

**ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ
УФ ДИАПАЗОНА СПЕКТРА**

Ю. И. Атрашевский ^a, А. М. Людчик ^{b*}, Г. Ф. Стельмах ^c,
Л. Н. Турьшев ^b, И. И. Юркевич [†]

УДК 535.345.67:574

^a Белорусский национальный технический университет, Минск; e-mail: atrash@bsu.by

^b Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы

Белорусского государственного университета,

220064, Минск, ул. Курчатова, 7; e-mail: nomrec@bsu.by

^c Белорусский государственный университет, Минск; e-mail: stelmgf@bsu.by

[†] Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск; e-mail: ijur@tut.by

(Поступила 1 декабря 2011)

Обсуждается специфика применения интерференционных фильтров в фотометрических устройствах для УФ области спектра с учетом особенностей спектрального распределения солнечного излучения, в частности проблема снижения пропускания в длинноволновых крыльях УФ фильтров до уровня 0.002—0.001 %. Описаны технические средства для измерения параметров фильтров. Приведены характеристики изготовленных экспериментальных образцов.

Ключевые слова: интерференционный фильтр, ультрафиолетовый диапазон спектра, фотометр, полоса пропускания.

Application features of interference filters in photometric devices for an ultraviolet spectral region are considered with regard to the spectral distribution of solar radiation. In particular, special attention is paid to a problem of transmission reduction in the long-wavelength wings of the UV filters to a level of 0.002—0.001 %. Technical facilities to measure the filter parameters are described. Characteristics of the devised experimental samples are presented.

Keywords: interference filter, ultraviolet spectral region, photometer, transmission band.

Введение. Интерференционные фильтры (ИФ) обладают рядом преимуществ по сравнению с другими устройствами спектральной селекции оптических сигналов. Это делает перспективным (см., например, [1, 2]) их применение в фотометрической аппаратуре различного назначения. В сохранившей свою актуальность работе [3] детально рассматриваются проблемы и способы их решения в случае использования ИФ для наземных измерителей общего содержания озона в атмосфере. В [4—7] обсуждалась идея и анализировались практические возможности создания на борту космического аппарата, находящегося на высокой орбите, системы глобального оперативного мониторинга озоносферы на базе УФ телевизионной камеры. Один из необходимых компонентов такой системы — блок выделения с помощью ИФ достаточно узких спектральных интервалов, в которых должны осуществляться наблюдения распределения яркости освещенной Солнцем земной атмосферы. На основании математического моделирования процесса наблюдения определен спектральный диапазон (280—340 нм), в котором проводятся измерения, выбраны центральные длины волн нескольких рабочих интервалов, определены требования к ширине полосы пропускания ИФ (≤ 10 нм). Вместе с тем процедура регистрации оптических сигналов естественных и большинства искусственных источников УФ излучения обладает специфическими особенностями, осложняющими ее реализацию на практике и выдвигающими дополнительные требования к характеристикам ИФ. В на-

INTERFERENCE FILTERS FOR PHOTOMETRIC INSTRUMENTATION OF THE ULTRAVIOLET SPECTRAL REGION

Yu. I. Atrasheuski ^a, A. M. Liudchik ^{b*}, G. F. Stelmakh ^c, L. N. Turishev ^c, and I. I. Yurkevich ^d (^a Belarusian National Technical University, Minsk; e-mail: atrash@bsu.by; ^b National Ozone Monitoring Research & Education Centre, Belarusian State University, 7 Kurchatov Str., Minsk, 220064, Belarus; e-mail: nomrec@bsu.by; ^c Belarusian State University, Minsk; e-mail: stelmgf@bsu.by; ^d B. I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk; e-mail: ijur@tut.by)

стоящей работе предложены способы решения указанных проблем, описаны методика изготовления ИФ, удовлетворяющих предъявляемым требованиям, и технические средства для измерения параметров ИФ, приведены характеристики изготовленных экспериментальных образцов.

Специфика УФ диапазона. Требования к характеристикам ИФ. На рис. 1 (кривая 1) показана относительная зависимость наблюдаемой из космоса яркости земной атмосферы от длины волны в интервале 270—420 нм. Она получена путем обработки и усреднения многочисленных данных теоретических расчетов и экспериментальных наблюдений, поэтому на практике следует ожидать некоторых отклонений от приведенной зависимости в каждом конкретном случае. Видно, что подлежащие регистрации сигналы в интересующем нас диапазоне изменяются по величине на четыре порядка, в связи с чем возникают серьезные проблемы со спектральной селекцией, причем наиболее жесткие требования должны быть предъявлены к ИФ, соответствующим самым коротковолновым рабочим спектральным участкам. Аналогичная ситуация имеет место при регистрации прямого и рассеянного солнечного излучения наземными приборами [3].

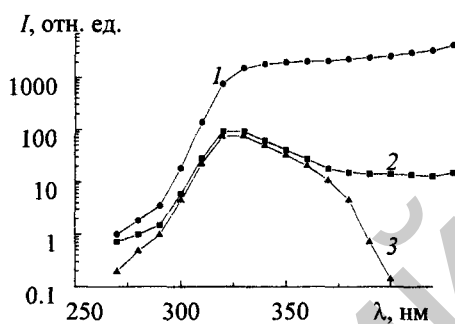


Рис. 1. Относительные спектральные характеристики сигналов: 1 — зависимость спектральной яркости атмосферы от длины волны; 2 — распределение вкладов в ток фотокатода солнечно-слепого электронно-оптического преобразователя при регистрации сигнала, соответствующего кривой 1; 3 — распределение вкладов в ток фотокатода солнечно-слепого электронно-оптического преобразователя при регистрации сигнала, прошедшего через стекло УФС2 толщиной 2 мм

Обычно традиционно изготавливаемые ИФ, обладая в центре рабочей полосы пропусканием на уровне 40—80 %, имеют вдали от центра полосы пропускание не ниже 0.1—0.2 % и ряд вторичных максимумов, в которых пропускание сравнимо с пропусканием в центре рабочей полосы. Для подавления вторичных максимумов используются дополнительные стеклянные фильтры с достаточно высоким пропусканием в центре рабочей полосы и малым пропусканием в области вторичных максимумов. Однако проблема заключается в том, что для работы в интересующей нас области подходят лишь два стеклянных фильтра — УФС1 и УФС2. Коэффициенты пропускания названных стекол приведены в [8]. Помимо того что эффективное подавление сигнала этими фильтрами начинается только с ~400 нм для УФС2 (с 440 для УФС1), оба стекла обладают заметным пропусканием в красной и ИК областях спектра. Последнее обстоятельство создает серьезные трудности в случае применения традиционных фотоприемников, имеющих отличную от нуля чувствительность в широком диапазоне спектра — от УФ до ИК области.

Проблема “красного хвоста” исчезает при использовании солнечно-слепого фотоприемника. В случае телевизионной системы приемная аппаратура помимо видикона включает в себя солнечно-слепой электронно-оптический преобразователь (ЭОП) [9]. Относительная зависимость чувствительности ЭОП на основе соединений теллурида цезия от длины волны приведена в [10]. В связи с этим полезно рассмотреть произведение подлежащего регистрации сигнала и чувствительности фотоприемника, что по физическому смыслу эквивалентно спектральному распределению вкладов в ток фотокатода при наблюдении сигнала, изображенного на рис. 1. Результат представлен на рис. 1, кривая 2. Видно, что учет спектральной чувствительности солнечно-слепого фотоприемника в значительной степени облегчает процедуру спектральной селекции сигнала.

Обсудим более детально требования к ИФ в той области (до 400 нм), где стекла УФС имеют значительное пропускание и, следовательно, не могут эффективно подавлять вторичные максимумы интерференционной системы (ИС). Для решения проблемы в таких случаях в ИФ вводят дополнительные блокирующие полосовые зеркальные системы. Комбинируя основную ИС с дополнительными блокирующими, теоретически можно достичь желаемой величины пропускания в достаточно широкой спектральной области (пример приведен ниже), однако теоретические оценки, вообще говоря, не всегда согласуются с ре-

зультатами проверки готовых ИФ. Это обусловлено сложностью изготовления фильтров и трудностями учета эффектов, влияющих на параметры готовых ИС.

Предварительное моделирование интерференционной системы. Проблема изготовления ИФ с заданными характеристиками сопряжена со значительными технологическими трудностями (нанесением требуемого числа слоев на одну подложку, необходимостью учета эффектов отражения и переотражения между слоями на разных подложках, вследствие которых снижается качество реальных систем, и т. д.). Следует также иметь в виду, что увеличение количества блокирующих систем приводит к снижению пропускания в центре полосы ИФ и не может превышать разумных пределов.

Как отмечено выше, основная причина неудач при использовании стандартных ультрафиолетовых ИФ — недооценка сильной спектральной зависимости подлежащего регистрации сигнала и вытекающих отсюда жестких требований к величине пропускания в крыльях полосы пропускания фильтра. Фоновое пропускание стандартных ИФ в интервале 300—450 нм находится на уровне 0.1 %, что с учетом спектральной зависимости тока фотокатода солнечно-слепого фотоприемника при наблюдении распределения яркости атмосферы и ~40 %-го пропускания в центре полосы (285 нм) полушириной 10 нм приводит к появлению 200 %-ной длинноволновой помехи по сравнению с полезным сигналом. Очевидно, что такие результаты не могут считаться удовлетворительными.

Для успешного применения ИФ с центром полосы пропускания в области 280—290 нм пропускание в интервале 300—450 нм должно быть как минимум в 50—100 раз меньше, чем в традиционно получаемых ИФ, и составлять ≤ 0.002 — 0.001 %. По мере смещения центра полосы в длинноволновую область требования к пропусканию в крыльях становятся менее жесткими.

Несмотря на отмеченную возможную неадекватность теоретических моделей реально изготовленным по таким моделям системам, теоретический анализ возможности удовлетворения предъявляемым к ИС требованиям необходим, поскольку служит отправной точкой для разработки задания на изготовление ИФ и определяет возможные технологические подходы к его выполнению. В качестве примера подобного моделирования рассмотрим задачу конструирования ИС с центральной длиной волны пропускания 285 нм, тремя блокирующими системами в области 300—400 нм и отрезающим стеклом УФС2 толщиной 2 мм. Для проверки качества полученной ИС полезно на первом этапе учесть влияние свойств заранее заданного стекла на характеристики регистрируемого сигнала. Кривая 3 на рис. 1 представляет собой спектральную зависимость тока фотокатода солнечно-слепого фотоприемника (ЭОП) при наблюдении освещенной Солнцем земной атмосферы через фильтр УФС2. Видно, что основные требования к понижению пропускания в длинноволновом крыле собственно ИС относятся к области 300—420 нм. В связи с этим центральные длины волн блокирующих систем выбираются следующими: 320, 355, 395 нм.

Произведение функций пропускания основной ИС (рис. 2, кривая 1) и трех блокирующих систем (кривые 2—4) приведено в логарифмическом масштабе (кривая 5). Для наглядности все кривые нормированы на единицу в максимуме. Видно, что в интересующей нас области величина пропускания не превышает 0.001 % от максимума и только после 400 нм поднимается до уровня 0.2 %. Учет пропускания стекла УФС2 нивелирует этот подъем. Результирующая теоретическая модель фильтра имеет пропускание в центре полосы на уровне 40 % и полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям.

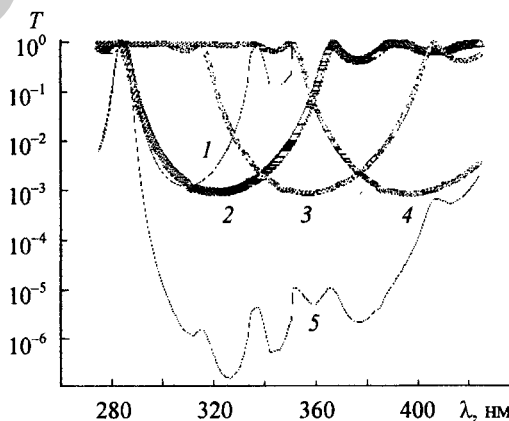


Рис. 2. Функции пропускания основной интерференционной системы с $\lambda_{\max} = 285$ нм (1), блокирующих систем (2—4) и их произведение (5); все кривые нормированы на единицу в максимуме

Изготовление и тестирование готовых образцов. Проведенный выше анализ послужил основой для изготовления пробных экземпляров ИФ с центром полосы пропускания на 285 и 312 нм. В рамках другого проекта изготовлен набор фильтров с центром полосы пропускания на 288, 295, 303, 309 и 317 нм. Работа выполнена в ОКБ “Аксикон” Института физики НАН Беларуси. Помимо решения чисто технологических проблем выполнения предъявляемых к ИФ требований, необходимы дополнительные усилия по проведению тестирования изготовленных образцов: точной регистрации очень малых величин пропускания в длинноволновых крыльях ИФ. Эта часть работы выполнена на физическом факультете Белорусского государственного университета (БГУ). Для измерения спектральных характеристик ИФ на кафедре атомной физики и физической информатики БГУ создана спектрометрическая установка, позволяющая измерять спектры пропускания в области 200—800 нм в диапазоне значений пропускания 100—0.00005 %. В определенной степени созданная установка является оптическим аналогом высокоточного однолучевого спектрофотометра сравнения, разработанного в отделении физики Национального исследовательского совета Канады [11]. Основное отличие — возможность измерять очень низкие уровни пропускания (от 0.01 до 0.00005 %). Спектрометрическая установка работает по однолучевой схеме, что позволяет более четко выделять и исключать различные систематические ошибки. Источниками излучения являются кварцево-галогенная лампа КГМ-100, питаемая от высокостабилизированного источника постоянного тока СНП-40, для области 250—800 нм и дейтериевая лампа ДНК-90, питаемая от системы высокостабилизированных источников типа ТЭС, для области 200—350 нм. Потребляемый лампой ток контролируется с помощью образцовой катушки сопротивления Р310 и высокоточного вольтметра В7-34А.

Излучение источника подается на ИФ и/или входную щель монохроматора через систему кварцевых линз, позволяющую создавать как параллельный, так и сходящийся либо расходящийся световой пучок. Гониометрический столик позволяет контролировать и изменять угол падения лучей на ИФ. Спектрометрическая система собрана на базе спектрального комплекса КСВУ-6. Используется двойной дифракционный монохроматор МДР-6 с решетками 2400 и 1200 штр/мм.

Калибровка по длинам волн осуществляется по линиям ртутно-гелиевого спектра лампы ДРГС-12 с точностью 0.05 нм. Фотоприемник — ФЭУ-100 с возможностью контролируемой регулировки напряжения питания. Сигнал с фотоприемника через систему усиления и аналого-цифрового преобразования подается на вычислительный комплекс, который помимо регистрации и математической обработки спектров осуществляет управление работой установки. Для измерения очень малых значений пропускания (до 0.00005 %, что соответствует отношению сигналов 10^6) создана система контролируемой регулировки чувствительности, состоящая из четырех независимых и дополняющих друг друга подсистем, осуществляющих ослабление входного пучка калиброванными ослабителями (черненые металлические сетки); калиброванное регулирование падающего на фотоприемник потока путем контролируемого изменения ширины входной и/или выходной щели; калиброванное изменение чувствительности фотоумножителя путем контролируемого изменения напряжения питания; калиброванное изменение чувствительности фотоэлектронной системы путем контролируемого изменения входного сопротивления.

Результаты исследования опытного образца ИФ на 285 нм представлены на рис. 3. Приведены форма полосы пропускания и значения пропускания в крыльях. Кривой 3 изображена функция

$$K(\lambda) = \frac{\int_{270 \text{ нм}}^{\lambda} \varphi(\lambda') S(\lambda') \eta(\lambda') d\lambda'}{\int_{270 \text{ нм}}^{450 \text{ нм}} \varphi(\lambda') S(\lambda') \eta(\lambda') d\lambda'}$$

которая представляет собой относительный рост вклада в регистрируемый сигнал по мере расширения

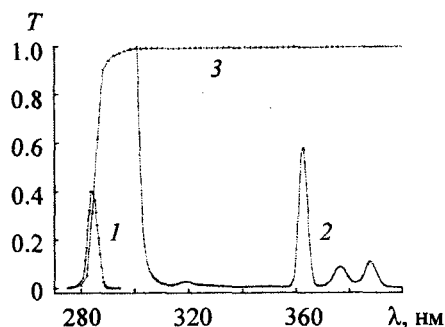


Рис. 3. Кривая пропускания опытного образца фильтра с $\lambda_{\max} = 285$ нм (1); длинноволновое крыло 2 показано при 1000-кратном увеличении; 3 — ход функции $K(\lambda)$; длинноволновая “помеха” составляет ≤ 2 % от полезного сигнала

области регистрации от 270 до 450 нм. Здесь $\varphi(\lambda)$ — функция пропускания фильтра в целом, $S(\lambda)$ — спектральная зависимость подлежащего регистрации сигнала (рис. 1, кривая 1), $\eta(\lambda)$ — спектральная чувствительность фотоприемного устройства. Если кривая $K(\lambda)$ близко приближается к единице непосредственно за длинноволновым краем полосы пропускания ИФ, то вклад в регистрируемый сигнал длинноволновой помехи оказывается незначительным по сравнению с полезным сигналом (зарегистрированным в области полосы пропускания). Результаты анализа указывают на приемлемое качество изготовленного ИФ. Аналогичные результаты получены и для других ИФ.

Проверка эксплуатационных характеристик. Помимо требований к функции пропускания ИФ последние должны обеспечивать неизменность своих характеристик в течение срока эксплуатации аппаратуры. Это оказывается особенно важным, если аппаратура устанавливается на космическом аппарате. К тому же должны быть выполнены известные эксплуатационные требования к радиационной стойкости и циклическим изменениям температуры. Кроме того, для корректной интерпретации результатов наблюдений необходимы паспортизация температурной зависимости характеристик ИФ и предварительное исследование изменчивости этих характеристик при изменении угла падения излучения. Как известно, центральная длина волны пропускания ИФ смещается при изменении угла падения излучения. Такое смещение может достигать нескольких нанометров в диапазоне углов 0—10°. В частности, если ИФ располагается после входного телескопического объектива телевизионной системы, то в каждую точку формируемого изображения собираются лучи, прошедшие через ИФ под разными углами, что приводит к расширению эффективной полосы пропускания (количественные характеристики такого расширения зависят от местоположения рассматриваемой точки изображения). Поэтому более предпочтительно устанавливать ИФ перед длиннофокусным объективом. В этом случае лучи, приходящие в заданную точку изображения, падают на плоскость ИФ под одним углом и полоса пропускания не расширяется. Смещение максимума пропускания здесь также зависит от координат точки изображения, однако легко может быть учтено на этапе обработки получаемых результатов. К тому же в случае телескопических объективов диапазон изменения углов падения излучения весьма невелик.

Возможность удовлетворения всем перечисленным требованиям может быть проверена в ходе испытаний образцов изготовленных ИФ. Изготовитель, как правило, паспортизирует ИФ, используя стандартные двухлучевые спектрофотометры (типа Beckman, Unicam и т. п.) и стандартные условия измерений (комнатная температура, параллельные пучки, нормальное падение излучения). Перед применением фильтров в уникальной (например, бортовой) фотометрической аппаратуре следует проводить целенаправленное дополнительное исследование их спектральных характеристик. Оно необходимо не только и не столько для перепроверки параметров ИФ, представленных изготовителем, сколько для контроля стабильности спектральных характеристик в условиях, максимально приближенных к условиям будущей эксплуатации.

Впервые подобное исследование характеристик удалось провести для комплекта из нескольких ультрафиолетовых ИФ с центром полосы пропускания на $\lambda = 288, 295, 303, 309$ и 317 нм, изготовленных в 1994 г. ИФ предназначались для использования в многоканальном фотометре, который предполагалось установить на спутнике “Метеор-3”. Однако работы над аппаратурой были приостановлены и изготовленные ИФ до 2000 г. хранились в лабораторных условиях. Появилась возможность оценить их временную стабильность. В 2000—2001 гг. были проведены повторные измерения характеристик пропускания ИФ на той же установке по той же методике. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Длины волн λ_{\max} (нм) центра основной полосы пропускания интерференционных фильтров в 1994, 2001 и 2011 гг.

λ_{\max} (1994)	λ_{\max} (2001)	λ_{\max} (2011)	$\Delta\lambda(2001)^*$	$\Delta\lambda(2011)^*$
289.9	289.7	289.6	-0.2	-0.3
295.4	295.2	295.2	-0.2	-0.2
303.6	303.4	303.3	-0.2	-0.3
309.3	309.4	308.4	0.1	-0.9
317.7	317.4	317.3	-0.3	-0.4

* Значения приведены по отношению к λ_{\max} (1994).

За исключением фильтра с $\lambda_{\max} = 309$ нм, положение основной полосы пропускания остальных ИФ сместилось в коротковолновую сторону (сдвиг составил 0.1—0.3 нм). Форма полосы и величина пропускания в максимуме в пределах погрешности измерений не изменились. Значения вторичных максимумов и фонового пропускания у всех ИФ изменились незначительно. Повторная проверка в 2011 г. показала, что

характер изменений положения основной полосы сохранился (за исключением того же фильтра с $\lambda_{\max} = 309$ нм). Изменение характеристик в результате старения целиком обусловлено химическими процессами, протекающими в материалах, использованных при изготовлении ИФ [3]. Поэтому экспериментально подтвержденная долговременная стабильность изготовленных образцов свидетельствует о химической устойчивости фильтровых элементов.

В фотометрической аппаратуре, устанавливаемой на космических аппаратах, ИФ подвергаются практически непрерывному облучению солнечным излучением в течение длительного времени. Для исследования влияния облучения два образца из набора были помещены в условия, имитирующие их работу в солнечных фотометрах. Для этого ИФ с $\lambda_{\max} = 295$ и 309 нм в герметичных кварцевых кюветах размещались на измерительной площадке Минской озонометрической станции Национального научно-исследовательского центра мониторинга озоносферы. Там они находились с 14.06.2001 г. по 14.11.2001 г. Измерения параметров ИФ проводились 14 июня, 15 августа и 14 ноября 2001 г. Фильтр с $\lambda_{\max} = 303.4$ нм использован в качестве контрольного. Результаты приведены в табл. 2 и на рис. 4. Эксперименты показали, что при облучении спектральные характеристики ИФ изменяются незначительно. Сдвиги положения максимума пропускания сопоставимы со сдвигами вследствие старения. Фоновое пропускание также претерпевает изменения, но они незначительны и не могут существенно влиять на качество ИФ для использования в солнечных фотометрах.

Т а б л и ц а 2. Длины волн λ_{\max} (нм) основных полос пропускания интерференционных фильтров до и после облучения солнечным излучением

14.06.2001 (до облучения)	295.2	303.4	309.4
15.08.2001 (после облучения)	295.7	303.4	309.3
14.11.2001 (после облучения)	295.5	303.4	309.1

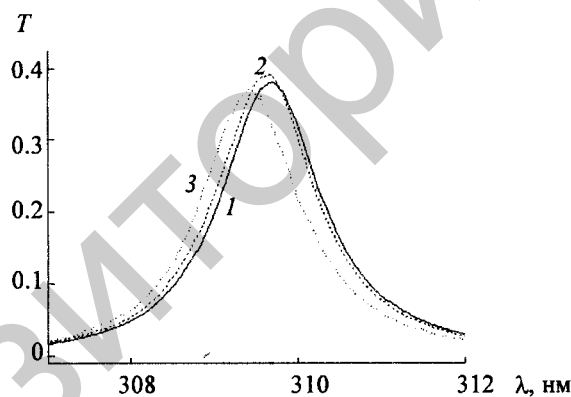


Рис. 4. Зависимость пропускания в основной полосе фильтра с $\lambda_{\max} = 309$ нм от времени воздействия солнечного излучения (даты проведения измерений): 1 — 14.06.2001 г., 2 — 15.08.2001 г., 3 — 14.11.2001 г.

Заключение. Для успешного применения интерференционных фильтров в солнечных фотометрах наземного и космического базирования в области 280—300 нм необходимо обеспечить подавление спектральной чувствительности фотометрической системы в длинноволновом крыле фильтра до уровня 0.001 % от максимума в центре полосы пропускания, иначе результаты измерений будут искажены за счет вклада в регистрируемый сигнал на несколько порядков более интенсивного солнечного излучения в длинноволновой области спектра.

С использованием предварительного теоретического моделирования в ОКБ “Аксикон” изготовлены экспериментальные образцы интерференционных фильтров с центром полосы пропускания на 285, 288, 295, 303, 309, 312 и 317 нм. Для проверки качества образцов в Белорусском государственном университете создана специальная спектрофотометрическая установка, позволяющая регистрировать пропускание в расширенном динамическом диапазоне. Испытания подтвердили высокое качество изготовленных фильтров, удовлетворяющее предъявленным требованиям.

Проведена проверка долговременной (в течение 15 лет) и соляризионной стабильности фильтров. Результаты оказались вполне обнадеживающими для использования интерференционных фильтров УФ диапазона в системах наземного и космического мониторинга атмосферы, базирующихся на регистрации прямого и рассеянного солнечного УФ излучения. Рекомендовано изготавливать и сохранять дубликаты фильтров для контроля долговременной стабильности параметров в лабораторных условиях.

- [1] C.A.Corr, N.Krotkov, S.Madronich, J.R.Slusser, B.Holben, W.Gao, J.Flynn, B.Lefer, S.M.Kreidenweis. *Atm. Chem. Phys. Discuss.*, 9 (2009) 4971—5008
- [2] Л.Г.Большакова. *Изв. РАН. Физ. атм. и океана*, 45, № 6 (2009) 823—832
- [3] R.E.Basher, W.A.Matthews. *J. Appl. Meteorol.*, 16 (1977) 795—802
- [4] А.И.Кот, А.М.Людчик, А.Н.Красовский, А.Ф.Чернявский. *Исследование Земли из космоса*, № 1 (1992) 72—78
- [5] Б.С.Скребушевский, В.Г.Давыдов, В.Н.Липатов, А.М.Людчик, А.Н.Красовский, В.И.Назаров. *Опт. журн.*, № 3 (1993) 20—24
- [6] Г.И.Кузнецов, А.Н.Красовский, А.М.Людчик, А.И.Кот, В.И.Назаров. *Опт. журн.*, № 3 (1993) 24—27
- [7] A.Krasovsky, Yu.Atrashevsky, A.Liudchik. *Proc. Quadrennial Ozone Sympos.*, 3—8 July 2000, Sapporo, Japan (2000) 521—522
- [8] Каталог цветного стекла, Москва, Машиностроение (1967)
- [9] A.N.Krasovsky, A.M.Liudchik, V.V.Sikorsky, G.F.Stelmakh, Yu.I.Atrashevsky, G.V.Davidov. *Proc. SPIE*, 3221 (1997) 550—556
- [10] А.Г.Берковский, В.А.Гаванин, И.Н.Зайдель. *Вакуумные электронные приборы*, Москва, Радио и связь (1988)
- [11] Y.C.Zwinkels, D.S.Gignac. *Proc. SPIE*, 1109 (1989) 89—98