аппаратуры осуществляется от компьютера по интерфейсным кабелям USB или LVDS.  
Основные технические характеристики аппаратуры управления ФПУ:

Число выходных каналов постоянных регулируемых напряжений	24
Число выходных каналов импульсных регулируемых напряжений	15
Диапазон регулировки постоянных напряжений	0–5 В
Погрешность установки постоянных и импульсных напряжений	±1 %
Число входных каналов АЦП	24
Амплитуда входного напряжения блока АЦП	5 В
Число разрядов АЦП	16
Цена младшего разряда АЦП	0,5 мВ
Число входных информационных каналов TTL	2
Число выходных информационных каналов TTL	2

Число LVDS-интерфейсов 240 Мб/с	1
Число USB-интерфейсов	1
Число RS422-интерфейсов	1

СВ предназначен для регистрации изображений с четырех либо шести матричных ИК-фотоприемников с записью на накопитель полученных данных. Он также позволяет устанавливать параметры регистрации ИК-изображений, длительность сеанса записи, основные электрические параметры ИК-фотоприемников и измерять рабочие напряжения и температуру фотоприемников, поскольку соединен посредством интерфейса USB с аппаратурой управления ФПУ. СВ может использоваться в стендах выходного и входного контроля фотоприемников при их производстве и проведении испытаний.

Видеопроцессор обеспечивает вывод видеосигнала каждого фотоприемного модуля на стандартный монитор (дисплей), предварительную обработку зарегистрированных данных и формирование массивов данных в соответствии с топологией размещения чувствительных элементов, запись и вычитание темнового сигнала, коррекцию чувствительности и хранение.

В процессе регистрации сигнала с ФПУ видеопроцессор сохраняет в память информацию объемом до 4 Гб для последующей обработки и воспроизведения управляющим компьютером. СВ обеспечивает синхронизацию процесса считывания данных со всех ФПУ как под программным управлением, так и по поступлению внешнего синхросигнала. Период поступления синхросигнала составляет не менее 2 мс и задается с точностью до  $\pm 1\%$ .

Видеопроцессор состоит из следующих электронных компонентов (рис. 3): блока центрального процессора PC104+, твердотельного SATA-диска, модуля памяти кадров, модуля цифровой обработки видеопотока реального времени, блока питания.

Модуль цифровой обработки видеопотока реального времени предназначен для высокоскоростного (до 240 Мб/с) обмена данными с компьютером и модулем фотоприемников. Он обеспечивает передачу и прием 32-разрядных данных в компьютер по шине PCI 33/66 МГц. Модуль соединяется с компьютером через интерфейс PC104+. Структурная схема модуля приведена на рис. 4.

Интерфейс, буферное ОЗУ данных, ОЗУ коэффициентов коррекции и темнового тока фотоприемника, а также интерфейс к фотоприемнику реализованы в программируемой ПЛИС. PCI-интерфейс выполнен в виде ядра на языке VHDL. LVDS-интерфейс к модулю фотоприемника изготовлен на базе схемы сериализатора-десериализатора DS92LV18.

Модуль содержит 32 цифровых канала ввода-вывода, снабженных буферными усилителями, обеспечивающими его защиту при подключении к внешним устройствам.

В модуле с исполнением PC104+ дополнительно содержится ЦАП AD5328 с 8 аналоговыми выходами. Значение выходных напряжений задается с помощью управляющей программы компьютера. Кроме ЦАП, модуль с исполнением PC104+ содержит 16-разрядный АЦП AD7686 с цепями смещения для подключения датчиков температуры, встраиваемых в фотоприемник или систему.

Управляющая программа обеспечивает регулирование вышеперечисленных устройств, а также вывод в реальном масштабе времени выходного сигнала с фотоприемника на экран монитора.

СВ для фотоприемного устройства работает только с аппаратурой управления ФПУ и подключается с помощью интерфейсных кабелей LVDS (типа IEEE1394) и USB.

*Основные технические характеристики СВ:*

Число одновременно обслуживаемых фотоприемных устройств	4/6
Максимальная частота приема данных с ФПУ	30 МГц
Интерфейс видеоданных с аппаратурой управления ФПУ	LVDS
Управляющий интерфейс с аппаратурой управления ФПУ	RS422/USB
Интерфейс электронного ключа	USB
Буферная память темнового сигнала видеопроцессора	1 Мб
Буферная память коэффициентов коррекции сигнала видеопроцессора	1 Мб

Разработанный СВ обеспечивает электропитание аппаратуры управления ФПУ, установку необходимых режимов питания фотоприемника, измерение и запоминание массивов соответствующих выходных данных. Он содержит DSP-блоки для коррекции видеопотока со всех фотоприемных модулей в реальном времени.

Для регистрации изображения участка земной поверхности с помощью оптоэлектронного сканера в составе многоспектрального ИК-радиометра необходимо синхронизировать поток данных от ИК-фотоприемников с положением сканера и углом поворота сканирующего зеркала. Эту задачу решает

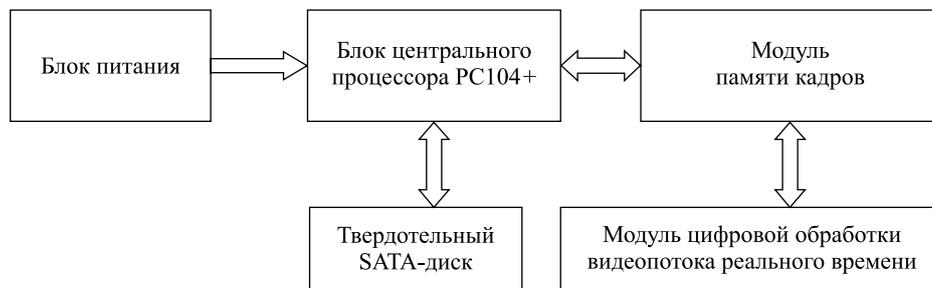


Рис. 3. Структурная схема СВ

Fig. 3. Block diagram of a specialized video processor

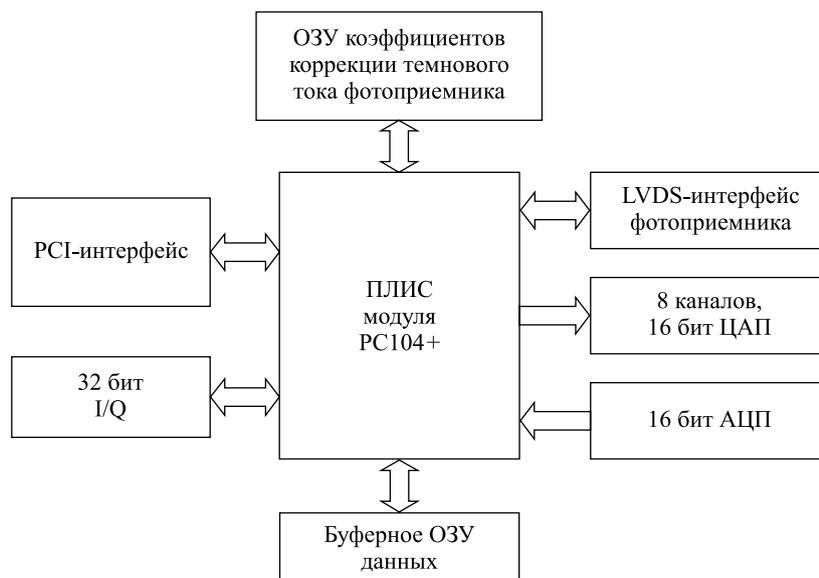


Рис. 4. Структурная схема модуля цифровой обработки видеопотока реального времени

Fig. 4. Block diagram of the digital processing module for real-time video stream

блок синхронизации, который конструктивно состоит из платы спутниковой навигации NV08C-CSM-BRD, оптоэлектронного датчика положения сканирующего зеркала и интерфейсных кабелей. Специализированная подпрограмма обеспечивает синхронизацию потока данных от ИК-фотоприемников с метками времени, полученными от блока синхронизации.

Плата спутниковой навигации обеспечивает определение положения (позиционирование) сканера с помощью спутников GLONASS и GPS и выработку импульсов, синхронизованных с часами спутников. Оптоэлектронный датчик положения сканирующего зеркала служит для калибровки данного положения в реперной точке.

ЭО широкозахватного оптоэлектронного сканера с системой регистрации, хранения и обработки данных в составе многоспектрального ИК-радиометра для спутников ДЗЗ представляет собой устройство для получения изображения объектов в тепловом диапазоне (тепловизор).

Чтобы иметь информацию о температуре наблюдаемых объектов, необходимо откалибровать приемник ИК-изображения как минимум по трем источникам излучения разной температуры. После калибровки тепловизор предоставляет не только визуальную, но и цифровую информацию о температуре объектов в каждой точке изображения. Такой тепловизор называется ИК-радиометром.

Абсолютно черное тело – главный источник калибровки для средне- и длинноволновых ИК-полос (от 3,5 до 14,4 мкм) – следует спроектировать так, чтобы получилась практически неотражающая поверхность, точно сохраняющая свою температуру и позволяющая определить температуру фотона с помощью ИК-радиометра по зрачку черного тела.

Автономный ИК-радиометр (управляемый дистанционно) должен иметь собственный встроенный калибратор, который генерирует тепловой поток от излучателя с его программно задаваемой температурой, что обеспечивает радиометрическую, спектральную и пространственную калибровку ИК-фотоприемника радиометра. В нашем случае эталонным излучателем служит нагреваемая пластина – модель абсолютно черного тела.

В БГУ разработан и изготовлен источник ИК-излучения – калибратор, который настраивается на заданную температуру в диапазоне 30–90 °С с точностью до  $\pm 0,01$  °С. В состав калибратора включен прецизионный датчик температуры на термометре сопротивления ТМ293-02, контроллер PID-регулятора на процессоре С8051F350, содержащий в составе 24-разрядный сигма-дельта АЦП, ШИМ-регулятор мощности нагревательного элемента черного тела, разработанного в Государственном оптическом институте имени С. И. Вавилова специально для использования в бортовых системах калибровки. Температура калибратора задается программно.

Конструкция черного тела – калибратора позволяет измерять температуру с помощью термометра сопротивления. Сопротивление нагревателя 0,6–0,7 Ом при нормальных атмосферных условиях. Максимально допустимый длительный режим эксплуатации 180 °С (кратковременно допустимо 200 °С). При 180 °С питание калибратора составляет приблизительно 3,5 В постоянного напряжения при токе 4 А. Для более быстрого нагрева до необходимой рабочей температуры проводились испытания с подачей напряжения 7–8 В при токе 8–9 А на короткое время.

Калибратор закрепляется на вращающемся диске с дополнительно установленным на нем зеркалом и широкоапертурной диафрагмой и размещается между оптической системой радиометра и ИК-фотоприемником. Таким образом, имеется возможность задать температуру калибровки, ввести калибратор в оптический путь радиометра, открыть последний для наблюдения объектов через оптическую систему или закрыть ИК-фотоприемник глухим зеркалом для фиксации собственных тепловых шумов приемника.

### Заключение

В разработанной и созданной аппаратуре применены электронные блоки обработки видеосигнала, включая коррекцию на темновые шумы и спектральную чувствительность фотоприемника. Эти блоки выполняют математические процедуры без привлечения процессоров, что обеспечивает более эффективное быстроедействие и минимальное использование ресурсов бортовой электроники по сравнению с существующими в настоящее время системами. Применение аппаратной записи видеосигнала в память бортового компьютера также приводит к экономии его ресурсов, при этом не используется режим прямого доступа (DMA) в память контроллера бортовой вычислительной системы.

Для всех блоков и ЭО оптоэлектронного сканера выполнены лабораторно-отладочные испытания в БГУ и НИИ ПФП имени А. Н. Севченко БГУ на стенде «Камелия» (рис. 5).

Разработаны программа и методика испытаний. Все блоки и системы ЭО широкозахватного оптоэлектронного сканера прошли метрологическую аттестацию в РУП «БелГИМ» (свидетельство о метрологической аттестации 01 № 10-50). В 2017 г. проведена апробация ЭО в ФГУП «ЦНИИМаш» (г. Королёв, Россия) (рис. 6), которая показала возможность использования данной аппаратуры для создания прототипа спутника ДЗЗ в ИК-диапазоне.

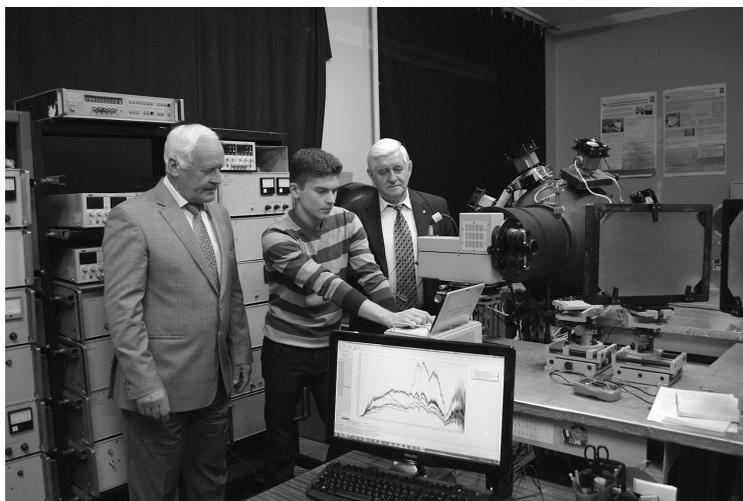


Рис. 5. Испытания блоков ЭО-сканера на комплексе «Камелия».

Аспирант Ю. А. Крот с научными руководителями  
Б. И. Беляевым (слева) и А. А. Минько (справа)

Fig. 5. Tests of blocks of the scanner prototype on the «Camellia» complex.

Graduate student Yu. A. Krot with his research supervisors  
B. I. Belyaev (left) and A. A. Minko (right)



Рис. 6. ЭО оптоэлектронного сканера в составе ИК-радиометра на апробации в ФГУП «ЦНИИМаш» (г. Королёв, Россия)

Fig. 6. Testing of the prototype of an optoelectronic scanner as a part of the TsNIIMash IR radiometer FSUE (Korolev, Russia)

Испытания доказывают уникальность полученного ЭО широкозахватного оптоэлектронного сканера многоспектрального ИК-радиометра с системой регистрации, хранения и обработки данных для спутников ДЗЗ и целесообразность его использования при создании аппаратуры ДЗЗ в России и Беларуси.

Представленная аппаратура универсальна и может использоваться с фотоприемными устройствами различного формата и спектрального диапазона.

### Библиографические ссылки

1. Коваленко МН, Минько АА, Понарядов ВВ, Последович МР, Шарашкин СН. Экспериментальный образец бортовой аппаратуры синтеза и предварительной обработки изображений ИК-диапазона. *Пятый Белорусский космический конгресс: материалы конгресса в 2 томах*. Минск: ОИПИ НАН Беларуси; 2011. Том 1. с. 312–314.
2. Коваленко МН, Минько АА, Понарядов ВВ, Последович МР, Шарашкин СН. Малогабаритный экспериментальный образец бортовой аппаратуры синтеза и предварительной обработки изображений высокого разрешения. *Пятый Белорусский космический конгресс: материалы конгресса в 2 томах*. Минск: ОИПИ НАН Беларуси; 2011. Том 1. с. 315–317.
3. Минько АА, Дидковский ЯИ, Коваленко МН, Последович МР, Шарашкин СН. Экспериментальный образец широкозахватного оптоэлектронного сканера с системой регистрации, хранения и обработки данных в составе многоспектрального ИК-радиометра для спутников дистанционного зондирования Земли. *Материалы VII Белорусского космического конгресса. 24–26 октября 2017 г.; Минск, Беларусь. Том 1*. Минск: ОИПИ НАН Беларуси; 2017. с. 252–258.
4. Беляев БИ, Крот ЮА, Минько АА. Приборы и методы зондирования Земли с космических аппаратов. *Физическая оптика в БГУ. Кафедре физической оптики 60 лет*. Минск: БГУ; 2013. с. 142–146.
5. Коваленко МН, Минько АА, Последович МР, Шарашкин СН. Экспериментальный образец бортовой аппаратуры синтеза и предварительной обработки изображений ИК-диапазона. *Физическая оптика в БГУ. Кафедре физической оптики 60 лет*. Минск: БГУ; 2013. с. 147–154.

### References

1. Kovalenko MN, Min'ko AA, Ponaryadov VV, Posledovich MR, Sharashkin SN. Eksperimental'nyi obrazets bortovoi apparatury sinteza i predvaritel'noi obrabotki izobrazhenii IK diapazona [Prototype of satellite-borne equipment for synthesis and preprocessing of IR images]. *Pyaty Belorusskii kosmicheskii kongress: congress proceedings in 2 volumes*. Minsk: United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus; 2011. Volume 1. p. 312–314. Russian.
2. Kovalenko MN, Min'ko AA, Ponaryadov VV, Posledovich MR, Sharashkin SN. Malogabaritnyi eksperimental'nyi obrazets bortovoi apparatury sinteza i predvaritel'noi obrabotki izobrazhenii vysokogo razresheniya [Compact experimental specimen of satellite equipment for synthesis and preprocessing of high-resolution images]. *Pyaty Belorusskii kosmicheskii kongress: congress proceedings in 2 volumes*. Minsk: United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus; 2011. Volume 1. p. 315–317. Russian.
3. Min'ko AA, Didkovskii YaI, Kovalenko MN, Posledovich MR, Sharashkin SN. Eksperimental'nyi obrazets shirokoxahvatnogo optoelektronnogo skanera s sistemoi registratsii, khraneniya i obrabotki dannykh v sostave mnogospetral'nogo IK-radiometra dlya sputnikov distantsionnogo zondirovaniya Zemli. *Materialy VII Belorusskogo kosmicheskogo kongressa. 24–26 oktyabrya 2017 g.; Minsk, Belarus'. Volume 1* [Prototype of a wide-angle optoelectronic scanner with a data recording, storage, and processing system as a part of the multispectral IR radiometer for satellite long-range probing of the Earth. Proceedings of the VII Belarusian Space Congress. 2017 October 24–26; Minsk, Belarus. Volume 1]. Minsk: United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus; 2017. p. 252–258. Russian.
4. Belyaev BI, Krot YuA, Min'ko AA. Pribory i metody zondirovaniya Zemli s kosmicheskikh apparatov [Devices and methods for the Earth probing from spacecraft]. *Fizicheskaya optika v BGU. Kafedre fizicheskoi optiki 60 let*. Minsk: BSU; 2013. p. 142–146. Russian.
5. Kovalenko MN, Min'ko AA, Posledovich MR, Sharashkin SN. Eksperimental'nyi obrazets bortovoi apparatury sinteza i predvaritel'noi obrabotki izobrazhenii IK-diapazona [Prototype of satellite-borne equipment for synthesis and preprocessing of IR images]. *Fizicheskaya optika v BGU. Kafedre fizicheskoi optiki 60 let*. Minsk: BSU; 2013. p. 147–154. Russian.