

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 551.521.17; 551.508.953

**А.А. Черемисин, В.И. Наливайко, Л.В. Границкий, С.Ф. Заграбчук, П.А. Чубаков,
С.А. Веселков, В.В. Слабко**

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ СПЕКТРОГРАФ ДЛЯ МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Представлены описание экспериментального образца и результаты лабораторных испытаний малогабаритного широкодиапазонного светосильного спектрографа, разработанного для комплексного исследования и контроля состояния атмосферы с борта искусственных спутников Земли. Спектрограф создан на базе вогнутых дифракционных голографических решеток с криволинейными штрихами, переменным шагом и плоским полем фокусировки, условия записи которых определялись исходя из требований целесообразного размещения оптических элементов и минимизации аберраций. Прибор позволяет одновременно получать спектр, регистрируемый с помощью фотодиодных линеек, в диапазоне 160÷700 нм со спектральным разрешением ≤ 1 нм при пространственном разрешении 1 угл. мин.

Современный уровень развития спутниковых систем для исследования и контроля состояния атмосферы позволяет проводить мониторинг загрязнения окружающей среды, по некоторым параметрам принимающего в настоящее время характер угрозы экологической катастрофы. Спутниковые измерения дают возможность получить глобальную информацию о состоянии атмосферы и содержании многих компонентов атмосферы с хорошей периодичностью и удовлетворительной точностью [1–3].

Особое место занимает задача диагностики кратковременных воздействий на атмосферу локального характера, как антропогенного, так и естественного происхождения, имеющих место, например, при запуске ракет, инъекции (и взрывах) химических веществ, инъекции плазмы, воздействию мощных источников ультрафиолетового и радиоволнового излучения, вулканических выбросах, выбросах в результате производственной деятельности и т.п.

Комплексный характер задач дистанционного зондирования такого рода определяет специфические требования к характеристикам спутниковых приборов, обуславливая, в частности, необходимость проведения измерений в более широком диапазоне спектра для одновременного определения ряда атмосферных параметров. Следует отметить, что в современных тенденциях развития спутниковых методов можно выделить направление, которое определяется требованиями расширения списка исследуемых малых газовых составляющих атмосферы, повышения точности измерений, увеличения высотного диапазона, улучшения пространственно-временного разрешения, комплексного определения физического состояния атмосферы [1].

Решение задач дистанционного зондирования связано с созданием уникальной спутниковой аппаратуры [4–6]. Оптимальное планирование исследований

с использованием спутниковых систем включает в себя информационный, технический и экономический аспекты, в частности необходимо минимизировать стоимость экспериментов, массу и габариты инструмента, энергопотребление, объем запоминаемой на борту и передаваемой информации [7]. Необходимо также принять меры по компенсации эффектов деградации оптических систем под влиянием факторов космического пространства [8].

Одним из основных и наиболее информативных методов дистанционного зондирования атмосферы является спектральный метод. В практике космических исследований атмосферы в видимом и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах использовались самые различные схемы построения спектрометров. Спектрометры, собранные по схеме двойных монохроматоров со сложением дисперсий, использовались для исследований в ближней УФ-области спектра [9, 10]. Например, спектрометр БУФС-1 [10]: спектральный диапазон 280÷340 нм, спектральное разрешение $\Delta\lambda = 1$ нм, поле зрения – 16° . В дальней УФ-области для спектрометров использовалась схема Водсворта в сочетании со специальными механическими решетчатыми коллиматорами [11–13].

Для обеспечения широкого спектрального диапазона измерений Spacelab-1 была оснащена комплектом из пяти одновременно работающих спектрометров [11]. Причем четыре из них имели почти идентичную конструкцию, перекрывали диапазон по λ от 120 до 1200 нм, $\Delta\lambda = 15$ нм, а пятый работал в диапазоне 30÷120 нм, $\Delta\lambda = 10$ нм, поле зрения – $0,65^\circ$. В спектрометре, описанном в [13], широкий диапазон 85÷395 нм, $\Delta\lambda = 0,4\div 1,2$ нм, достигался разделением спектра на три спектральных канала с использованием второго и третьего порядков дифракции, трех входных щелей и трех детекторов излучения. Поле зрения составляло $0,14^\circ \times 3,8^\circ$.

Наибольшее применение получила схема Эберта–Фасти [4]. По этой схеме собраны двойные монохроматоры приборов ВUV, SBUV/(TOMS) [14], с помощью которых получен наибольший объем спутниковых данных о глобальном распределении озона. Прибор SBUV: диапазон $\lambda = 160\div 400$ нм, $\Delta\lambda = 1$ нм, поле зрения $12^\circ \times 12^\circ$, светосила F:5. По схеме Эберта–Фасти [15], а также по более компактной автоколлимационной схеме [16] были построены приборы, исследовавшие Марс и Венеру. Во всех приведенных приборах сканирование спектра осуществлялось вращением тех или иных оптических элементов. При этом одновременность измерений во всех длинах волн спектра открывала возможность его искажения вследствие быстрого движения КА и пространственно-временных вариаций атмосферных характеристик.

Во второй половине 80-х годов для малогабаритных приборов наметился некоторый поворот к устройствам типа спектрографов и к использованию схемы Роуланда [4]. Это связано с появлением новых технических средств – высокочувствительных линейных и матричных фотоприемников, микропроцессорной техники для обработки видеoinформации, новых типов усилителей изображений, например микроканальных пластин и голографических дифракционных решеток. Голографические решетки имеют преимущество перед изготовленными механически – они позволяют исключить, точнее, существенно уменьшить некоторые типы аберраций, что дает возможность создавать светосильные приборы с использованием схемы Роуланда; с их помощью можно сильно подавить порядки дифракции выше первого; они имеют малый уровень рассеянного света.

К концу 80-х годов голографические решетки были рассчитаны для дальнего ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазонов спектра [17]. В [4] описан спектрометр, предназначенный для исследования кометы Галлея, построенный с использованием перечисленных выше новых элементов. Для расширения диапазона до $120\div 1800$ нм в приборе осуществлено разделение исходного пучка

на три. Три спектральных канала конструктивно разделены: УФ – $1200\div 2900$ Å, $\Delta\lambda = 10$ Å, видимый диапазон – $2800\div 7100$ Å, $\Delta\lambda = 25$ Å; ближняя ИК-область – $0,8\div 1,8$ мкм, $\lambda/\Delta\lambda = 70$.

В Научно-исследовательском физико-техническом институте Красноярского государственного университета совместно с Институтом автоматики и электрометрии СО РАН и при участии Красноярского государственного технического университета с 1988 г. велась разработка малогабаритного бортового широкодиапазонного высокочувствительного спектрометра на базе голографических дифракционных решеток, позволяющего одновременно получать спектр в диапазоне $160\div 700$ нм со спектральным разрешением порядка 1 нм и пространственным разрешением порядка 1 угл. мин. Спектрометр разрабатывался для комплексного исследования и контроля состояния атмосферы с борта искусственного спутника Земли. В результате был создан экспериментальный образец аппаратуры и проведены его лабораторные испытания.

Для изготовления решеток новый неорганический фоторезист – халькогенидное стекло – наносился термическим испарением в вакууме на вогнутые подложки из ситалла. Термическое напыление фоторезиста обеспечивало высокое оптическое качество поверхности, необходимое для получения низкого уровня паразитного рассеяния решетки, а подложки из ситалла дают низкий коэффициент линейного расширения для работы элемента в условиях с повышенными требованиями.

Интерферометр для записи решеток и оптическая схема спектрального прибора рассчитывались на ЭВМ, при этом проводились оптимизация и минимизация основных аберраций в рабочем спектральном диапазоне прибора. Вогнутая подложка с нанесенным фоторезистом экспонировалась полем двулучевого интерферометра и проявлялась для получения поверхностного рельефа в специально разработанном малококонтрастном растворе. Затем на поверхности решеток наносились отражающие покрытия Al + MgF₂.

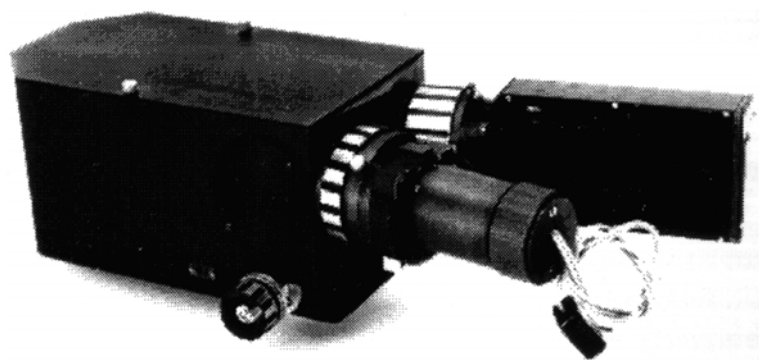


Рис. 1. Внешний вид однодиапазонного малогабаритного спектрографа со сменным источником излучения и устройством управления фотодиодной линейкой

Испытание решеток проводилось на макете однодиапазонного спектрографа, внешний вид которого представлен на рис. 1. Главным элементом оптической схемы спектрографа является вогнутая голографическая решетка. Разработанные решетки представляют собой сложный дифракционный элемент. Переменный шаг и криволинейная форма штрихов позволяют уменьшить астигматизм и кому в несколько раз по сравнению с обычными решетками. Дифракционная решетка в приборе выполняет функции фокусирующего, корректирующего и диспергирующего элемента и имеет плоское поле регистрации для многоканальной спектрометрии. Конструктивно спектральный прибор предельно упрощается. Для регистрации спектров в выходной плоскости спектрографа установлена фотодиодная линейка с устройством управления от персональной ЭВМ типа IBM PC. Модульная конструкция макета позволяла в зависимости от назначения реализовать требуемую конфигурацию прибора при проведении испытаний. Для этой цели прибор оснащен сменным источником излучения.

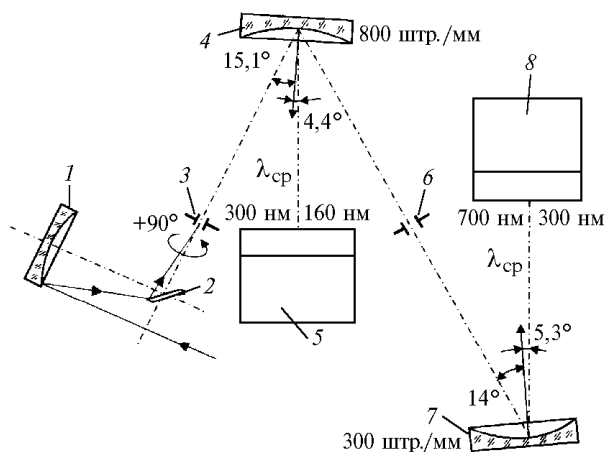


Рис. 2. Оптическая схема двухдиапазонного спектрографа: 4, 7 – дифракционные вогнутые голографические решетки; 3, 6 – щели; 5, 8 – ЭОП, состыкованные с фотодиодными линейками. Телескоп системы Ньютона: 1 – главное зеркало; 2 – плоское вторичное зеркало. +90° – оптическая ось, перпендикулярная меридиональной плоскости спектрографа

На рис. 2 представлена оптическая схема двухдиапазонного (160÷300 нм, $\Delta\lambda = 1$ нм; 300÷700 нм, $\Delta\lambda = 2$ нм) малогабаритного (526×370×100 мм) спектрографа, предназначенного для исследования и контроля состояния атмосферы. В двухдиапазонном спектрографе установлены две вогнутые голографические решетки с радиусом кривизны 22,34 см. Сфокусированный питающей оптикой световой пучок через входную щель диаметром 112 мкм падает на первую решетку, рассчитанную на УФ-диапазон 160÷300 нм. Решетка имеет средний период 800 штр./мм, криволинейные штрихи и переменный шаг. Условия записи решетки выбраны исходя из расположения элементов спектрогра-

фа и его габаритов. Угол падения света на решетку 15,1° оптимален для целесообразного размещения элементов спектрографа и получения минимальных aberrаций, углы дифракции решетки +1 порядка составляют 7,61 и 1,17° соответственно для длин волн 160 и 300 нм.

Для получения более высокого спектрального разрешения расчет оптической схемы спектрометра проведен для случая, когда источник света (входная щель) и выходная плоскость регистрации находятся вне круга Роуланда. В этом случае оптимизация aberrаций в процессе расчета (остается постоянным только угол падения входного пучка, а варьируются остальные параметры оптической схемы) позволяет получить более высокие параметры спектрального разрешения по всему диапазону спектра.

Плоскость регистрации ориентирована перпендикулярно к направлению луча со средней длиной волны заданного спектрального диапазона. Расчет оптической схемы проведен с учетом требования регистрации спектра плоским регистратором – фотодиодной линейкой. В указанном спектральном диапазоне в результате оптимизации, т.е. перебора параметров оптической схемы, получены две стигматичные точки (меридиональный астигматизм равен нулю). Рядом расположенные точки спектра имеют малые величины меридионального астигматизма, поскольку астигматизм меняет свой знак в стигматичных точках. Оптическая схема спектрометра относится к типу схем с плоским полем регистрации, и расчет aberrаций приведен именно для такой плоскости.

Излучение нулевого порядка ~40% с первой решетки через промежуточную щель с отверстием диаметром 150 мкм падает на вторую решетку со средним периодом 300 штр./мм, рассчитанную на спектральный диапазон 300÷700 нм. Угол падения света на решетку, равный 14°, и углы дифракции +1 порядка – 8,74 и 1,83° для 300 и 700 нм, соответственно, выбраны из тех же соображений, что и для первой решетки.

Значения сагиттального и меридионального астигматизма обеих решеток в плоскости регистрации приведены на рис. 3. Для сравнения на рис. 3 приведены aberrации для простых вогнутых дифракционных решеток, имеющих постоянный шаг. Астигматизм решетки характеризуется размерами пятна (по диаметру) в плоскости регистрации на фотодиодной линейке. Меридиональный – в плоскости падающего и дифрагированного пучков света, его величина определяет спектральное разрешение решетки; сагиттальный астигматизм – это размер пятна по высоте линейки, от его величины зависит степень фокусировки дифрагированного света. Последний параметр важно учитывать, поскольку высота элементов для различных линеек фиксирована и обычно лежит в пределах 25÷500 мкм.

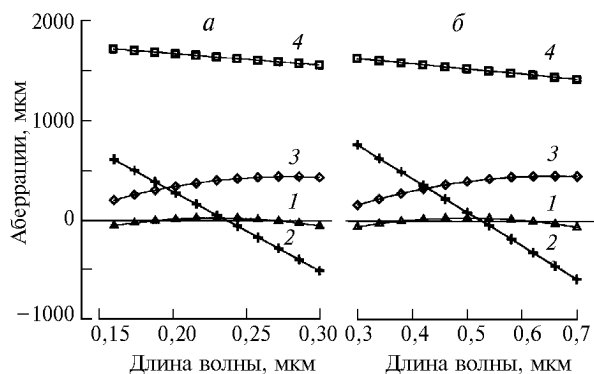


Рис. 3. Астигматизм дифракционных решеток: *a* – радиус кривизны – 22,34 см. Число штрихов – 800 штр./мм. Диапазон – 160÷300 нм; *б* – радиус кривизны тот же. Число штрихов – 300 штр./мм. Диапазон – 300÷700 нм. Астигматизм голографических дифракционных решеток: 1 – меридиональный, 2 – сагиттальный. Астигматизм простых вогнутых решеток: 3 – меридиональный, 4 – сагиттальный

Уменьшение aberrаций в результате их коррекции позволило при малых габаритах и большой светосиле спектрометра реализовать высокое спектральное разрешение. Светосила характеризуется величиной относительного отверстия спектрографа и решеток, равной 1/3. Дифракционная эффективность решеток с синусоидальным профилем штриха в видимой области ~20%, в УФ-диапазоне примерно в полтора раза выше. Диаметр входной щели спектрографа равен 112 мкм. Первая решетка имела обратную линейную дисперсию 61,5 Å/мм, вторая – 160 Å/мм. При таких параметрах меридиональные aberrации можно рассматривать как нулевые, и линии спектра фактически стигматично переносятся из входной плоскости в выходную, спектральное разрешение равно 7 и 16 Å для УФ- и видимого спектральных каналов соответственно.

При регистрации спектров с помощью фотодиодных линеек обеспечивалось спектральное разрешение по крайней мере не хуже 10 и 20 Å в соответствующих спектральных диапазонах. Это разрешение удовлетворяет критерию $\lambda/\Delta\lambda \geq 100$, который, согласно выводам [4], определяет спектральное разрешение, необходимое для большинства исследований атмосферы оптическими методами. Для 95% точности воспроизведения интенсивности одиночных линий спектра в видимой области необходимо, чтобы 5 элементов линейного фотодетектора приходились на 8 Å, а в УФ-диапазоне – 10 элементов на 7 Å.

Плоское поле регистрации спектрометра дает возможность применять для регистрации спектров многоканальные системы – фотодиодные линейки типа ЛФ1024-2/2 (1024 элемента), выпускаемые отечественной промышленностью. Нами было разработано устройство управления линейкой, обеспечивающее регистрацию и запоминание спектров. Сигнал с фотодиодной линейки усиливается и подается

на вход аналого-цифрового преобразователя, выполненного в конструктиве IBM PC. Преобразованный по фронту синхросигнала в цифровой код сигнал записывается в память компьютера. Спектр выводится на экран графического дисплея. Динамический диапазон преобразователя составлял 10 двоичных разрядов, время преобразования – 20 мкс. От таймера IBM PC выбирались времена экспонирования линейки и осуществлялось формирование необходимых управляющих сигналов. Времена экспонирования составляли от 10 до 3000 мс в зависимости от величины сигнала.

Изменение времени экспозиции в 300 раз и использование 10 разрядов позволили измерять сигналы, различающиеся по интенсивности в $3 \cdot 10^5$ раз. Пороговая чувствительность линейки (ограниченная шумами) составляет 0,05 пДж на длине волны 0,63 мкм. При понижении температуры до 5 °C уровень шумов падает примерно в 2 раза. Для повышения чувствительности спектры регистрировались с помощью электронно-оптических преобразователей (ЭОП), которые имели волоконный выход, состыкованный с фотодиодными линейками.

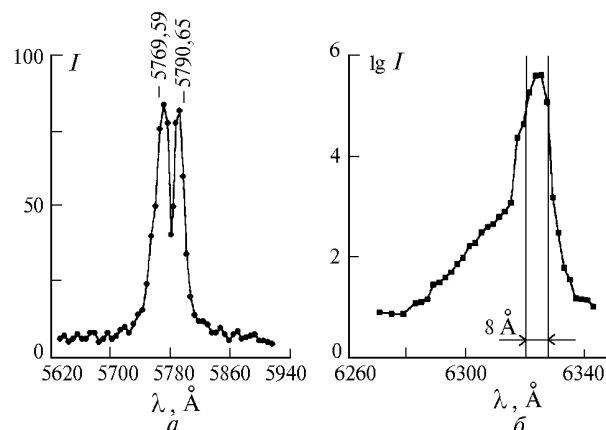


Рис. 4. Результаты исследования разрешающей способности спектрографа и уровня рассеянного света: *a* – регистраграмма ртутного дублета $\lambda_1 = 5769,59 \text{ \AA}$, $\lambda_2 = 5790,65 \text{ \AA}$ в относительных единицах при регистрации спектра с помощью фотодиодной линейки; *б* – экспериментальный инструментальный контур линии $\lambda = 6324 \text{ \AA}$

На рис. 4 приведены некоторые результаты исследований спектрального разрешения, измерений инструментального контура линий и уровня рассеянного света. Результаты испытаний показывают, что спектрограф с фотоэлектрической регистрацией спектра с помощью фотодиодной линейки ЛФ1024-2/2 обеспечивает спектральное разрешение линий, расстояние между которыми 20 Å – диапазон 300÷700 нм и 10 Å – диапазон 160÷300 нм. Для примера на рис. 4, *a* приведена регистраграмма ртутного дублета $\lambda_1 = 5769,59 \text{ \AA}$, $\lambda_2 = 5790,65 \text{ \AA}$. Дублет, регистрируемый фотодиодной линейкой, удовлетворяет Рэлеевскому критерию разрешения. На спектраль-

ный интервал 21 \AA приходится 5 элементов линейки. Этот результат хорошо согласуется с данными измерений инструментального контура линии $\lambda = 6324 \text{ \AA}$ (излучение гелий-неонового лазера), представленного на рис. 4, б. Излучение лазера после согласующей оптики попадало на входную щель размером 50 мкм. В выходной плоскости была установлена выходная щель размером 10 мкм.

Излучение после выходной щели регистрировалось ФЭУ с низким уровнем темнового тока. Линейный режим измерений в диапазоне 6 порядков изменения интенсивности обеспечивался применением калиброванных оптических фильтров. Ожидаемая полуширина контура линии, определяемая размером входной щели и величиной дисперсии и равная 8 \AA , хорошо согласуется с экспериментальной. Как видно из рис. 4, б, интенсивность рассеянного света на расстоянии 20 \AA от края изображения входной щели на 4,5 порядка ниже интенсивности в центре линии. Уровень рассеянного света является важнейшим параметром инструмента для исследования спектров атмосферы Земли, особенно в УФ-области [18]. К вышеизложенным результатам можно добавить, что при визуальном исследовании предельного разрешения спектрометра с помощью горизонтального микроскопа линии дублета натрия $\lambda_1 = 5889 \text{ \AA}$, $\lambda_2 = 5895 \text{ \AA}$ ($\Delta\lambda = 6 \text{ \AA}$) легко различимы при ширине входной щели меньше 50 мкм. Исследование спектров в УФ-области с применением ЭОП для преобразования УФ-излучения в видимое и при использовании входной щели диаметром 112 мкм показало, что хорошо различаются линии, отстоящие друг от друга на $7 \div 10 \text{ \AA}$.

В качестве питающей оптики использовался светосильный (1/3) телескоп системы Ньютона ($\varnothing 100 \text{ мм}$). Поле зрения спектрометра с таким телескопом $2\beta = 1,2$ угл. мин при использовании круглой входной щели спектрометра диаметром 112 мкм. Это

подтверждается результатами испытаний спектрометра с использованием широких мир.

1. Тимофеев Ю.М. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1989. Т. 25. № 5. С. 451–472.
2. Александров Э.А., Израель Ю.А., Кароль И.Л., Хржан А.Х. Озонный щит Земли и его изменения. СПб.: Гидрометеониздат, 1992. 288 с.
3. Креков Г.М., Звенигородский С.Г. Оптическая модель средней атмосферы. Новосибирск: Наука, 1990. 278 с.
4. Краснопольский В.А. Физика свечения атмосфер планет и комет. М.: Наука, 1987. 304 с.
5. Stark B. und Martini L. Absorptionsspektroskopische Messungen auf Raketen und Satelliten für Bestimmung atmosphärischer Gaskonstituenten. Akademie-Verlag Berlin, 1987. 114 S.
6. Monitoring Earth's ocean, land, and atmosphere from spacesensio systems and applications // Progress in Astronautics and Aeronautics / Ed. A. Schnapf. 1985. V. 97. 830 P.
7. Kondratyev K.Ya and Pokrovsky O.M. // Geophysica Inter. 1990. V. 29. N 1. P. 29–34.
8. Хит Д.Ф., Хини Д.Б. // Космическая оптика. М.: Машиностроение, 1980. С. 226–237.
9. Лебединский А.И., Краснопольский А.И., Кузнецов А.П., Иоэнас В.А. // Исследование космического пространства. М.: Наука, 1965. С. 77.
10. Андриенко Д.А., Барышева В.И., Ващенко В.Н. и др. // Исслед. Земли из космоса. 1990. № 1. С. 67–73.
11. Broadfoot A.L., Sandel B.R., Shemansky D.E. et al. // Space Sci. Rev. 1977. V. 21. P. 183.
12. Torr M.R. and Vitz R.C. // Appl. Optics. 1982. V. 21. N 17. P. 3080–3090.
13. Pranke J.B., Chistensen A.B., Morse F.A., Hickman D.R., Charter W.T., Howey C.K., and Jones D.A. // Appl. Optics. 1982. V. 21. N 21. P. 3941–3952.
14. Heath D.P., Krueger F.J., Roeder H.A., Henderson B.D. // Opt. Eng. 1975. V. 14. N 4. P. 323–331.
15. Pearce J.B., Gause K.A., Mackey E.F., Kelly K.K., Fastie W.G., Barth C.A. // Appl. Optics. 1971. V. 10. P. 805.
16. Краснопольский В.А., Крысько А.А., Рогачев В.Н., Паршев В.А. // Космические исследования. 1976. Т. 14. С. 789.
17. Reddy G.P., Singh M. // J. Optics (Paris). 1988. V. 19. N 2. P. 77–82.
18. Черемисин А.А., Границкий Л.В., Мясников В.М., Ветчинкин Н.В., Слабко В.В. Дистанционное зондирование в ультрафиолетовом диапазоне вертикального распределения озона и аэрозоля в верхней атмосфере с борта астрофизической станции «АСТРОН» // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 12. С. 1415–1423.

Научно-исследовательский физико-технический институт
Красноярского государственного университета,
Красноярский государственный технический университет;
Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию
3 декабря 1997 г.

A.A. Cheremisin, V.I. Nalivajko, L.V. Granitsky, S.F. Zagrabchuk, P.A. Chubakov, S.A. Veselkov, V.V. Slabko. Wide-wavelength-range Space Spectrograph for Monitoring of Earth's Atmosphere.

Description of the experimental sample and the results of laboratory tests of the satellite small-sized wide-wavelength-range spectrograph, developed for complex research and control of the Earth's atmosphere, are submitted. The spectrograph is created on the basis of concave diffraction holographic gratings with curvilinear grooves, variable step and flat focal field. The conditions of the gratings recording were determined by the requirements for advisable arrangement of the optical elements and minimization of the basic aberrations. The device allows one to obtain all spectrum simultaneously by means of linear multichannel photodiode sensors in the range of $160 \div 700 \text{ nm}$ with the spectral resolution $\leq 1 \text{ nm}$. The spatial resolution is 1 arc min.