## Оптическая система перспективного видеоспектрометра для картирования озона и других газов в атмосфере Земли

# Ю. С. Доброленский<sup>1</sup>, И. А. Дзюбан<sup>1</sup>, Ю. С. Иванов<sup>2</sup>, И. И. Синявский<sup>2</sup>, Д. В. Ионов<sup>3</sup>, А. В. Поберовский<sup>3</sup>, О. И. Кораблёв<sup>1</sup>, А. А. Фёдорова<sup>1</sup>, Н. А. Вязоветский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт космических исследований РАН Москва, 117997, Россия <sup>2</sup> Главная астрономическая обсерватория НАНУ, Киев, 03143, Украина <sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет Санкт-Петербург, 199034, Россия E-mail: dobrolenskiy@iki.rssi.ru

В работе предложена концепция нового перспективного российского спектрометра, предназначенного для мониторинга земной атмосферы с борта космического аппарата в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах спектра. Задачей прибора является измерение общего содержания озона и других газов в вертикальном столбе атмосферы. Сверхширокое поле зрения спектрометра (100°) позволяет при наблюдениях с типичных для подобных задач орбит получать глобальные карты распределения измеряемых компонент атмосферы каждые сутки. К настоящему моменту проведено оптическое моделирование прибора в целом и отдельных его узлов. В данной статье детально рассматривается оптическая схема спектрометра, который состоит из входного блока, двух спектрометрических каналов и калибровочного блока. Показаны результаты моделирования изображения входной щели на матрице приёмника, подтверждающие заданные спектральные характеристики: разрешение 0,3 нм в диапазоне 0,3–0,4 мкм и 0,5 нм в диапазоне 0,4–0,8 мкм. Пространственное разрешение обоих каналов одинаково и равно приблизительно 0,5° в обоих направлениях, что соответствует разрешаемому элементу вблизи поверхности Земли ~6 км (при измерениях в надир с высоты 700 км).

**Ключевые слова:** мониторинг озона, спутниковый спектрометр, оптическая схема, видеоспектрометр, объектив, дифракционная решётка, УФ-видимый свет

Одобрена к печати: 08.12.2017 DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-75-85

### Спутниковые спектрометры для картирования озоносферы

Основными методами мониторинга общего содержания озона (ОСО) в атмосфере Земли являются измерения наземных станций и спутниковые измерения. Преимуществом последних, которые осуществляются с борта КА, находящегося на околоземной орбите, является возможность получать глобальные карты распределения озона. Такой мониторинг проводится с 1970-х гг. Этому посвящены эксперименты Total Ozone Mapping Spectrometer, TOMS (Heath et al., 1975), Global Ozone Monitoring Experiment, GOME и GOME-2 (Burrows et al., 1999; Munro et al., 2016), Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography, SCIAMACHY (Bovensmann et al., 1999), Ozone Monitoring Instrument, OMI (Dobber et al., 2006; Levelt et al., 2006), Ozone Mapping and Profiler Suite, OMPS (Kramarova et al., 2014) и др. Работающие в настоящее время на орбите приборы OMI (запущен в 2004 г.), GOME-2 (2008) и OMPS (2011) предоставляют данные практически в режиме реального времени. В октябре 2017 г. состоялся запуск нового прибора Tropospheric Monitoring Instrument, TROPOMI (Veefkind et al., 2012), являющегося дальнейшим развитием аппаратуры OMI. Выполнение научной программы TROPOMI должно начаться в 2018 г.

В России также ведутся работы по созданию научной аппаратуры космического базирования для мониторинга ОСО. В частности, в рамках Федеральной целевой программы

«Геофизика» был разработан спектрометр Озонометр-ТМ, работающий в диапазоне длин волн 0,3-0,5 мкм со спектральным разрешением около 0,3 нм и узким полем зрения, соответствующим участку на поверхности Земли размером 8×3 км (Доброленский и др., 2017; Dobrolenskiy et al., 2015). При таком поле зрения более или менее глобальное покрытие достигается за несколько недель работы прибора на орбите. Был создан полноценный наземный прототип лётного прибора (конструкторско-доводочный образец), на котором проведена серия полевых измерений атмосферного озона. Измерения проводились на Кисловодской высокогорной научной станции (КВНС) Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН и в г. Орле. Полученные спектры рассеянного излучения (поле зрения прибора ориентировалось в зенит) обрабатывались с использованием традиционной для подобных измерений методики дифференциального поглощения DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) (Platt, Stuz, 2008). Полученные оценки ОСО приведены в табл. 1; для сравнения в ней также помещены данные спутниковых измерений ОСО, выполненные аппаратурой ОМІ (спутник Aura) в районе наших наземных наблюдений в тот же день. Более подробно об измерениях атмосферного озона с помощью прибора Озонометр-ТМ и методике обработки данных можно ознакомиться в статье (Доброленский и др., 2017).

Место	Дата	Озонометр, е.Д.	Aura OMI, e.Д.
Кисловодск	06.12.2012	309±05	313±05
Орел	30.06.2015	340±17	$340 \pm 05$
Орел	15.10.2015	285±12	310±04
Орел	16.10.2015	289±12	309±04

Таблица 1. Результаты наземных измерений озона в г. Кисловодске и г. Орле

Из *табл. 1* видно, что в первых двух экспериментах результаты наземных измерений хорошо согласуются со спутниковыми данными. В двух других величина ОСО по измерениям Озонометра-TM оказалась на 20–25 единиц Добсона (е.Д.), т.е. на 7-8%, ниже данных измерений со спутника. Такое расхождение может быть связано с особенностями состояния атмосферы в эти дни, когда вертикальные распределения давления и температуры могли существенно отличаться от средних, заданных в расчёте. Кроме того, возможная изменчивость ОСО в течение дня также может приводить к ошибке, нарушая используемое предположение о постоянстве ОСО в период наблюдений. Необходимо также отметить, что во время проведения первых двух экспериментов (6 декабря 2012 г. в Кисловодске и 30 июня 2015 г. в Орле) погодные условия были хорошими (солнечные дни), и, соответственно, освещённость входного объектива прибора была высокой. Во время же последних двух измерений (15 и 16 октября 2015 г. в Орле) дни были пасмурными и освещённость на входе прибора была существенно ниже.

Кроме описанного прибора, предполагалась также разработка двухканального озонометра со сканером для обеспечения более широкого поля зрения. Однако в настоящее время наиболее перспективным является создание не сканирующих спектрометров, а видеоспектрометров, обеспечивающих мгновенное поле зрения в требуемом диапазоне углов и обладающих также высокой светосилой. В данной статье изложена концепция нового прибора, разработанного по принципу видеоспектрометра, и детально рассмотрена его оптическая схема.

#### Общее описание прибора

Главной особенностью предлагаемого прибора является сверхширокое поле зрения, которое составляет 100° поперёк траектории движения КА. Такое поле зрения позволяет обеспечить полосу подспутникового следа более 2000 км с характерной для подобных задач орбиты высотой 700–800 км. Это, в свою очередь, даёт почти полное глобальное покрытие в течение одних

суток, т. е. соответствует задачам оперативного мониторинга озоносферы Земли. Именно таким образом осуществляют мониторинг зарубежные озонометры последнего поколения, например прибор ОМИ, данные которого в виде глобальных карт распределения озона поступают в общий доступ в течение нескольких часов (http://www.temis.nl/).

Прибор состоит из двух каналов: канал ультрафиолетового света (УФ-канал, 0,3–0,4 мкм) и канал видимого света (ВИЗ-канал, 0,4-0,8 мкм). УФ-канал предназначен для мониторинга озона О<sub>3</sub> по измерениям в полосе поглощения Хаггинса (300-360 нм). ВИЗ-канал предназначен для мониторинга таких газов, как двуокись азота NO<sub>2</sub> на длинах волн 400-480 нм, кислород вблизи полосы поглощения 760 нм, а также димер кислорода О, в диапазоне от 400 до 600 нм. Концепция каналов одинакова: каждый состоит из зеркально-линзового входного блока, оканчивающегося высокой щелью, и спектрального блока с плоской дифракционной решёткой и линзовыми коллиматорным и камерным объективами. В качестве детекторов используются ПЗС-матрицы, по одной координате которых осуществляется развёртка по пространству, а по другой — по спектру. Таким образом, при каждом кадре прибор снимает полосу, состоящую из 512 элементов изображения (пикселов) и вытянутую поперёк движения КА. Для каждого элемента измеряется спектр, состоящий из 1024 спектральных элементов в УФ-канале и 2048 спектральных элементов в ВИЗ-канале. Спектральное разрешение в УФ-канале составляет 0,3 нм, в ВИЗ-канале — 0,5 нм. Пространственное разрешение обоих каналов одинаково и равно приблизительно 0,5° в обоих направлениях, что соответствует двум пикселам детектора и разрешаемому элементу вблизи поверхности Земли ~6 км (при измерениях в надир с высоты 700 км).

В каждом канале также предусмотрен дополнительный оптический (калибровочный) вход для регистрации внеатмосферных спектров прямого солнечного излучения, т.е. для проведения солнечных калибровок. Для переключения между режимами наблюдения (съёмка в надир / калибровка по Солнцу / калибровка по темновому току) предполагается использовать поворотное зеркало вблизи входного зрачка прибора аналогично тому, как это делается в приборе Озонометр-TM (Dobrolenskiy et al., 2015). Основные характеристики прибора сведены в *табл. 2.* 

Параметр	УФ-канал	ВИЗ-канал
Спектральный диапазон, нм	300-400	400-800
Спектральное разрешение, нм	0,3	0,5
Мгновенное поле зрения (вдоль × поперёк траектории), град	0,5×100	0,5×100
Светосила	1:2	1:3,7
Входной объектив	Зеркально-линзовый	Зеркально-линзовый
Размер щели, мм	19,0×0,1	19,0×0,1
Дифракционная решётка		
Тип	Плоская нарезная	Плоская нарезная
Размер, мм	57×57	20×30
Плотность штрихов, мм <sup>-1</sup>	1650	1200
Обратная линейная дисперсия, нм/мм	8,1	16,3
Детектор		
Тип	Hamamatsu S10140–1009	Hamamatsu S10140–1109
Количество элементов	1024×506	2048×506
Размер элемента, мкм	12×12	12×12

*Таблица 2*. Основные характеристики перспективного видеоспектрометра



Рис. 1. Ход лучей в зеркально-линзовом входном блоке

#### Входной блок спектрометра

Облик входного блока прибора определяется в первую очередь требованиями к широкому полю зрения в 100°. Было рассчитано два варианта входного блока: линзовый и зеркальный. Расчёты показали, что как линзовый, так и зеркальный блоки, в принципе, пригодны для решения поставленных задач.

Достоинства линзового варианта — компактность, гибкость, высокое качество, технологическая простота. Основной недостаток — большое количество линз и необходимость использования специальных марок стекла, что приводит к пониженному пропусканию в области 300–320 нм.

Зеркальный блок привлекателен по следующим причинам: меньшее число элементов, высокая эффективность во всём спектральном диапазоне и отсутствие хроматических аберраций. В то же время малое число элементов означает и малое число параметров для коррекции аберраций. Это число приходится искусственно увеличивать за счёт усложнения формы поверхностей элементов, что повышает трудоёмкость расчётов и создаёт трудности при изготовлении.

Избежать усложнения формы поверхностей зеркал можно, однако, искривлением щели спектрометра, а также приданием кривизны одной из поверхностей кварцевого деполяризатора, используемого для устранения поляризационных эффектов. При этом система превращается в зеркально-линзовую. Кривизна щели также позволяет разгрузить оптическую схему спектрометрической части прибора. Результаты расчётов оказались вполне удовлетворительными. Первое зеркало блока — сферическое, второе — эллиптическое с квадратом эксцентриситета 0,5–0,7. В итоге выбор был сделан в пользу именной такой зеркально-линзовой системы, ход лучей в которой показан на *рис. 1.* 

#### Спектрометрический блок

Основными требованиями, определяющими выбор диспергирующего элемента прибора, являются сочетание высокого спектрального и пространственного разрешения, минимальных потерь энергии внутри системы и высокой светосилы. В процессе разработки были последовательно рассмотрены схемы на основе призмы, схемы на основе вогнутой дифракционной решётки и схемы на основе плоской дифракционной решётки. Недостатком призменных систем, несмотря на их простоту и надёжность, является неравномерность дисперсии, обусловленная нелинейностью дисперсии показателя преломления материала призмы, а также пониженное пропускание в УФ-диапазоне (Пейсахсон, 1975). Для линеаризации спектра требуется использование системы как минимум из двух призм (Иванов, Синявский, 2005), что ещё более ухудшает пропускание. Кроме того, при разумных габаритах прибора суммарная дисперсия оказывается небольшой и не позволяет обеспечить требуемое спектральное разрешение.

Альтернативой призменным системам являются, как известно, системы на основе дифракционных решёток (Пейсахсон, 1975; Лебедева, 2005). В спектрометрах, работающих в видимом и особенно в УФ-диапазоне, часто применяются вогнутые решётки, обладающие как диспергирующими, так и фокусирующими свойствами и не требующие к тому же предварительной коллимации светового пучка (Bertaux et al., 2006, 2007; Pommereau, Goutail, 1988). В результате можно существенно уменьшить число оптических элементов, что в УФ-диапазоне является очень выгодным с точки зрения энергетики. Однако вогнутые решётки, даже голографические, обеспечивают хорошее качество изображения (малые аберрации) только при относительно малой кривизне поверхности решётки и, соответственно, небольшой светосиле. При высокой светосиле получить хорошее качество изображения в обеих плоскостях не удаётся (Пейсахсон, 1975). В результате выбор был сделан в пользу плоской дифракционной решётки.

Спектральные блоки обоих каналов построены по общему принципу: спектрометр с плоской дифракционной решёткой, коллиматорным и камерным объективами. УФ-канал обладает относительным отверстием 1:2, ВИЗ-канал — 1:3,7. Это различие вызвано сравнительно слабым световым потоком в УФ-диапазоне, что и компенсируется более высокой светосилой.

#### УФ-канал

На *рис. 2* показана оптическая схема УФ-канала. Свет, расходящийся от щели, проходит через коллиматорный объектив, формирующий параллельный пучок. Первая линза коллиматора изготовлена из цветного стекла УФС1 и выполняет одновременно роль фильтра, плавно ослабляющего излучение к красному концу диапазона.



Рис. 2. Ход лучей в спектрометрическом блоке УФ-канала

Тем самым обеспечивается относительное выравнивание интенсивности света по спектру. Остальные линзы выполнены из кристаллов, имеющих высокое пропускание на длинах волн от 300 нм и выше. Далее свет попадает на дифракционную решётку. В качестве решётки была выбрана плоская нарезная решётка Newport, имеющая 1650 штр/мм. После решётки световой поток, разложенный в спектр, проходит через камерный объектив, перед которым установлена апертурная диафрагма, и фокусируется на фотоприёмную ПЗС-матрицу. В качестве последней для УФ-канала планируется использовать матрицу Нататаtsu S10140-1009, имеющую 1024 элемента по «спектральной» координате и 506 по «пространственной».

Для оценки работы спектрометра было проведено моделирование освещения входного зрачка прибора источником с линейчатым спектром. На *рис. 3* показано рассчитанное изображение на матрице спектральных линий, отстоящих друг от друга на 0,3 нм, для трёх длин волн — 300, 350 и 400 нм при ширине щели 100 мкм. Видно, что в середине диапазона (350 нм) линии чётко разрешаются по всей длине. На краях диапазона линии по-прежнему уверенно разрешаются в центре и с некоторым размытием — на краю, где сказывается искривление, вносимое решёткой. Тем не менее видно, что во всех случаях спектральное разрешение соответствует заданной величине 0,3 нм.

На *рис.* 4 показана зависимость вида изображения краёв линий на матрице приёмника от ширины щели спектрометра. Очевидно, что чем уже щель, тем лучше разрешение, однако вместе с тем падает и освещённость. Таким образом, задача состоит в выборе максимальной ширины щели, при которой сохраняется заданное разрешение. На *рис.* 4 видно, что достаточно уверенное разрешение линий сохраняется при ширине щели приблизительно до 100 мкм. Отметим, что на *рис.* 4 показаны края линий и край диапазона (300 нм), т.е. область максимального размытия изображения. Очевидно, что в центре линий и/или в середине спектрального диапазона качество изображения выше.



*Рис. 3.* Рассчитанное изображение спектральных линий на матрице приёмника для различных длин волн УФ-канала. Слева — области приёмника, соответствующие краям линий; справа — центральная часть



*Рис. 4.* Зависимость изображения спектральных линий в УФ-канале от ширины входной щели (края линий)

#### ВИЗ-канал

На *рис. 5* показана оптическая схема ВИЗ-канала. Ход лучей аналогичен ходу лучей в УФ-канале. В качестве решётки для ВИЗ-канала была выбрана плоская нарезная решётка Newport, имеющая 1200 штр/мм. Апертурная диафрагма также установлена перед камерным объективом. В качестве приёмника для ВИЗ-канала планируется использовать матрицу Hamamatsu S10140-1109, имеющую 2048 элементов по «спектральной» координате и 506 по «пространственной».

Спектральный диапазон работы этого канала широкий, 400—800 нм, поэтому существует опасность попадания в красный конец спектра лучей высших порядков дифракционной решётки. Для блокирования этих лучей используется отрезающий интерференционный фильтр, расположенный перед коллиматорным объективом. Расположение и толщина фильтра практически не влияют на качество изображения и определяются конечной компоновкой прибора.

На *рис. 6* показано рассчитанное на матрице приёмника изображение спектральных линий, отстоящих друг от друга на 0,5 нм, для трёх длин волн — 400, 600 и 800 нм, т.е. на краях диапазона и в его центре, аналогично тому, как это сделано для УФ-канала на *рис. 3*. Ширина щели также составляет 100 мкм. Также видно искривление линий (оно наблюдается как некоторый наклон линий вследствие того, что на *рис. 6* изображена лишь половина приёмника). Как следует из *рис. 6*, спектральное разрешение соответствует заданной величине 0,5 нм по всему спектру.



Рис. 5. Ход лучей в спектрометрическом блоке ВИЗ-канала



*Рис. 6.* Рассчитанное изображение спектральных линий на матрице приёмника для различных длин волн ВИЗ-канала. Слева — области приёмника, соответствующие краям линий; справа — центральная часть; в центре — промежуточное положение



*Рис.* 7. Ход лучей в калибровочном блоке

#### Калибровочный блок

Как было отмечено выше, для проведения калибровок требуется периодическое измерение внеатмосферных солнечных спектров. Для регистрации прямого солнечного излучения в каждом из каналов спектрометра предусмотрен дополнительный оптический вход, после которого свет попадает в калибровочный блок, схематически показанный на рис. 7. Световой поток от Солнца, который можно считать параллельным, падает на зеркало 1, отклоняется и попадает на светоделитель 2, представляющий собой полупрозрачное зеркало. Отклонившись ещё раз на светоделителе, свет падает на главный элемент калибровочного канала — матовое сферическое зеркало 3, обеспечивающее равномерный сходящийся световой пучок с углом схождения 100°, что соответствует полю зрения прибора. После сферического зеркала сходящийся пучок ещё раз проходит через светоделитель и попадает на входной зрачок прибора 4, за которым расположен описанный выше входной блок спектрометра.

Для переключения между калибровочным и основным оптическими входами предполагается использовать поворотное зеркало вблизи входного зрачка прибора. Оно также может быть использовано в качестве затвора для периодических измерений темнового сигнала. В целом реализация калибровочного канала зависит от особенностей конструкции и ориентации КА и может быть оптимизирована для конкретного спутника.

#### Заключение

На базе созданного в рамках Федеральной целевой программы «Геофизика» прибора Озонометр-ТМ разработана концепция новой спектральной аппаратуры для задач мониторинга земной атмосферы, которая представляет собой видеоспектрометр с двумя оптическими каналами, УФ и ВИЗ, для работы в ближнем УФ- и видимом диапазонах спектра соответственно. Рассчитана оптическая схема обоих каналов. Поле зрения составляет 100°, спектральное разрешение — 0,3 нм в УФ-канале и 0,5 нм в ВИЗ-канале. Светосила УФ-канала равна 1:2, ВИЗ-канала — 1:3,7. Число разрешаемых спектральных каналов составляет более 300 в УФ-канале и 800 в ВИЗ-канале спектрометра. Проведено моделирование изображения входной щели на матрице приёмника, которое подтверждает заложенные характеристики. Полученные результаты показывают перспективность прибора для установки на околоземные КА, предназначенные для мониторинга малых газовых составляющих атмосферы Земли.

Ю.С. Доброленский, О.И. Кораблёв и А.А. Фёдорова выражают благодарность Российскому научному фонду (проект № 16-12-10453), при поддержке которого выполнено исследование.

#### Литература

1. Доброленский Ю.С., Ионов Д.В., Кораблев О.И., Федорова А.А., Жеребцов Е.А., Шаталов А.Е., Поберовский А.В. Наземные полевые измерения и калибровки нового спутникового спектрометра для мониторинга озонового слоя Земли // Исследование Земли из космоса. 2017. № 5. С. 82–92.

- 2. *Иванов Ю.С., Синявский И.И.* Диспергирующая система спектрополяриметра с квазилинейным хроматизмом // Оптический журн. 2005. Т. 72. № 7. С. 48–51.
- 3. *Лебедева В. В.* Экспериментальная оптика. М.: Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 2005. 282 с.
- 4. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.
- Bertaux J.-L., Korablev O. I., Perrier. S., Quemerais E., Montmessin F., Leblanc F., Lebonnois S., Rannou P., Lefevre F., Forget F., Fedorova A.A., Dimarellis E., Reberac A., Fonteyn D., Chaufray J. Y., Guibert S. SPICAM on Mars Express: Observing modes and overview of UV spectrometer data and scientific results // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. No. E10S90. P. 1–40.
- Bertaux J.-L., Nevejans D., Korablev O. I., Villard E., Quemerais E., Neefs E., Montmessin F., Leblanc F., Dubois J. P., Dimarellis E., Hauchecorne A., Lefevre F., Rannou P., Chaufray J. Y., Cabane M., Cernogora G., Souchon G., Semelin F., Reberac A., van Ransbeek E., Berkenbosch S., Clairquin R., Muller C., Forget F., Hourdin F., Talagrand O., Rodin A., Fedorova A.A., Stepanov A. V., Vinogradov I. I., Kiselev A. V., Kalinnikov Y. K., Durry G., Sandel B., Stern A., Gerard J. C. SPICAV/SOIR on Venus Express: Three spectrometers to study the global structure and composition of the Venus atmosphere // Planetary and Space Science. 2007. V. 55. P. 1653–1672.
- Bovensmann H., Burrows J. P., Buchwitz M., Frerick J., Noel S., Rozanov V. V., Chance K. V., Goede A. P. H. SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes // J. Atmospheric Sciences. 1999. V. 56. No. 2. P. 127–150.
- Burrows J. P., Weber M., Buchwitz M., Roznov V. V., Ladstatter-Weissenmayer A., Richter A., DeBeek R., Hoogen R., Bramstedt K., Eichmann K.-U., Eisinger M., Perner D. The global ozone monitoring experiment (GOME): Mission concept and first scientific results // J. Atmospheric Sciences. 1999. V. 56. P. 151–175.
- Dobber M. R., Dirksen R. J., Levelt P. F., van der Oord G. H. J., Voors R. H. M., Kleipool Q., Jaross G., Kowalewski M., Hilsenrath E., Leppelmeier G. W., de Vries J., Dierssen W., Rozemeijere N. C. Ozone monitoring instrument calibration // IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing. 2006. V. 44. No. 5. P. 1209–1238.
- Dobrolenskiy Y.S., Ionov D.V., Korablev O.I., Fedorova A.A., Zherebtsov E.A., Shatalov A.E., Mantsevich S. N., Belyaev D.A., Vyazovetskiy N.A., Moiseev P.P., Tchikov K.N., Krasavtsev V.M., Savushkin A.V., Rumyantsev D.M., Kananykhin I.V., Viktorov A.I., Kozyura A.V., Moryakin S.A., Poberovskii A.V. Development of a space-borne spectrometer to monitor atmospheric ozone // Applied Optics. 2015. V. 54. No. 11. P. 3315–3322.
- Heath D. F., Krueger A. J., Roeder H. A., Henderson B. D. The solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for Nimbus 7 // Optical Engineering. 1975. V. 14. No. 4. P. 323–331.
- Kramarova N.A., Nash E. R., Newman P.A., Bhartia P.K., McPeters R. D., Rault D. F., Seftor C. J., Xu P.Q., Labow G.J. Measuring the Antarctic ozone hole with the new Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) // Atmospheric Chemistry and Physics. 2014. V. 14. P. 2353–2361.
- Levelt P. F., van der Oord G. H. J., Dobber M. R., Mälkki A., Visser H., de Vries J., Stammes P., Lundell J. O. V., Saari H. The ozone monitoring instrument // IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing. 2006. V. 44. No. 5. P. 1093–1101.
- Munro R., Lang R., Klaes D., Poli G., Retscher C., Lindstrot R., Huckle R., Lacan A., Grzegorski M., Holdak A., Kokhanovsky A., Livschitz J., Eisinger M. The GOME-2 instrument on the Metop series of satellites: instrument design, calibration, and level 1 data processing — an overview // Atmospheric Measurement Techniques. 2016. No. 9. P. 1279–1301.
- 15. *Platt U., Stuz J.* Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS), Principles and Applications. Berlin Heidelberg: Springer, 2008. 598 p.
- 16. *Pommereau J.-P., Goutai F.* O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> ground-based measurements by visible spectrometry during arctic winter and spring 1988 // Geophysical Research Letters. 1988. No. 15. P. 891–894.
- Veefkind J. P., Aben I., McMullan K., Förster H., de Vries J., Otter G., Claas J., Eskes H.J., de Haan J. F., Kleipool Q., van Weele M., Hasekamp O., Hoogeveen R., Landgraf J., Snel R., Tol P., Ingmann P., Voors R., Kruizinga B., Vink R., Visser H., Levelt P. F. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 120. P. 70–83.

## Optical system of a prospective imaging spectrometer for mapping ozone and other gases in Earth's atmosphere

Yu. S. Dobrolenskiy<sup>1</sup>, I.A. Dzuban<sup>1</sup>, Yu. S. Ivanov<sup>2</sup>, I. I. Syniavskyi<sup>2</sup>, D. V. Ionov<sup>3</sup>, A. V. Poberovsky<sup>3</sup>, O. I. Korablev<sup>1</sup>, A. A. Fedorova<sup>1</sup>, N. A. Vyazovetskiy<sup>1</sup>

 <sup>1</sup> Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
<sup>2</sup> Main Astronomical Observatory NASU, Kyiv 03143, Ukraine
<sup>3</sup> Saint Petersburg State University, St. Petersburg 199034, Russia E-mail: dobrolenskiy@iki.rssi.ru

In the paper, the concept of a new prospective Russian spectrometer intended for Earth atmosphere monitoring in the visible and near-UV spectral ranges from board of a spacecraft is presented. The goal of the instrument is to measure total ozone and other gases in the vertical column of the atmosphere. Its wide field of view (100°) makes it possible to provide global mapping of measured components of the atmosphere every day. So far the optical modeling of the whole instrument as well as its units has been done. In this paper, the optical design of the spectrometer is presented in details. The instrument consists of an entrance unit, two spectral channels and calibration unit. The modeling results of the image of entrance slit on the detector are demonstrated. They confirm the characteristics specified: spectral resolution 0.3 nm in the range  $0.3-0.4 \,\mu$ m and  $0.5 \,$ nm in the range  $0.4-0.8 \,\mu$ m. Spatial resolution is approximately equal to  $0.5^{\circ}$  in both channels, which corresponds to a resolvable element about 6 km near Earth surface when measuring at nadir direction from the altitude of 700 km.

**Keywords:** ozone monitoring, orbital instrument, imaging spectrometer, optical design, objective, diffraction grating, UV-visible light

Accepted: 08.12.2017 DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-75-85

#### References

- 1. Dobrolenskii Yu. S., Ionov D. V., Korablev O. I., Fedorova A. A., Zherebtsov E. A., Shatalov A. E., Poberovskii A. V., Nazemnye polevye izmereniya i kalibrovki novogo sputnikovogo spektrometra dlya monitoringa ozonovogo sloya Zemli (Ground-based field measurements and calibrations of the new satellite spectrometer for Earth ozone layer monitoring), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 5, pp. 82–92.
- 2. Ivanov Yu. S., Sinyavskii I. I., Dispergiruyushchaya sistema spektropolyarimetra s kvazilineinym khromatizmom (Dispersive system of a spectral polarimeter with quasi-linear chromatism), *Opticheskii zhurnal*, 2005, Vol. 72, No. 7, pp. 48–51.
- 3. Lebedeva V.V., *Eksperimental'naya optika* (Experimental Optics), Moscow: Fizicheskii fakul'tet MGU im. M.V. Lomonosova, 2005, 282 p.
- 4. Peisakhson I.V., *Optika spektral'nykh priborov* (Optics of spectral instruments), Leningrad: Mashinostroenie, 1975, 312 p.
- Bertaux J.-L., Korablev O.I., Perrier. S., Quemerais E., Montmessin F., Leblanc F., Lebonnois S., Rannou P., Lefevre F., Forget F., Fedorova A.A., Dimarellis E., Reberac A., Fonteyn D., Chaufray J.Y., Guibert S., SPICAM on Mars Express: Observing modes and overview of UV spectrometer data and scientific results, *J. Geophys. Res.*, 2006, Vol. 111, No. E10S90, pp. 1–40.
- Bertaux J.–L., Nevejans D., Korablev O. I., Villard E., Quemerais E., Neefs E., Montmessin F., Leblanc F., Dubois J. P., Dimarellis E., Hauchecorne A., Lefevre F., Rannou P., Chaufray J. Y., Cabane M., Cernogora G., Souchon G., Semelin F., Reberac A., van Ransbeek E., Berkenbosch S., Clairquin R., Muller C., Forget F., Hourdin F., Talagrand O., Rodin A., Fedorova A.A., Stepanov A.V., Vinogradov I. I., Kiselev A.V., Kalinnikov Y.K., Durry G., Sandel B., Stern A., Gerard J.C., SPICAV/ SOIR on Venus Express: Three spectrometers to study the global structure and composition of the Venus atmosphere, *Planet. Space Sci.*, 2007, Vol. 55, pp. 1653–1672.
- Bovensmann H., Burrows J. P., Buchwitz M., Frerick J., Noel S., Rozanov V. V., Chance K. V., Goede A. P. H., SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes, *J. Atmos. Sci.*, 1999, Vol. 56, No. 2, pp. 127–150.

- 8. Burrows J. P., Weber M., Buchwitz M., Roznov V. V., Ladstatter-Weissenmayer A., Richter A., DeBeek R., Hoogen R., Bramstedt K., Eichmann K.-U., Eisinger M., Perner D., The global ozone monitoring experiment (GOME): Mission concept and first scientific results, *J. Atmos. Sci.*, 1999, Vol. 56, pp. 151–175.
- Dobber M. R., Dirksen R. J., Levelt P. F., van der Oord G. H. J., Voors R. H. M., Kleipool Q., Jaross G., Kowalewski M., Hilsenrath E., Leppelmeier G. W., de Vries J., Dierssen W., Rozemeijere N. C., Ozone monitoring instrument calibration, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, Vol. 44, No. 5, pp. 1209–1238.
- Dobrolenskiy Y.S., Ionov D.V., Korablev O.I., Fedorova A.A., Zherebtsov E.A., Shatalov A.E., Mantsevich S.N., Belyaev D.A., Vyazovetskiy N.A., Moiseev P.P., Tchikov K.N., Krasavtsev V.M., Savushkin A.V., Rumyantsev D.M., Kananykhin I.V., Viktorov A.I., Kozyura A.V., Moryakin S.A., Poberovskii A.V., Development of a space-borne spectrometer to monitor atmospheric ozone, *Appl. Opt.*, 2015, Vol. 54, No. 11, pp. 3315–3322.
- 11. Heath D. F., Krueger A. J., Roeder H. A., Henderson B. D., The solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for Nimbus 7, *Opt. Eng.*, 1975, Vol. 14, No. 4, pp. 323–331.
- Kramarova N.A., Nash E. R., Newman P.A., Bhartia P.K., McPeters R. D., Rault D. F., Seftor C. J., Xu P.Q., Labow G.J., Measuring the Antarctic ozone hole with the new Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS), *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, Vol. 14, pp. 2353–2361.
- 13. Levelt P. F., van der Oord G. H.J., Dobber M. R., Mälkki A., Visser H., de Vries J., Stammes P., Lundell J. O. V., Saari H., The ozone monitoring instrument, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, Vol. 44, No. 5, pp. 1093–1101.
- Munro R., Lang R., Klaes D., Poli G., Retscher C., Lindstrot R., Huckle R., Lacan A., Grzegorski M., Holdak A., Kokhanovsky A., Livschitz J., Eisinger M., The GOME-2 instrument on the Metop series of satellites: instrument design, calibration, and level 1 data processing — an overview, *Atmos. Meas. Tech.*, 2016, No. 9, pp. 1279–1301.
- 15. Platt U., Stuz J., *Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)*, *Principles and Applications*, Berlin Heidelberg: Springer, 2008, 598 p.
- 16. Pommereau J.–P., Goutail F., O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> ground-based measurements by visible spectrometry during arctic winter and spring 1988, *Geophys. Res. Letters.*, 1988, No. 15, pp. 891–894.
- Veefkind J. P., Aben I., McMullan K., Förster H., de Vries J., Otter G., Claas J., Eskes H. J., de Haan J. F., Kleipool Q., van Weele M., Hasekamp O., Hoogeveen R., Landgraf J., Snel R., Tol P., Ingmann P., Voors R., Kruizinga B., Vink R., Visser H., Levelt P. F., TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 120, pp. 70–83.