

Инфракрасный спектрометр: дизайн и предварительные результаты

А.В. Ролдугин, Ж.В. Дашкевич, О.М. Лебедь,
Ю.В. Федоренко, С.В. Пильгаев*

*Полярный геофизический институт КНЦ РАН
184209, г. Апатиты, Мурманская обл., Академгородок, 26а*

Поступила в редакцию 12.01.2011 г.

Инфракрасный меридиональный спектрометр МИКС создан с целью изучения спектрального состава и пространственного распределения свечения ночного неба и полярных сияний в ближней инфракрасной области спектра. Спектрометр позволяет получать спектральное изображение дуги вертикала небесной полусферы в диапазоне длин волн 730–900 нм со спектральным разрешением 0,7 нм и скоростью 4 кадр/мин.

Прибор был разработан и изготовлен в Полярном геофизическом институте Кольского научного центра РАН в 2008 г. в полевом варианте и может функционировать при любых погодных условиях. Оптическая схема спектрометра классическая, с пропускающей дифракционной решеткой. Спектрометр работал в патрульном режиме в обсерватории Полярного геофизического института «Сар Неег» на арх. Шпицберген во время зимнего наблюдательного сезона 2008/09 г. Результаты наблюдений показали, что спектрометр является эффективным средством исследования полярных сияний и свечений ночного неба и в комплексе с камерой всего неба обеспечивает освещение общей авроральной обстановки.

Ключевые слова: геофизические исследования, оптическая аппаратура, обработка экспериментальных данных, авроральная ионосфера; geophysical research, optical apparatus, data processing, auroral ionosphere.

Введение

Исследование эмиссий ночного неба и полярных сияний необходимо для изучения процессов, происходящих в ионосфере и магнитосфере. Пространственное распределение, вариации интенсивности и спектральный состав этих эмиссий несут в себе информацию о потоках высыпавшихся авроральных частиц и физико-химических процессах ионосферы. Вот почему в исследовании ионосферы и магнитосферы широко применяются оптические методы, в том числе и спектрометрические наблюдения. Большое распространение получил класс изображающих спектрометров, позволяющих получать распределение аврорального свечения в виде двумерного изображения [1–3].

Возможность ориентирования оси спектрометра вдоль геомагнитного меридиана, большое поле зрения и угловое разрешение спектрометра позволяют исследовать не только спектральный состав аврорального излучения, но и его пространственное распределение. Учитывая высокую чувствительность современных ПЗС и, соответственно, относительно малые времена экспозиции, можно определять параметры свечения с большим временным и пространственным

разрешением. Одним из представителей спектрометров данного класса является описываемый ниже прибор.

Меридиональный спектрометр инфракрасного диапазона (МИКС) был создан в Полярном геофизическом институте Кольского научного центра РАН в 2008 г. для исследований полярных сияний и свечения ночного неба в видимой красной и ближней инфракрасной областях спектра. Прибор дает спектральное изображение дуги вертикала в области длин волн 730–900 нм. С ноября 2008 по январь 2009 г. прибор эксплуатировался на арх. Шпицберген, синхронно с ним работала камера всего неба. Входящий в состав МИКС спектрометр ИК-180 выполнен в полевом варианте и способен работать как автономно, так и в составе сетевой системы сбора информации. В свою очередь, система сбора информации подключена к сети Интернет, через которую осуществляются контроль и управление прибора.

Описание прибора

Функциональная схема прибора МИКС приведена на рис. 1.

МИКС включает в себя собственно инфракрасный спектрометр ИК-180 и систему сбора информации. Прибор укомплектован вспомогательными устройствами, обеспечивающими настройку, калибровку, техническое обслуживание. Система сбора информации состоит из управляющего компьютера и подсистемы синхронизации с мировым временем.

* Алексей Валентинович Ролдугин (roldugin_a@pgia.ru); Жанна Владимировна Дашкевич (zhanna@pgia.ru); Ольга Михайловна Лебедь (olgamilsh@yandex.ru); Юрий Валентинович Федоренко (fedorenko@pgia.ru); Сергей Васильевич Пильгаев (pilgaev@pgia.ru).

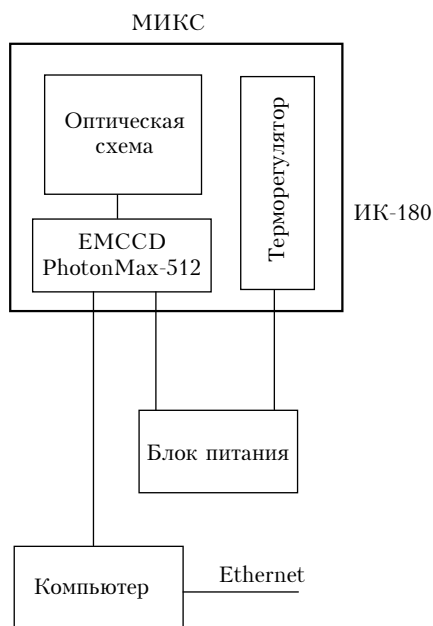


Рис. 1. Блок-схема комплекса инфракрасного меридионального спектрометра МИКС

Функционально инфракрасный спектрометр ИК-180 состоит из оптической схемы, CCD-фотоприемника и терморегулятора. Конструктивно ИК-180 представляет собой единый герметичный модуль. Технические параметры прибора представлены в табл. 1.

Оптическая схема инфракрасного спектрометра ИК-180 приведена на рис. 2.

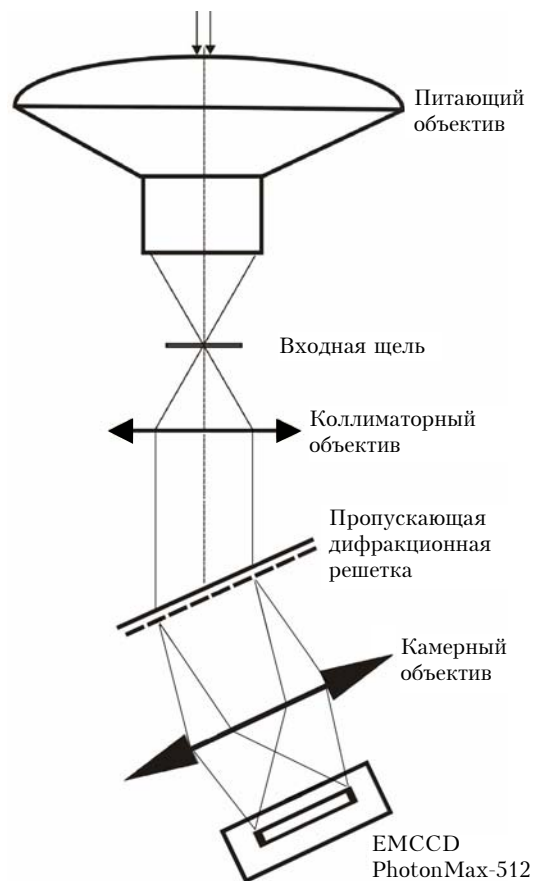


Рис. 2. Оптическая схема спектрометра ИК-180

Таблица 1

Технические параметры спектрометра ИК-180

Параметр	Значение	Дополнения
Спектральный диапазон	730–900 нм	–
Поле зрения вдоль щели	171 град	–
Поле зрения поперек щели	0,5 град	–
Угловое разрешение (вдоль щели)	0,7 град	поперек щели отсутствует
Спектральное разрешение	0,7 нм	–
Пороговая чувствительность	100 Р	для 844 нм
Динамический диапазон, ед. отсчетов АЦП	65 000	–
Скорость обновления данных	4 кадр/мин	патрульная
Рабочая температура, °С	–35...+30	для ИК-180
Температура хранения, °С	–40...+50	для ИК-180
Относительная влажность при эксплуатации, %	< 95	при +30 °С
Ветровая нагрузка, м/с	55	для ИК-180
Атмосферное давление, кПа	86...106	для ИК-180
Осадки		любой формы и интенсивности
Виброударные нагрузки, не более, <i>g</i>	10	до 2000 Гц
Сетевое напряжение питания, В	90...264	при 47 ÷ 63 Гц
Потребляемая мощность, Вт		для ИК-180
Габариты в рабочем положении, мм	550 × 280 × 300	для ИК-180
Масса в рабочем положении, кг	12	–
Масса комплекта МИКС, кг	27	–
Время непрерывной работы	не ограничено	–
Периодичность тех. обслуживания	ежегодная	–
Численность персонала, чел.	1	только для ТО

Спектрометр ИК-180 относится к классу изображающих спектрометров и как оптический прибор представляет собой щелевой спектрометр классической схемы с регулируемой входной щелью и коллиматорным объективом, пропускающей дифракционной решеткой и светосильным камерным объективом. В качестве фотоприемника использована ПЗС-камера PhotonMax-512, относящаяся к классу EMCCD приборов. Освещение входной щели производится питающим объективом типа «рыбий глаз». Отличительной особенностью спектрометра является максимально широкий угол зрения в сагитальной плоскости.

Питающий объектив FE185CO86HA1 [4] с полем зрения 185° служит для освещения входной щели, создавая изображение небесной полусферы в плоскости этой щели.

Входная регулируемая прямая щель расположена таким образом, что на нее проецируется изображение всей дуги вертикала, расположенной в плоскости местного геомагнитного меридиана. Регулировка ширины щели позволяет оптимизировать соотношение между разрешающей способностью и светосилой спектрометра. Каждая точка входной щели является световым источником для коллиматорного объектива спектрометра.

Коллиматорный объектив Canon EF 85 mm f/1.2L II USM [5] преобразует расходящийся из щели пучок лучей в параллельный, обеспечивая рабочий режим дифракционной решетки. Фокальные плоскости коллиматорного и камерного объективов лежат в плоскости входной щели.

Пропускающая дифракционная решетка разлагает в спектр падающий на нее параллельный пучок

света. Применена прозрачная дифракционная решетка с 600 штр./мм, оптимизированная для работы в спектральной области 600–1200 нм. Значение дисперсии выбирается изменением угла установки решетки.

В качестве камерного объектива используется светосильный объектив Canon EF 85 mm f/1.2L II USM [5], создающий в своей фокальной плоскости множество спектральных изображений входной щели. Вместе с коллиматорным объективом он трансформирует размер первичного изображения на входной щели к размеру вторичного изображения на поверхности фотоприемника.

В фокальной плоскости камерного объектива расположен фотоприемник – ПЗС-матрица камеры PhotonMax-512 [6]. Фотоприемник предназначен для преобразования сформированного оптической системой изображения в цифровой сигнал и передачи его в систему сбора и обработки информации. Выбор этой камеры обусловлен тем, что в избранной спектральной области она обладает высокой квантовой эффективностью (0,4–0,85), низким шумом считывания ($< 1 \text{ gms}$) и несущественным темновым шумом. Это позволяет реализовать высокую чувствительность при относительно коротких экспозициях.

Терморегулятор служит для поддержания температуры CCD-камеры в рабочем диапазоне $+10...20^\circ\text{C}$ и предотвращения обмерзания защитного блистера и оптических элементов прибора. Терморегулятор питается от собственного источника и работает вне зависимости от функционирования остальных систем прибора.

Основные характеристики составных частей МИКС приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики комплектующих ИК-180

<i>Осветительный объектив</i>	
Поле зрения, град	185
Фокусное расстояние, мм	2,7
Относительное отверстие	1:1,8 максимальное
Диаметр круга изобр., мм	8,64
Разрешение, центр/край, штр./мм	30/30
Спектральный коэффициент пропускания в рабочей области	0,6 минимальное значение
<i>Входная щель</i>	
Тип	прямолинейная
Длина, мм	20 рабочая длина – 9 мм
Ширина, мм	0,016
<i>Коллиматорный объектив</i>	
Фокусное расстояние, мм	85
Относительное отверстие	1:1,2
Поле зрения, град	23
Разрешение, центр/край, мм	35/35
Спектр. коэфф. пропускания	0,85 минимальное значение
<i>Дифракционная решетка</i>	
Тип	пропускающая
Рабочий порядок	1-й
Число штрихов на 1 мм	600
Размеры, мм	70 × 80 длина/ширина
Размер заштрихованной области	70 × 70
Эффективность в области 750–900 нм	0,5 минимальная
Угол установки, град	–6

Камерный объектив		
Фокусное расстояние, мм	85	
Относительное отверстие	1:1,2	
Поле зрения, град	28,5	
Разрешение, центр/край, мм	60/40	
Спектр. коэфф. пропускания	0,7	минимальное значение
ПЗС-камера		
Формат матрицы, пикс.	512 × 512	возможно суммирование
Размер пикселя, мм	0,016	
Размер матрицы, мм	8,192 × 8,192	
Квантовая эффективность	0,4–0,8	в рабочем диапазоне
Темновой ток, эл./пикс./с	0,005	при $T_{ПЗС} = -80^\circ\text{C}$
Шум считывания, эл.	< 1	
Динамический диапазон, ед. отсчетов АЦП	65 000	АЦП – 16 бит
Время считывания полного формата ПЗС-матрицы, с	0,028	
Тип интерфейса	RS-170	

В табл. 3 собраны характеристики типовых спектрометров ближнего инфракрасного диапазона, используемых в авроральных исследованиях.

Таблица 3

**Основные характеристики спектрометров
ближнего инфракрасного диапазона**

Характеристика	МИКС	СП-50 [1]	UNIS 1m-EF [2]
Спектральный диапазон, нм	730–900	700–1000	725–865
Поле зрения вдоль щели, град	171	7	5
Угловое разрешение (вдоль щели), град	0,7	0,04	–
Спектральное разрешение, нм	0,7	0,5	0,4
Пороговая чувствительность, Р	100	100	100
Динамический диапазон, ед. отсчетов АЦП	65 000	1024	102
Скорость обновления данных, кадр/мин	4	1	0,2

По сравнению с другими спектрометрами разработанный нами МИКС имеет увеличенное поле зрения вдоль щели, позволяющее синхронно регистрировать свечения как в зените, так и у горизонта, что затруднительно при использовании узкоугольных приборов. При проведении высокоширотных наблюдений мы можем исследовать процессы, протекающие и в полярной шапке, и в области аврорального овала. Более широкий, чем у приведенных в табл. 3 аналогов, динамический диапазон МИКС позволяет наблюдать яркие полярные сияния и слабые свечения ночного неба без изменения экспозиции. Детальные исследования временной и пространственной динамики авроральных процессов обеспечиваются высокой скоростью обновления данных. В то же время спектральный диапазон и спектральное разрешение прибора МИКС определялись комплексом возможных научных задач, ограничивающим эти значения 770–870 нм и 0,7 нм соответственно.

Система сбора информации

Программное обеспечение спектрометра выполнено на основе библиотек, предоставляемых компанией Princeton Instruments в комплекте с ПЗС-камерой. Программа работает автономно, действия оператора необходимы только для установки параметров работы камеры через специальный интерфейс. В число параметров входят время экспозиции, усиление на ПЗС-камере, температура ПЗС-матрицы, которую нужно поддерживать, интервал времени между кадрами и бинирование. При запуске программы происходит инициализация камеры данными значениями, после чего она выходит в автоматический режим, делая снимки и сохраняя их в файлах. Для работы с готовыми кадрами создана дополнительная программа, которая отслеживает появление новых снимков в каталоге данных и выводит на экран монитора текущий кадр. Все полученные камерой снимки направляются в WEB-сервер для удаленного мониторинга. Таймер компьютера синхронизирован с Мировым временем посредством протокола NTP [7], что дает погрешность в определении времени кадра порядка нескольких десятков миллисекунд. Для устранения внештатных ситуаций предусмотрен удаленный доступ к персональному компьютеру системы сбора через сеть Internet.

Эксплуатация прибора и обработка данных

МИКС работал в патрульном режиме в обсерватории «Сар Нег» п. Баренцбург в наблюдательный сезон 2008/09 г. с 26 ноября 2008 по 30 января 2009 г. Щель спектрометра была ориентирована вдоль геомагнитного меридиана (32° з.д. от географического севера). Установка осей прибора проводилась по времени и углу прохождения через плоскость щели Луны и ярких звезд. Оптическая ось прибора направлена в зенит, поле зрения перекрывает зенитный угол $-85,5 \div +85,5^\circ$. МИКС функционировал в комплексе

с другими оптическими приборами. В ходе наблюдений прибор продемонстрировал безотказность работы и информативность получаемых данных.

В каждом кадре ПЗС-камеры формируется набор спектральных изображений дуги вертикала размером 512×512 пикс. Вдоль одной из осей кадра проецируется изображение 171° большого круга, вдоль другой — спектральный диапазон 730–900 нм.

Изображение, сформированное ПЗС-камерой, несет в себе многочисленные аппаратурные искажения, затрудняющие его дальнейшую обработку. Основной вклад в деформацию изображения вносят геометрические искажения. К ним относятся кривизна изображений спектральных линий, обусловленная принципиальной aberrацией дифракционной решетки [8] и дисторсией коллиматорного и камерного объективов [9], и искажение профилей спектральных линий, обусловленные aberrациями объективов. К геометрическим искажениям можно отнести и рассогласование осей спектральной картины и осей ПЗС-матрицы.

Как показано в [8], в спектральных приборах, использующих в качестве диспергирующих элементов призмы и дифракционные решетки, имеет место такое искривление спектральных линий, когда прямая входная щель изображается в виде

$$y = x^2 k \lambda N / 2 F_2 \cos \varphi, \quad (1)$$

где

$$\varphi = \arcsin(k \lambda N + \sin \alpha). \quad (2)$$

Здесь k — порядок дисперсии; λ — текущая длина волны; N — число штрихов дифракционной решетки (ДР) на единицу длины; F_2 — фокусное расстояние камерного объектива; φ — угол дисперсии текущей λ

на данной дифракционной решетке; α — угол наклона плоскости дифракционной решетки к поверхности падающей волны.

Эти уравнения сложны для практического применения и не учитывают погрешностей, возникающих при изготовлении прибора. Поэтому вместо формул (1) и (2) мы использовали выражение

$$y = A + Bx + Cx^2, \quad (3)$$

значения коэффициентов A, B, C которого определяются экспериментальным путем. Использование (3) для преобразования изображения спектральной линии в прямую позволяет привести его к виду, удобному для дальнейшей обработки.

За время работы прибора получен набор спектрометрических данных интенсивности свечения ночного неба и полярных сияний в диапазоне длин волн 730–900 нм. На рис. 3, *a* представлен пример изображения, полученного во время полярного сияния 7 декабря 2008 г. Рис. 3, *б* показывает то же самое изображение, прошедшее процедуру устранения аппаратурных искажений. Здесь аргументом оси абсцисс является длина волны, оси ординат — угол зрения прибора. На изображениях хорошо прослеживаются дуги полярных сияний. Картина, снятая в это же время камерой всего неба, показана на рис. 3, *в*.

Пример получаемого из такого изображения спектра свечения представлен на рис. 4 для различных углов зрения прибора. Здесь же схематично отмечены наиболее яркие атомарные линии и молекулярные полосы: первой положительной системы молекулярного азота N_2 1PG, атмосферной системы полос молекулярного кислорода O_2 ATM, системы полос Мейнела N_2^+ M, системы полос OH.

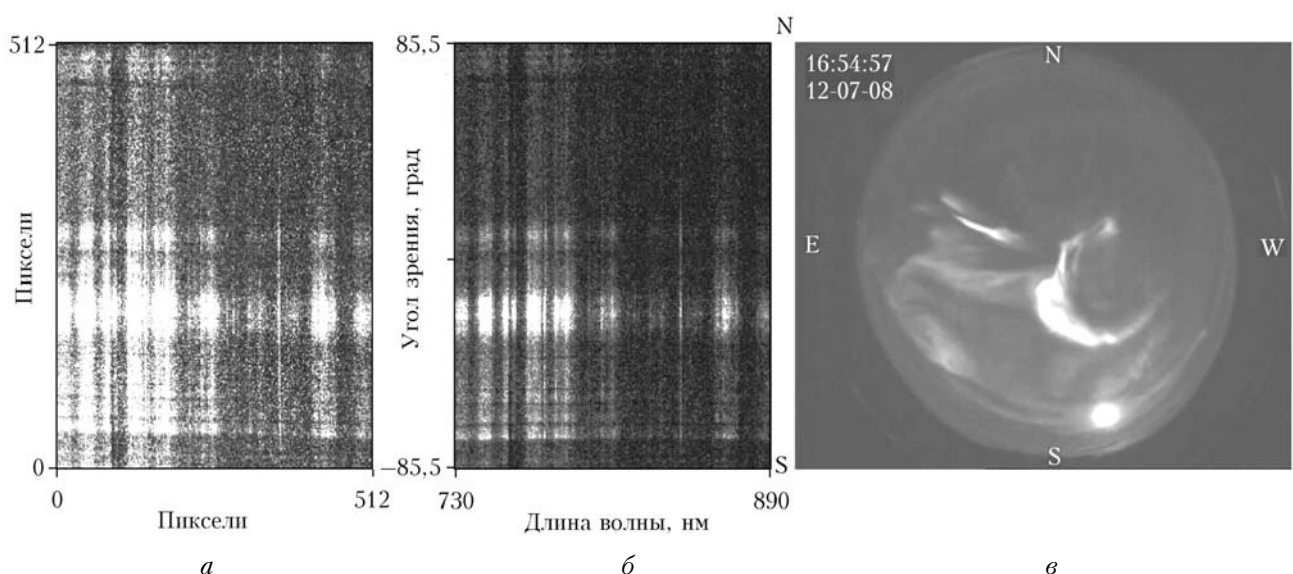


Рис. 3. Изображение, полученное спектрометром во время полярного сияния 7 декабря 2008 г. (*a*); то же изображение после устранения аппаратурных искажений (*б*); изображение камеры всего неба (*в*)

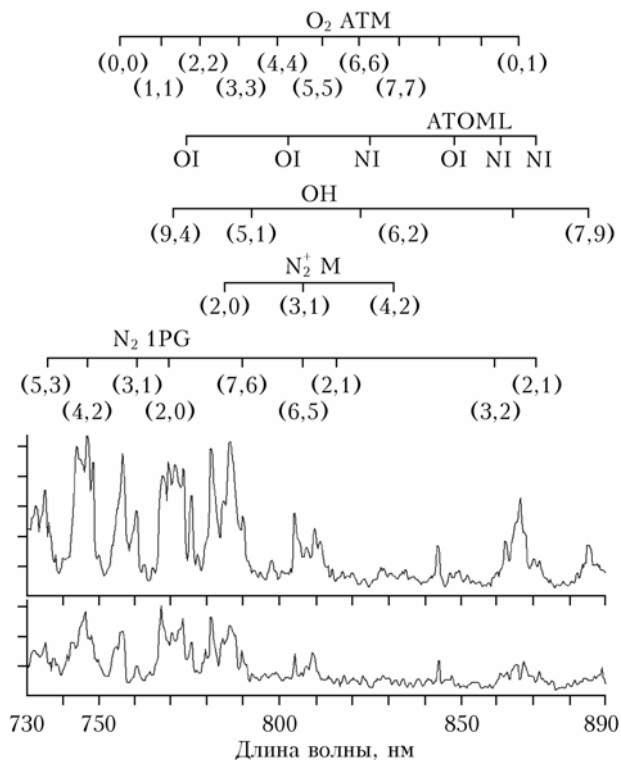


Рис. 4. Спектры свечения полярного сияния 7 декабря 2008 г. для углов зрения прибора -30° (верхняя панель) и -60° (нижняя панель). На верхней схеме отмечены наиболее яркие атомарные линии и полосы данного длинноволнового диапазона

Заключение

В Полярном геофизическом институте КНЦ РАН разработан, создан и испытан меридиональный инфракрасный спектрометр. Прибор работает в спектральном диапазоне 730–900 нм. Отличитель-

ной особенностью прибора является использование в качестве приемника изображающего спектрометра ИК-180 современной высокочувствительной EMCCD-камеры, что позволяет исследовать высокочастотные процессы в верхней атмосфере. Среди аналогов представленный прибор выделяется самым широким полем зрения и высокой скоростью обновления данных.

Полученные с помощью прибора в результате наблюдений на арх. Шпицберген спектрометрические данные показали, что описанный прибор является информативным средством в исследовании свечений полярных сияний. При работе в комплексе с камерами всего неба, в том числе работающими в избранных авроральных эмиссиях, и меридиональным спектрометром видимого диапазона обеспечивается полное освещение процессов, протекающих в ионосфере высоких широт. Прибор может быть использован не только для наблюдения полярных сияний, но и гораздо менее интенсивного свечения ночного неба.

1. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 265 с.
2. Sigernes F., Deehr C.S. 1m Ebert–Fastie spectrometer. URL: <http://kho.unis.no>
3. Евлашин Л.С. Исследования полярных сияний. М.: АН СССР, 1960. № 4. С. 80.
4. URL: <http://www.fujinon.com/ProductDocs/FE185C086.pdf>
5. URL: <http://www.canon.ru/products/specification.asp?id=1602>
6. URL: http://www.princetoninstruments.com/Uploads/Princeton/Documents/Datasheets/Princeton_Instruments_PhotonMAX_512B_RevD0.pdf
7. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Network_Time_Protocol
8. Малышев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию. М.: Наука, 1979. 480 с.
9. Пейсахон И.В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.

A. Roldugin, Zh. Dashkevich, O. Lebed, Yu. Fedorenko, S. Pilgaev. The infrared spectrometer MIRS: design and preliminary results.

We present infrared spectrometer MIRS constructed for studying the spectral composition and spatial distribution of the nightglow and aurora in the near infrared region. The spectrometer allows a spectral image along the main arc of sky hemisphere in the spectral range 730–900 nm with a spectral resolution of about 0.7 nm and a rate of 4 frame/min. Its optical scheme has a classical composition with transmission grating. The instrument can work either offline or as a part of a computer network. The preliminary results obtained at Barentsburg (Spitsbergen archipelago) in the winter season of 2008/09 demonstrate that the MIRS spectrometer is an informative tool for studying processes in the upper atmosphere. When combined with an all-sky camera MIRS provides the broad view of the general auroral situation, that is necessary for research of geophysical events at high latitudes. The software used in data acquisition system offers an extensive range of operation modes. The device is operable under the most heavy field conditions in Arctic.