

**КОММЕРЧЕСКИЕ УЗКОПОЛОСНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ФИЛЬТРЫ ФАБРИ–ПЕРО,  
МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИХ ИССЛЕДОВАНИЙ****COMMERCIAL NARROWBAND FABRY–PEROT SOLAR FILTERS,  
METHODS AND INSTRUMENTS FOR THEIR EXAMINATION****В.И. Скоморовский***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, skoal@iszf.irk.ru***Г.И. Кушталь***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, kushtal@iszf.irk.ru***Л.С. Лоптева***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, love010490@mail.ru***В.А. Прошин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, pro@iszf.irk.ru***А.Г. Цаюкова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, alla\_91\_91@bk.ru***V.I. Skomorovsky***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, skoal@iszf.irk.ru***G.I. Kushtal***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, kushtal@iszf.irk.ru***L.S. Lopteva***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, love010490@mail.ru***V.A. Proshin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, pro@iszf.irk.ru***A.G. Tsayukova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, alla\_91\_91@bk.ru*

**Аннотация.** В настоящее время компании Coronado, Lunt, Solar Spectrum, Daystar и Solarscope разрабатывают доступные узкополосные солнечные фильтры. Установленные в небольших телескопах, они дают возможность любителям не только любоваться грандиозными явлениями в солнечной атмосфере, но и стать участниками научных наблюдений. Усилия производителей направлены на достижение экстремальных значений основных параметров фильтров Фабри–Перо (ФП): полуширины полосы пропускания, углового поля зрения, светового диаметра фильтра и однородности полосы пропускания по апертуре, что делает их пригодными для научных наблюдений. Параметры коммерческих фильтров, их соответствие предъявляемым требованиям зависят от конструкций и технологии изготовления фильтров, разработанных компаниями. В настоящей работе рассмотрены предложенные пятью ведущими компаниями конструкции узкополосных фильтров на основе эталона ФП и некоторые технологические вопросы их изготовления, важные для эксплуатации фильтров. Прежде чем применять коммерческие фильтры в профессиональных исследованиях, необходимо убедиться, что параметры фильтров, декларируемые компаниями, соответствуют реальным. Предложенные в работе методы и устройства позволяют с высокой точностью измерить интегральные и локальные характеристики эталона фильтра, его спектральную однородность по апертуре, оценить качество и рассеяние оптической стопы фильтра и пригодность фильтров для профессиональных солнечных наблюдений.

**Ключевые слова:** фильтр Фабри–Перо, солнечный телескоп, спектральные измерения.

**Abstract.** Nowadays, Coronado, Lunt, Solar Spectrum, Daystar and Solarscope companies advance available narrowband solar filters. Being installed in small telescopes they allow amateurs not only to admire grand phenomena in the solar atmosphere but also to be involved in scientific observations. The efforts of the companies aimed at achieving extreme values of Fabry–Perot (FP) filter basic parameters such as full width at half-maximum, angular field of view, filter clear aperture and uniformity of passband over the aperture, to make them suitable for scientific observations. Parameters of commercial filters, their compliance with the requirements depend on filter design and technology developed by companies. This study considers narrowband FP filters designs proposed by five leading companies, and some technological problems of their production, which are important for their operation. To use commercial filters in professional research, it is necessary to be sure that the filter parameters declared by companies correspond to real ones. The methods and devices proposed by authors allow high-precision measuring integral and local characteristics of FP filter and its spectral uniformity across the aperture. Also, we can estimate the quality of optical stack and filter suitability for professional solar observations.

**Keywords:** Fabry–Perot filter, solar telescope, spectral measurements.

**ВВЕДЕНИЕ**

Узкополосные интерференционные фильтры (ИФ) Фабри–Перо (ФП), получаемые методами вакуумного многослойного напыления, эталоны ФП с твердым или

воздушным промежутком, эталоны с регулируемой полосой — интерферометры ФП — находят все большее применение для наблюдений физических процессов на разных уровнях атмосферы Солнца, излучение

которых выделяется этими фильтрами. Эти относительно малогабаритные приборы могут давать сведения не только о спектральных характеристиках объектов исследования, но и об их пространственном распределении на объекте, т. е. позволяют получать так называемое спектральное изображение. Последнее представляет собой двумерную или даже трехмерную карту, если использовать интерферометры со сканируемой полосой пропускания для исследования объектов, излучение которых зависит от длины волны с высотой. Таким образом, одно из важных направлений разработок солнечных приборов — сканируемые интерферометры ФП. Известны фильтровые системы для трехмерной спектроскопии, для спектрополяриметрии с измерением всех стокс-параметров анализируемого излучения, для построения карт продольного и полного вектора магнитного поля CRISP [Scharmer, Henriques, 2012], IBIS [Judge et al., 2010], IMAХ [Martinez Pillet et al., 2011] на существующих телескопах. Интенсивно ведутся разработки двухкаскадных и трехкаскадных сверхузкополосных интерферометров с полосой пропускания от 0.01 до 0.002 нм для новых телескопов ATST [Allen Gary et al., 2003], EST [Puschmann et al., 2012], NLST [Ravindra, Banyal, 2011].

Но эти фильтры, с очень узкой и контрастной (с малым паразитным фоном) полосой, со строго контролируемыми во время наблюдений параметрами, являются предметом уникальных, очень длительных разработок отдельных научных учреждений для астрономических обсерваторий и космических проектов. Они не могут быть тиражированы и поэтому не могут стать массово доступными. К тому же они слишком дороги для использования в рутинных наблюдениях, а тем более для астрономов-любителей. Усилиями разработчиков пяти компаний: Coronado, Lunt, Solar Spectrum, Daystar и Solarscope — были созданы более доступные узкополосные солнечные фильтры. С этими фильтрами, установленными на небольших телескопах, можно получать ежедневные изображения всего Солнца или отдельных участков, наблюдать глобальные и локальные процессы, протекающие в его атмосфере: солнечная активность, вспышки, выбросы вещества и др.

Мы рассмотрим характеристики узкополосных фильтров, конструкции фильтров разных производителей, методы и устройства, применяемые для контроля параметров фильтров, и результаты их измерений.

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗКОПОЛОСНЫХ ФИЛЬТРОВ. КОНСТРУКЦИИ ФИЛЬТРОВ РАЗНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

### 1.1. Эталон Фабри–Перо — главный компонент узкополосного фильтра

Эталон ФП состоит из двух полупрозрачных зеркальных поверхностей (рис. 1). Это могут быть поверхности двух пластин, обращенных друг к другу зеркалами и разделенных воздушным промежутком (ФП с воздушным промежутком), или две зеркальные стороны одной пластины (ФП с твердым промежутком). Интерференционный фильтр — это тоже

эталон ФП, в котором два зеркала и диэлектрический промежуток между ними наносятся на одну сторону пластины методом вакуумного распыления.

Основные характеристики фильтров ФП — полуширина полосы пропускания, резкость (*finesse*), угловое поле зрения (допустимый угол приема излучения), световой диаметр фильтра и однородность полосы пропускания по апертуре фильтра.

Пропускание эталона ФП представляет собой «гребенку» из максимумов по спектру (рис. 2, слева) в диапазоне, ширина которого определяется прозрачностью пластин и свойствами зеркальных покрытий. Расстояние между максимумами зависит от промежутка между зеркалами (порядок интерференции), а ширина максимума — от порядка интерференции и коэффициента отражения зеркал (если пренебречь поглощением в зеркалах, их отклонением от плоскостности и клином промежутка). Например, воздушному промежутку в 100 мкм соответствует расстояние между максимумами  $\Delta\lambda=12.5 \text{ \AA}$  для  $\lambda 5000 \text{ \AA}$ .

Важный параметр оценки эталона — резкость  $F$  — показывает отношение свободного спектрального интервала (т. е. расстояния между соседними максимумами пропускания) к полуширине полосы пропускания эталона ( $\Delta\lambda$  и  $\delta\lambda$  соответственно на рис. 2, справа). Две кривые показывают контур пропускания эталона для коэффициента отражения зеркал примерно 25 % ( $F=2$ ) и 75 % ( $F=10$ ). Чем больше резкость (при той же толщине промежутка эталона), тем уже максимум и меньше пропускание в минимуме (меньше паразитный свет). Обычно для  $F$  принимается значение 25. Чтобы полоса пропускания при этом значительно не расширилась, необходимо строго обеспечить заданное расстояние между зеркалами, другими словами, выдержать суммарный допуск на плоскостность и параллельность поверхностей эталона в пределах  $0.01 \lambda$  и обеспечить минимальную шероховатость полированных поверхностей. Но даже при этом допуске произойдет расширение полосы пропускания на 15 % по сравнению с эталоном с идеальными поверхностями. Не удивительно, что основные усилия разработчиков фильтровых систем направлены на создание технологий, обеспечивающих требуемые качества пластин эталона и оптических многослойных покрытий (малое поглощение, высокое отражение).

Центральная длина волны полосы пропускания эталона для наклонных пучков смещается в синюю

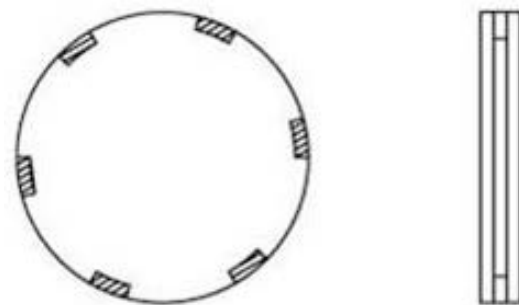


Рис. 1. Эталон с воздушным промежутком: вид спереди (слева) и сбоку (справа) [<http://www.cloudynights.com/page/articles/cat/articles/accessories1405754339/resonant-spaces-h-alpha-eta-lons-r1729>]

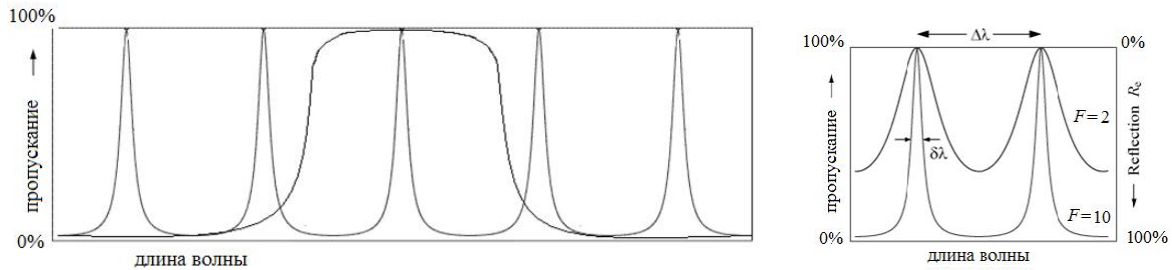


Рис. 2. Пропускание эталона ФП [http://www.cloudynights.com/page/articles/cat/articles/accessories1405754339/resonant-spaces-h-alpha-etalons-r1729]

сторону относительно полосы пропускания для пучков нормального падения. Величина смещения  $\Delta\lambda$  определяется формулой  $\Delta\lambda = \lambda^2 \theta^2 / 2n^2$ , где  $n$  — показатель преломления материала промежутка,  $\theta$  — угол наклона.

Для угла падения лучей  $1^\circ$  на эталон с воздушным промежутком  $n=1$ , смещение  $\Delta\lambda=1 \text{ \AA}$  для  $\lambda$  6563  $\text{ \AA}$ . Если при наблюдении хромосферы в линии  $H\alpha$  с фильтром с полушириной полосы пропускания 0.3–0.5  $\text{ \AA}$  принять допустимым смещение полосы 0.05  $\text{ \AA}$ , угловое поле эталона будет  $0.2^\circ$ . Эталон с твердым промежутком будет иметь угловое поле в  $n$  раз больше. Для смещения полосы пропускания фильтра по спектру можно наклонять фильтр или изменять показатель преломления промежутка.

Полуширина полосы пропускания эталона с воздушным промежутком, как правило, ограничена величиной 0.7  $\text{ \AA}$  из-за трудностей обработки стекла с требуемым допуском. Чтобы получить более узкую полосу, необходимо добавить второй такой же эталон, который имеет слегка смещенную полосу пропускания относительно первого. Полоса сужается обычно до 0.5  $\text{ \AA}$ , правда, ценой уменьшения общего пропускания системы (рис. 3). В идеальном случае эталоны должны иметь различный наклон, чтобы избежать появления «духов» из-за переотражения изображений в зеркалах соседних эталонов.

### 1.2. Основные компоненты узкополосного фильтра

Фильтры, как правило, содержат три принципиальные части.

1. Эталон ФП как интерференционный фильтр высокого (20 и более) порядка интерференции пропускает «гребенку» тесно расположенных по спектру максимумов пропускания. Подробно конструкции эталонов с воздушным и твердым промежутком разных фирм описаны ниже.

2. Блокирующий фильтр из тесно расположенных по спектру максимумов «гребенки» выделяет главный максимум пропускания эталона, совпадающий с выбранной солнечной спектральной линией (рис. 2, слева). Чем больше свободный интервал, тем легче изготовить фильтр, чтобы блокировать соседние порядки интерференции. Блокирующий фильтр представляет собой одиночный или двойной ИФ низкого, обычно первого или второго порядка интерференции. Как правило, эти фильтры очень контрастны: их пропускание вне главной полосы менее 0.1 %.

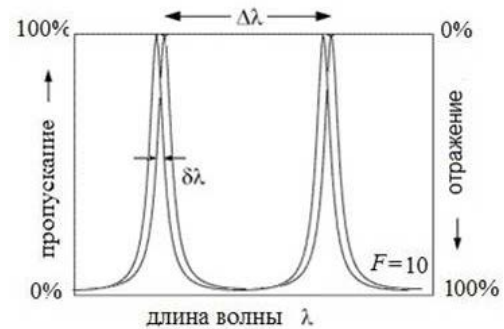


Рис. 3. Пропускание двойного эталона ФП [http://www.cloudynights.com/page/articles/cat/articles/accessories1405754339/resonant-spaces-h-alpha-etalons-r1729]

Однако на расстоянии в несколько сотен ангстрем от главного максимума у их контура пропускания появляются крылья. Излучение в этих крыльях отсекается цветным стеклом и теплоотражающим фильтром.

3. Теплоотражающий фильтр должен не пропустить (отразить, поглотить) сильную энергию от Солнца за пределами полосы пропускания, чтобы защитить оптику телескопа, эталон ФП от сконцентрированного излучения и светоприемник от лишнего излучения в пределах его чувствительности в инфракрасной области спектра. Теплофильтры обычно содержат цветные стекла и интерференционные отражающие фильтры. Большие эталоны, которые размещают впереди объектива телескопа, имеют встроенный теплофильтр. Эталон малых размеров помещают вблизи фокуса телескопа, а их теплофильтры, которые выпускаются размером до 180 мм, устанавливаются впереди объектива телескопа. Для солнечных телескопов с большой апертурой и малым относительным отверстием все части фильтра могут быть собраны вместе, и тогда фильтр располагается вблизи фокуса телескопа.

### 1.3. Требования к фильтрам Фабри–Перо

Для установки на солнечных телескопах фильтры должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) высокое пропускание для обеспечения коротких экспозиций, которые позволят «заморозить» влияние атмосферы на качество изображения;
- 2) стабильное по времени положение полосы пропускания;
- 3) высокая однородность полосы пропускания по полю фильтра;

4) устойчивость фильтра к окружающей атмосфере;

5) прочность к механическим и термическим ударам.

Если технологические проблемы изготовления прецизионных тонких плоскопараллельных пластинок решены, эталоны с твердым промежутком могут иметь преимущество перед эталонами с воздушным промежутком, которым требуется механическая или электромеханическая система поддержки плоскопараллельности зазора зеркальных пластин эталона с точностью  $\lambda/100$ . Эталон с воздушным промежутком чувствителен к температуре, давлению, силе тяжести и к точности работы электронной системы. Эталоны с твердым промежутком чувствительны только к изменению температуры. Например, для  $H\alpha$ -эталона из плавленого кварца изменение температуры на  $20^\circ\text{C}$  смещает полосу на  $1\text{ \AA}$ . Но эталоны с кварцевым промежутком способны выдержать значительные механические и термические удары без изменения спектральных характеристик.

#### 1.4. Конструкции узкополосных фильтров

Пять известных фирм в конкурентных разработках создали интересные конструкции фильтров Фабри–Перо для астрономических исследований.

1. Компания *Solarscope Manx Precision Optics Ltd* [<http://www.solarscope.co.uk/index.html>]

Компания *Solarscope Ltd* была основана в 2002 г. Кеном Хьюгеттом на острове Мэн (Великобритания) на базе *Technical Optics Factory*, производившей лазерную оптику и подложки эталонов ФП. Эти эталоны с 2002 г. стали сердцем  $H\alpha$ -фильтров *Solarscope*, и тогда же название компании стало известно требовательным профессионалам и серьезным любителям наблюдений Солнца.

Основу эталона представляет пара точно полированных пластин из плавленого кварца с зеркальным интерференционным покрытием. Воздушный промежуток между пластинами обеспечивается прецизионными разделителями, прикрепленными на оптическом контакте к пластинам по периферии эталона. Разделители, обеспечивающие максимальную жесткость и стабильность воздушного промежутка и поддерживающие настройку пластин, расположены только на периферии пластин. В эталонах этой компании нет разделителей в центре пластин.

Традиционно эталон с воздушным промежутком делается из пластин толщиной  $1/6$  их диаметра, чтобы избежать деформаций под собственным весом. Пластины полируются лучше, чем  $1/20$  длины волны. Неровности пластин подгоняются друг под друга в паре для обеспечения однородности промежутка с точностью  $\lambda/100$ . Это замечательное достижение. Разделители эталона вырезаны из материала с низким термическим расширением, отполированы и отретушированы до высокой плоскостности и плоскопараллельности. Когда пластины изготовлены и посажены на оптический контакт, отъюстированный эталон монтируется в эластичную ячейку, чтобы избежать повреждений от ударов и напряжений.

Эталоны делаются на высоком профессиональном уровне, очень тщательно, с огромным терпением,



Рис. 4. Солнечные фильтры, выпускаемые компанией *Solarscope*: слева —  $0.7\text{ \AA}$  одинарный фильтр диаметром 100 мм (SF-100), передняя сторона; справа — двойной,  $0.5\text{ \AA}$ , диаметром 100 мм (DSF-100), задняя сторона [<http://www.company7.com/solarscope/index.html>]. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

с большой затратой времени и денег. Однажды отъюстированный эталон практически не чувствителен к влиянию изменений окружающей температуры, и для его работы нет необходимости в электрическом питании для терморегулятора. Фильтр имеет большие размеры и может быть установлен перед объективом телескопа, где не подвергается воздействию концентрированного солнечного луча. Фактически его термическое состояние находится в равновесии с окружающими условиями. Когда давление воздуха изменяется (по атмосферным условиям или при работе на разных высотах — гора/равнина), полоса пропускания может сместиться из-за изменения показателя преломления воздушного промежутка. Для корректировки положения полосы пропускания предусмотрен механизм наклона фильтра.

Компания *Solarscope* больше всего известна по фильтрам с полосой  $0.7\text{ \AA}$  в варианте одиночного эталона и с полосой  $0.5\text{ \AA}$  в варианте двойного эталона (два фильтра расположены последовательно). Полная апертура эталонов 50–100 мм. Фильтр *Solarscope* — единственный узкополосный фильтр больших размеров с полностью невиньетируемой апертурой.

К недостаткам можно отнести меньшее по сравнению с эталоном с твердым промежутком угловое поле и большую стоимость продукции — \$ 30 000 за 100-миллиметровый эталон.

2. Компания *Coronado Technology Group* [[https://www.astronomics.com/coronado-hydrogen-alpha-solar-filters\\_c161.aspx](https://www.astronomics.com/coronado-hydrogen-alpha-solar-filters_c161.aspx)]

Дэвид Лант, основатель компании *Coronado* (Тусон, Аризона, США), запатентовал много идей, стремясь уменьшить цену фильтров и улучшить эталоны с воздушным промежутком. Компания появилась на рынке в конце 1990-х гг. с предложением удобных  $H\alpha$ -фильтров. В работе [Lunt, 2001] предлагается вместо полирования относительно толстых пластин эталонов с предельно высокой точностью изготавливать большие тонкие пластины по стандартной технологии и вырезать лучшие части пластин для эталонов. Затем, чтобы иметь возможность «подправить» плоскость пластин эталона, необходимо было изготовить с высокой точностью очень большие по площади и разделители, расположить их по краю пластин и даже разместить один разделитель в середине (хотя патент не требует этого). Эти разделители должны покрывать не менее 25 % площади

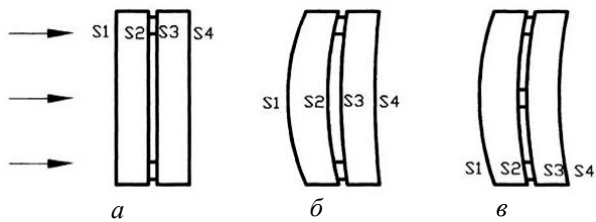


Рис. 5. Установка центрального разделителя в фильтрах Coronado [Sidorin et al., 2005]

эталона, линейный размер одного разделителя — более половины радиуса эталона. Поэтому необходимо было увеличить диаметр эталона. Разделители с очень высоким допуском на толщину и плоскопараллельность делаются, подобно пластинам эталона, путем тщательного отбора отдельных областей обычным образом полируемых больших пластин заготовок пластинок разделителя. Если у пластин эталона окажется недостаточная плоскостность, они подтянутся разделителями до параллельности друг другу при посадке на оптический контакт (или в склейке).

Компании производят эталоны диаметром 40–100 мм. Чтобы сделать эталоны менее деформируемыми, с устойчивой полосой пропускания, в промежуток введен центральный разделитель [Sidorin et al., 2005]. Основная причина, которая приводит к неустойчивости полосы пропускания — ее расширению и смещению центральной длины волны, — неравномерный прогрев пластин во время работы, когда они подвергаются воздействию концентрированного солнечного пучка при установке после главного объектива телескопа. Поверхности пластин искажаются в различной степени, плоскопараллельный воздушный промежуток принимает форму мениска. Конечно, термостатирование фильтра и использование теплофильтра снижает этот эффект, но не до конца, несмотря на использование для пластин и разделителей материалов с низким коэффициентом теплового расширения. Как показано на рис. 5, когда пластины с разделителями, расположенными на периферии, равномерно прогреты, все четыре поверхности пластин имеют плоскую форму, а промежуток является однослойным (а); когда же первая пластина, ближайшая к входящему пучку, прогрета сильнее, градиенты искажают пластины и промежуток становится не однослойным (б). Центральный разделитель (рис. 5, в), устанавливаемый в фильтрах на оптическом контакте, жестко связывает пластины. Градиенты искажают пластины, но их внутренние поверхности остаются параллельными.

В настоящее время компания Coronado изготавливает фильтры для солнечных наблюдений на основе эталона ФП с воздушным и твердым промежуток по оригинальной технологии [Sidorin, 2005] с использованием гибридных оптических стекол, которые известны в развитых технологиях как зольгель-смеси неорганических окислов и полимеров. Оптические свойства стекол могут быть «скроены» для заранее заданных оптических параметров. Последние достигаются облучением ультрафиолетом (УФ) или тепловой обработкой до тех пор, пока нужные свойства не будут получены. Гибридный зольгель-материал (фоторезист) помещается в про-

межутки между двумя точно настроенными зеркальными пластинами эталона. Материал промежутка затвердевает под влиянием УФ-облучения. Если промежуток облучается участками, то необлученный материал вытравливается, а оставшиеся облученные и затвердевшие участки служат разделителями в эталоне с воздушным промежуток (рис. 6). Если облучается весь промежуток, получается эталон с твердым промежуток. Продолжительностью УФ-облучения изменяют показатель преломления твердотельного промежутка и тем самым центрируют полосу пропускания эталона на заданную спектральную линию. Угловое поле зрения эталона с твердым промежуток больше, чем у эталона с воздушным, и пропорционально эффективному показателю преломления промежутка.

Положение полосы пропускания «воздушного» эталона теоретически не зависит от температуры, а зависит от давления воздуха (его показателя преломления) в полости эталона. Наоборот, «твердотельный» эталон, с одной стороны, нуждается в термостатировании для стабилизации положения полосы, а с другой — изменяя его температуру, можно смещать полосу пропускания.

Компания Coronado предложила составной эталон, температурно-стабильный или температурно-регулируемый, но с увеличенным угловым полем. Он конструируется путем частичного заполнения воздушной полости эталона прозрачным плоскопараллельным вкладышем, который значительно толще, чем остающийся воздушный промежуток полости эталона. В результате угловое поле увеличивается по сравнению с эталоном с воздушным промежуток. Для стабилизации полосы пропускания или для ее регулировки внутри свободного спектрального интервала коэффициент теплового расширения и показатель преломления материала вкладыша подбираются так, чтобы придать желаемую степень изменения оптической длины промежутка как функции температуры [Sidorin, Lunt, 2006].

Для регулировки положения центральной длины волны полосы пропускания эталона с воздушным



Рис. 6. Продукция компании Coronado: слева — H $\alpha$ -фильтры диаметром 40 мм и 90 мм. Две пластинки эталона держатся вместе на оптическом контакте (зольгель-технология) независимо от оправы и креплений. Справа — эталон вместе с теплоотражающим фильтром для установки перед объективом телескопа (внизу) и окулярная часть с отрезающим фильтром (вверху) [https://www.astronomics.com/coronado-hydrogen-alpha-solar-filters\_c161.aspx]. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

промежутком без центрального разделителя патентуется устройство для смещения полосы воздействием силы на периферийные разделители. Материал, из которого сделаны разделители, характеризуется определенной степенью упругости (в пределах, ограниченного модулем Юнга), и это дает возможность изменять их толщину, прикладывая через обе пластины эталона к каждому разделителю отдельно контролируруемую и уравновешенную силу сжатия [Lunt et al., 2006]. Предложенное устройство не нашло широкого применения, по-видимому, из-за деформации пластин, снижающей резкость полосы пропускания.

Компания Meade Instruments (Ирвайн, Калифорния, США) [[http://www.meade.com/product\\_pages/coronado/accessories.php](http://www.meade.com/product_pages/coronado/accessories.php)] в 2005 г. приобрела компанию Coronado Technology Group после смерти ее основателя Д. Ланта, главного оптика-дизайнера, который начал изготавливать эталоны с 1997 г.

Компания Meade Instruments изготавливает фильтры с малыми затратами, быстро и удобно. Их совсем недавний продукт — персональный солнечный телескоп с апертурой 40 мм в комплекте с фильтром с неслыханной ценой всего \$ 500.

К недостаткам фильтров следует отнести виньетирование поля зрения центральным разделителем, относительно низкую временную стабильность положения полосы пропускания и чувствительность эталона к влаге, нагрузкам и тряске. Эталоны устанавливаются в корпусе для защиты от внешних воздействий, которые могли бы нарушить юстировку, и для поддержания рабочей температуры. Компания имеет опыт в транспортировке фильтров, но были случаи трещин в эталоне. Количество эталонов, в которых может быть нарушен оптический контакт, составляет порядка 1 % от общей отгрузки (тысячи эталонов).

### 3. Компания Lunt Solar Systems LLC [<http://lunt-solarsystems.com>]

Энди Лант в 2007 г., спустя несколько лет после смерти отца, Д. Ланта — основателя Coronado Technology Group, создал компанию Lunt Solar Systems (Тусон, Аризона, США) для производства доступных солнечных фильтров на основе одиночных и двойных эталонов ФП как с воздушным, так и с твердым промежутком. Лант полагал, что полирование с высокой точностью пары пластин эталона из плавного кварца и обеспечение их оптического контакта легче, чем изготовление слюдяных эталонов компаниями DayStar и Solar Spectrum (см. далее). Плавный кварц не имеет двойного преломления, как слюда, поэтому не надо применять поляризатор для исключения «духов» от двойного преломления. Компания разработала технологию изготовления пластин эталона с точностью  $0.001 \lambda$  полировкой их на метровой планшайбе, поверхность которой разравнивается большим стеклом в процессе полировки. Разделители эталона изготавливаются и доводятся не каждый отдельно, а вырезаются из одного участка точно отполированной тонкой плоскопараллельной пластины больших размеров. Чтобы сделать эталоны более «жесткими» и избежать нарушения оптического контакта при грубом обращении, разделители пластин располагаются не только, как



Рис. 7. Продукция Lunt Solar Systems: слева — Na-эталон диаметром 100 мм, полуширина полосы  $0.7 \text{ \AA}$ ; справа — Lunt LS50C, компактный double-stack filter с полушириной полосы  $0.5 \text{ \AA}$  для установки внутри телескопа [<http://luntsolarsystems.com/shop/>]. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи



Рис. 8. Телескоп с двумя эталонами Lunt Solar Systems перед объективом [<http://luntsolarsystems.com/shop/>]. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

обычно, на периферии эталона, но и на окружности диаметра от  $1/\sqrt{3}$  эталона. Эталон, не имеющий центрального экранирования, свойственного фильтрам Coronado, более удобен для установки на телескопах разных типов. Компания производит эталоны диаметром 40, 60 и 100 мм с полушириной полосы пропускания  $0.7 \text{ \AA}$  для установки на объектив телескопа (рис. 7, слева). Два эталона с полушириной полосы пропускания  $0.7 \text{ \AA}$  соединяются вместе для сужения полосы до  $0.5 \text{ \AA}$  и поставляются одним блоком (рис. 7, справа) — double stack — для установки внутри телескопа. Можно также на объектив телескопа с уже установленным впереди эталоном  $0.7 \text{ \AA}$  дополнительно установить еще один такой же эталон для сужения полосы (рис. 8).

Полоса пропускания фильтра при наклоне смещается в синюю сторону. Поэтому фильтры изготавливают с полосой пропускания, смещенной в красную сторону от избранной солнечной спектральной линии, на которую фильтр центрируется при небольшом наклоне. От этого положения с помощью механической системы можно изменять угол наклона фильтра, чтобы сместить полосу пропускания в красную и синюю сторону от спектральной линии. Наклоном можно также компенсировать сдвиг полосы, вызванный изменением атмосферного давления (и температуры). Однако при наклоне уменьшается пропускание фильтра и полоса пропускания расширяется. Эти параметры не изменяются при смещении полосы путем изменения показателя преломления между пластинами эталона. Лант патентует устройство (рис. 9) для смещения полосы изменением давления воздуха в полости эталона [<http://www.cloudynights.com/page/articles/cat/articles/accessories1405754339/resonant-spaces-h-alpha-etalons-r1729>].



Рис. 9. Эталон с воздушным цилиндром (слева); эталон на телескопе с разобранным цилиндром: поршень и привод рядом с открытым цилиндром (в центре); двойной эталон, устанавливаемый после объектива, уменьшает полуширину полосы пропускания до величины менее  $0.5 \text{ \AA}$ ! (справа) [http://luntsolarsystems.com/shop/, http://www.youtube.com/watch?v=Hx5abAO0ctc]. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

Отдельный эталон или каждый эталон сдвоенного интерферометра помещают в камеру, в которой с помощью поршня создают повышенное давление, тем самым изменяя показатель преломления воздушного промежутка и смещая полосу пропускания. Этот метод настолько чувствителен, что в эталоне с воздушным промежутком можно компенсировать даже небольшое влияние температуры. Смещение происходит без расширения спектральной полосы и уменьшения пропускания. Регулировка давлением позволяет использовать эталон при изменении температур от  $-50$  до  $+200 \text{ }^\circ\text{C}$  в обсерваториях, расположенных на высотах от  $-20$  до  $+4800$  м над уровнем моря [https://www.astronomics.com/lunt-solar-systems-telescopes\_c23.aspx].

4. Компания DayStar Filters LLC [http://www.daystarfilters.com/, http://www.company7.com/daystar/news.html#1apr2014]

С 1970 г. Дел Вуде вел удачные эксперименты по применению слюды как эталона ФП, а в 1975 г. основал компанию DayStar Filter (Чино, Калифорния, США) и стал делать фильтры для любителей и профессионалов. Это увлечение захватило Д. Вудса на несколько десятилетий еще и потому, что несколько изготовителей телескопов были его друзьями, в том числе и соучредитель Celestron Том Джонсон, и основатель компании Seven Мартин Коэн. Вудс удачно применял узкополосные фильтры в телескопах. Компания DayStar стала синонимом солнечных наблюдений и главным поставщиком «промышленных» КСа и Na-фильтров и изготавливала на заказ специализированные фильтры. Фильтрами DayStar пользуются для наблюдений как любители, так и профессионалы в университетах и в космических экспериментах. Самые известные во всем мире солнечные обсерватории, включая Big Bear Solar Observatory (BBSO), предпочитали использовать фильтры DayStar.

На рис. 10 представлено схематическое изображение оптической стопы фильтра, разработанной Вудсом [Resonant Spaces — Part 2: An Introduction to Solid Spaced Etalons and Solar Telescope Technology [http://www.cloudynights.com/page/articles/cat/resonant-spaces-part-2-an-introduction-to-solid-spaced-etalons-and-solar-telescope-technology-r1943].

Белым цветом обозначен эталон ФП с диэлектрическими зеркалами по обеим сторонам — сердце фильтров DayStar. Желтым — просветленные защитные стекла, которые защищают стопу от внешних

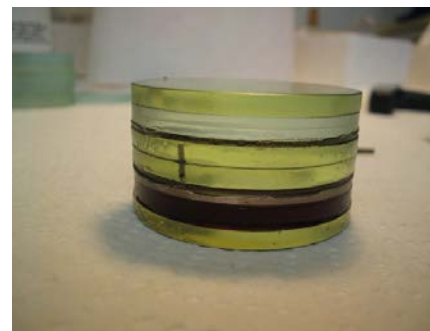
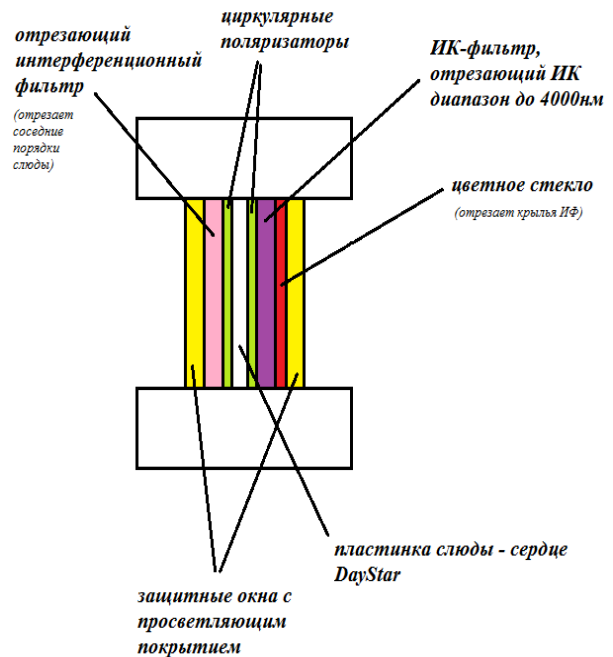


Рис. 10. Схема и оптическая стопа DayStar-фильтра. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

воздействий. Розовым цветом показан ИФ с полосой пропускания  $10 \text{ \AA}$ , отрезающий соседние порядки интерференции слюдяного эталона. Красным — цветное стекло, которое, в свою очередь, отрезает крылья контура пропускания ИФ, выделяя тем самым нужную область спектра. Зеленым обозначены циркулярные поляризаторы, которые выполняют две функции. Во-первых, они гасят паразитные отражения в стопе, возникающие между эталоном и другими фильтрами. Во-вторых, так как слюда обладает двойным лучепреломлением, что проявляется в появлении дополнительных максимумов в спектре, поляризатор гасит один из двух лучей — обыкновенный или необыкновенный. Фиолетовым указан

теплофильтр. Это может быть фильтр MDM (metal/dielectric/metal), который блокирует ИК-излучение до 4000 нм, пропуская Na или другую выбранную длину волны.

Толщина оптической стопы фильтра варьирует от 25 до 35 мм  $\pm$  2 мм, и связано это с количеством отсекающих фильтров, необходимых для его работы. Оптическая стопа собрана на иммерсии, которая специально подобрана со средним для всех компонентов показателем преломления. Стопа сжата, видимо, для поддержки плоскостности пластинки слюды, загерметизирована, чтобы предотвратить вращение поляризаторов и вытекание иммерсии, и помещена в кожух для поддержания рабочей температуры.

Разработанные Вудсом различные серии DayStar-фильтров [[http://www.company7.com/daystar/products\\_old.html#top](http://www.company7.com/daystar/products_old.html#top)] играли важную роль в академических исследованиях на протяжении более 30 лет до 2005 г.

► *University* — серия фильтров (рис. 11) с полушириной полосы пропускания от 0.8 до 0.4 Å и диаметром 35–40 мм. Фильтры этой серии ценятся астрономическими учреждениями и продвинутыми наблюдателями за высокую спектральную однородность полосы пропускания для полной апертуры ( $f/32$ ) и потрясающие фильтрограммы. Фильтры могут работать при любой окружающей температуре. Слюдяной эталон фильтра помещен в цилиндрический термостат, который обеспечивает рабочую температуру фильтра в интервале 40–50 °С. Для каждого фильтра она калибруется по солнечной спектральной линии. Изменением температуры на  $\pm 10$  °С полоса пропускания фильтра смещается в крыло линии приблизительно на  $\pm 1$  Å. Эти прецизионные системы предельно трудно изготавливать, и они довольно дороги.

► *ATM* — серия фильтров (рис. 12) с полушириной полосы пропускания от 0.95 до 0.50 Å. Фильтры ATM по конструкции подобны фильтрам *University*, но уступают в однородности спектральной полосы пропускания по полю зрения и потому имеют более низкую цену. Тем не менее многие наблюдатели получают с помощью этих фильтров прекрасные фильтрограммы.

► *T-Scanner* — серия наиболее доступных для любителей астрономии Na-фильтров с полушириной полосы пропускания от 0.8 до 0.3 Å с апертурой 30 мм. Фильтры не термостатируются, не требуют электрического питания, сразу готовы к наблюдениям, удобны в полевых условиях. Для поддержания полосы при изменении температуры имеют механизм наклона фильтра. Однако работа фильтра ограничена диапазоном окружающей температуры 18–29 °С, а его наклон может приводить к неоднородности спектральной полосы по полю зрения телескопа.

В 2006 г. Вудс, передовой производитель фильтров в мире, тяжело заболел. В последующие годы производство DayStar-фильтров почти закончилось. Тогда же было объявлено, что активы DayStar Filter Company в Калифорнии были проданы Вику и Джен Винтер, выдающимся деятелям во многих областях любительской астрономии, владельцам компании

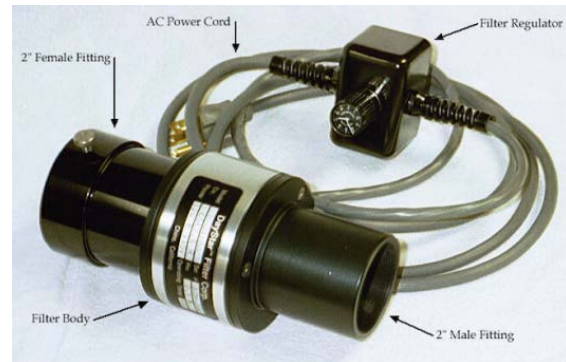


Рис. 11. Устройство, типичное для DayStar-фильтров серий *University* и *ATM* с термостатом. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи



Рис. 12. Na-фильтр DayStar серии *T-Scanner* с полосой 0.50 Å. У фильтра видна рукоятка управления наклоном, отсутствует терморегулятор. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

астрономических туров ICSTARS, базирующейся в Уорренсбурге, Миссури. Вудс был консультантом новых владельцев несколько лет и научил их своим хитростям.

Компания *DayStar Filters LLC* (Уорренсбург, Миссури, США) под руководством В. и Д. Винтер, вооружившись поддержкой и опытом Вудса, вдохнула жизнь в старую, нуждавшуюся в ремонте цепочку фильтров и продолжила изготовление конструкций, подобных выпускавшимся DayStar, с апертурой порядка 20, 30 и 50 мм и с некоторыми современными модернизациями, в основном в области электронного управления.

Выпущенные раньше DayStar серии фильтров, которые работали между 1975–2006 гг., могут быть обновлены до современного уровня серий фильтров *Quantum PE* (QPE), *Quantum SE* (QSE) или *ION*-конфигурации (рис. 13). В настоящее время компания *DayStar Filters LLC* изготавливает следующие фильтры.

*Quantum PE* (professional edition) — серия фильтров с полушириной полосы пропускания до 0.3 Å и световым диаметром до 46 мм, заменившая *University*-серию. Фильтры имеют новый блок управления и термостат с цифровой индикацией положения центральной длины волны полосы пропускания и ее смещения в пределах  $\pm 1$  Å при изменении температуры. Предназначены для профессиональных исследований, в которых требуется высокая однородность полосы пропускания по апертуре эталона. Положение



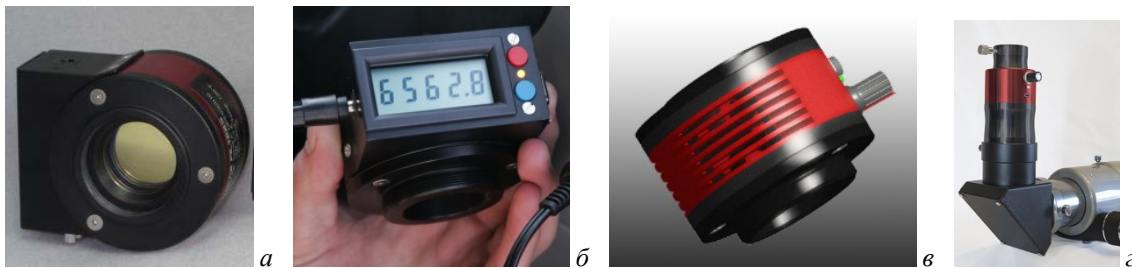


Рис. 13. На-фильтры серий Quantum, световой диаметр 42 мм (а, б), ION (с) и QUARK (д). Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

центральной длины волны, суммарной для любого участка диаметром 12 мм, должно быть в пределах  $\pm 0.05 \text{ \AA}$  от центральной длины волны для полной апертуры. С каждым эталоном предоставляется карта распределения центральной длины волны для участков 5, 2 или 1 мм. Выпуск этих фильтров требует много времени для изготовления, испытаний и высококачественного контроля.

➤ Quantum SE (standart edition) серия заменила серию ATM. Фильтры QSE предназначены для большинства любителей и некоторых академических приложений, имеют подобную QPE-фильтрам конструкцию, но уступают в однородности спектральной полосы пропускания по полю зрения.

➤ ION — серия фильтров, расположенных в термостатируемом кожухе. В отличие от фильтров серии T-Scanner, ION-фильтры не имеют механизма наклона. При любой окружающей температуре регулировка положения полосы пропускания фильтра производится изменением его температуры, которая быстро выравнивается по полю фильтра небольшим безвибрационным вентилятором. Фильтры имеют небольшой диаметр (20 мм) и относительно недороги.

➤ QUARK — фильтры этой серии представляют собой 20-миллиметровый DayStar-фильтр с терморегулятором, блокирующим и тепловым фильтром и телецентрической линзой Барлоу. Система может быть установлена в окулярную часть небольшого рефрактора. Окуляр с фильтром QUARK превращает любой телескоп в солнечный. Серия должна стать популярной у любителей наблюдений протуберанцев и, возможно, хромосферы [<https://www.youtube.com/watch?v=ei6aUibbZmA>].

Последние разработки компании (рис. 14):

**FILTER WHEEL** — турель с несколькими фильтрами диаметром 30–34 мм, которые могут меняться нажатием кнопки (рис. 14, сверху справа). Все фильтры имеют общее термостатирование и дисплей, их полоса может смещаться на  $\pm 1 \text{ \AA}$  изменением температуры, как у фильтров серии Quantum.

**FILTER WHEEL Turbo Tilt Housing Mechanism** — кремальера с набором из четырех фильтров с световым окном 32 мм (рис. 14, внизу). Фильтры термостатируемые, имеют продувку вентилятором для выравнивания температурных градиентов. Регулировка полосы пропускания осуществляется изменением температуры и наклоном фильтра. При помощи двух пар кнопок можно изменять наклон, положение фильтров и центральную длину волны.



Рис. 14. Турели с фильтрами: смещение полосы пропускания производится изменением температуры фильтров (вверху), изменением температуры и наклона (внизу). Для сравнения показан фильтр серии Quantum (вверху слева). Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

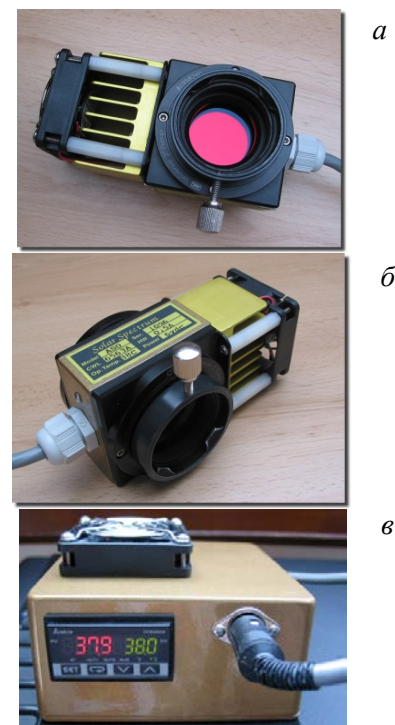


Рис. 15. Фильтр Solar Spectrum: а — вид спереди; б — вид сбоку; в — терморегулятор фильтра. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

5. *Solar Spectrum Optical Filters* (Чино-Хиллз, Калифорния, США) [<http://www.spectraloptics.com/>]

Марк Вагнер работал с Д. Вудсом, а в 2002 г. открыл свой собственный филиал и основал компанию Solar Spectrum. Фильтры Solar Spectrum очень похожи на фильтры DayStar, но с тем отличием, что термоэлектрический регулятор не только нагревает фильтр, но и принудительно его охлаждает (рис. 15). Это устраняет сбой работы фильтра при очень высокой температуре окружающей среды и обеспечивает быструю готовность к наблюдениям.

Компания выпускает фильтры следующих серий:

- *Solar Observer Series 1 u 1.5* со световым диаметром 19 и 25 мм и полосой пропускания от 0.65 до  $<0.3 \text{ \AA}$ ;

- *Advanced Solar Observer* со световым диаметром 32 мм и полосой пропускания от  $0.8 \text{ \AA}$  до менее  $0.3 \text{ \AA}$ .

Все фильтры имеют очень хорошую,  $\pm 0.05 \text{ \AA}$ , однородность полосы пропускания по поверхности фильтра.

- *Research Grade Solar Observer* — фильтры для исследовательских целей со световым диаметром от 32 мм и, по заказу, до 46 мм, с предельно однородной полосой пропускания полушириной от 0.5 до  $0.2 \text{ \AA}$ .

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ НАУЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРОВ

Фильтры всех компаний, описанные в первой части работы, находят применение не только в любительских, но и в профессиональных наблюдениях. Некоторые компании имеют интернет-сайты, на которых собраны изображения Солнца в различных спектральных линиях, полученные любителями за долгое время наблюдений с фильтрами, — своего рода паблисити компаний (например, [<http://luntsolarsystems.com/galleries/>]). С фильтрами компаний Lunt, Coronado любители (Энди Девей [<http://thesolarexplorer.net/>] и многие другие) участвуют в ежедневном мониторинге солнечной активности.

Приведем несколько примеров применения коммерческих фильтров для научных исследований.

Для изучения колебаний на Солнце с 2010 г. на станциях Global Oscillation Network Group (GONG) были установлены фильтры DayStar, с помощью которых ведутся  $H\alpha$  патрульные наблюдения в шести пунктах, расположенных вокруг земного шара. Изображения получаются через 1 мин, корректируются за темновой ток, замывание, плоское поле, сжимаются и направляются через Интернет на центральный сервер [<http://halpha.nso.edu>]. Снимки в реальном времени используются для предсказания космической погоды, а архив — для научных исследований Солнца [Harvey et al., 2011].

На небольшом телескопе с  $H\alpha$ -фильтром Coronado проведено сравнение толщины хромосферной «скорлупы» на лимбе в окрестности полюса и экватора [Bazin, Koutchmy, 2009]. Найденное отклоне-

ние от типичного значения интерпретировалось как эффект растяжки хромосферной «скорлупы» в течение минимума активности.

R. Smartt использовал фильтры DayStar с двумя полосами пропускания для получения изображений солнечной короны, исправленных за рассеянный свет [Smartt, 1982]. Одна полоса, в обыкновенном луче, была центрирована на линию короны, вторая, в необыкновенном, — на континуум на расстоянии примерно  $5 \text{ \AA}$  от линии короны. Вращающийся поляризатор поочередно пропускал изображения на один фотоприемник.

Подобная методика используется в хромосферном  $H\alpha$ -телескопе, в котором изображения в линии водорода и в континууме на расстоянии  $1 \text{ \AA}$  разделяются поляризационным расщепителем на два отдельных, параллельно регистрирующих канала [<http://www.icstars.com/apage1/2011/UCBoulderSolar/pages/20111107005445-d7d85b06.htm>].

В июле 2012 г. в космос на непродолжительное время была запущена ракета с небольшим телескопом High Resolution Coronal Imager для получения изображений участка солнечной короны в линии  $193 \text{ \AA}$  с высоким разрешением [<http://www.nasa.gov/centers/wallops/news/HI-C.html#.VNXgvCx2dSk>]. Дополнительный телескоп с  $H\alpha$ -фильтром DayStar использовался в реальном времени для ориентации главного телескопа с Земли, когда это было необходимо.

Когда оптические параметры фильтров соответствуют параметрам, объявленным компанией, с ними могут быть получены хорошие изображения. Однако фильтры поставляются без спектральных кривых с высоким разрешением, и для профессиональных исследований они нуждаются в лабораторной калибровке с высокой фотометрической точностью. Фильтры для профессиональных исследований должны иметь почти совершенную полосу пропускания по всему полю зрения, другими словами, однородность промежутка должна быть выдержана с точностью  $\lambda/100$  (а лучше —  $\lambda/200$ ). Чтобы изготовить слюдяной эталон с таким уровнем точности, требуется много времени, высокое искусство производства и проведение очень сложных испытаний (не зря эти фильтры такие дорогие). Пластинки должны быть правильно отобраны, приняты или забракованы уже на первом этапе изготовления фильтров. На следующих этапах изготовления элементов фильтра и при сборке оптической стопы дефекты в многослойных покрытиях, просветляющих слоях, пленочных поляризаторах, в иммерсии и склейках могут также ухудшить характеристики фильтра.

Компании иногда устанавливают в прибор недостаточно тщательно отобранные образцы слюды со ступеньками спайности или пропускают образцы с оптическими неоднородностями [Smartt, 1982]. Это приводит к скачкам полосы пропускания на ступеньках спайности или к плавным ее изменениям, что снижает резкость — важную спектральную характеристику эталона.

Нами были разработаны методы и устройства для исследований узкополосных фильтров. Они были использованы, в частности, для определения параметров

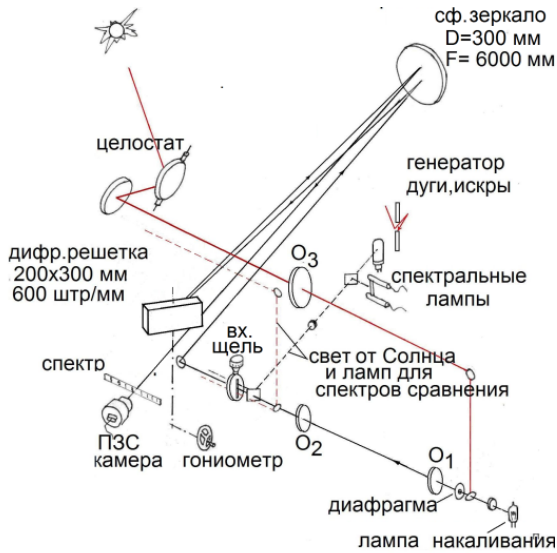


Рис. 16. Схема автоколлимационного спектрографа, оптической скамьи осветителей и источников сравнения

фильтров компании DayStar: двух турелей со сменными фильтрами QPE на линии  $\text{Na } 6562.8$ ,  $\text{He } D_3 5875.7$ ,  $\text{Na } D_1 5896.0$ ,  $\text{CaII K } 3933.4 \text{ \AA}$  и трех отдельных фильтров QPE на линии  $\text{Na } 6562.8$ ,  $\text{FeI } 6172.9$ ,  $\text{G } 4305.0 \text{ \AA}$ , полученных в 2014 г. для установки на солнечных телескопах. Мы также исследовали однородность полосы  $\text{Na}$ -фильтра Coronado и узкополосных отрезающих фильтров, которые были изготовлены в ИСЗФ для этого фильтра по заказу ИЗМИРАН. Вместе с описанием методов исследований локальных и интегральных спектральных характеристик фильтров, их оптической однородности и светового рассеяния приведены как примеры и некоторые результаты исследований. Учет этих результатов важен для выполнения точных фотометрических измерений при солнечных наблюдениях.

В качестве базового инструмента для исследований был использован лабораторный автоколлимационный солнечный спектрограф с фокусным расстоянием главного зеркала 6 м. Спектрограф сконструирован и изготовлен в ИСЗФ. Схема и параметры спектрографа указаны на рис. 16. Относительное отверстие спектрографа 1:30. Дифракционная решетка поворачивается точным гониометрическим столом, калибровка по длинам волн осуществляется по линиям спектра поглощения солнечного пучка или по эмиссионным линиям спектральных ламп, генератора дуги или искры. Спектры сравнения и спектр полосы пропускания фильтра одновременно регистрируются ПЗС-камерой. Высота входной щели спектрографа — 20 мм. Размер матрицы камеры —  $12.5 \times 12.5 \text{ мм}$  ( $512 \times 512$  пикселей). Дисперсия во втором порядке решетки в красной области спектра —  $0.03 \text{ \AA/пиксель}$ . Исследуемый фильтр освещается или солнечным пучком от целостата верхней оптической скамьи, или светом галогенной лампы накаливания нижней скамьи. Объективы  $O_1$ ,  $O_2$ ,  $O_3$  с фокусным расстоянием 210, 300 и 1000 мм соответственно в разной комбинации используются для освещения фильтра параллельным пучком (измерение интегральных характеристик), для построения изображения фильтра на щели

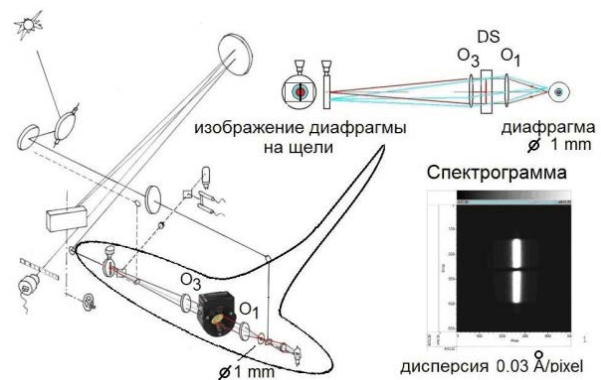


Рис. 17. Схема для измерения интегральных характеристик фильтров и спектрограмма полосы пропускания. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

спектрографа (измерение локальных характеристик) или для визуализации картины рассеяния в фильтре.

Измерение интегральных характеристик — это измерение центральной длины волны  $\lambda_c$  и полуширины полосы пропускания как суммарного значения для всей поверхности оптической стопы фильтра. На рис. 17 показана схема измерений. Фильтр устанавливается на оптической скамье в параллельном пучке, создаваемом объективом  $O_1$  ( $F=210 \text{ мм}$ ) при освещении его лампой через диафрагму диаметром 1 мм. При такой входной угловой апертуре пучка — 1:210 — полоса пропускания фильтра практически не смещается и не расширяется. Изображение отверстия диафрагмы размером 5 мм, приблизительно с пятикратным увеличением, строится на входной щели спектрографа длиннофокусным объективом  $O_3$  ( $F=1000 \text{ мм}$ ). Благодаря этому вся поверхность фильтра диаметром 32–40 мм проецируется через щель на коллиматор спектрографа (угловая апертура 1:30), и все участки фильтра со своим значением  $\lambda_c$  формируют общую полосу пропускания фильтра. Изображение спектра полосы пропускания всего фильтра (интегральная полоса) на мониторе ПЗС-камеры Princeton ( $512 \times 512$  пикселей) показано справа внизу на рис. 17.

Спектр пропускания и фотометрический разрез полосы пропускания  $\text{Na}$ -фильтра DayStar (номер  $\text{NaQPE050613}$ ) приведены на рис. 18. На спектрограмме справа от полосы — спектральная линия водородной лампы. Эта линия используется как репер при измерении положения и неоднородности полосы пропускания фильтра. При рабочей температуре полоса пропускания фильтра совпадает со спектральной линией. Измеренная полуширина полосы составляет  $\sim 0.9 \text{ \AA}$ , что почти в 2.5 раза больше полуширины, указанной компанией DayStar.

В схеме измерений локальной центральной длины волны и локальной полуширины полосы пропускания фильтр также освещается практически параллельным пучком (1:300) от объектива  $O_2$ , чтобы исключить смещение полосы из-за наклонного падения лучей. На входной щели спектрографа объектив  $O_1$  с апертурой 1:17.5 строит изображение участка поверхности слюдяного промежутка эталона (рис. 19). За щелью спектрографа установлена линза поля для согласования с апертурой спектрографа 1:30. При одной экспозиции получается спектр полосы пропус-

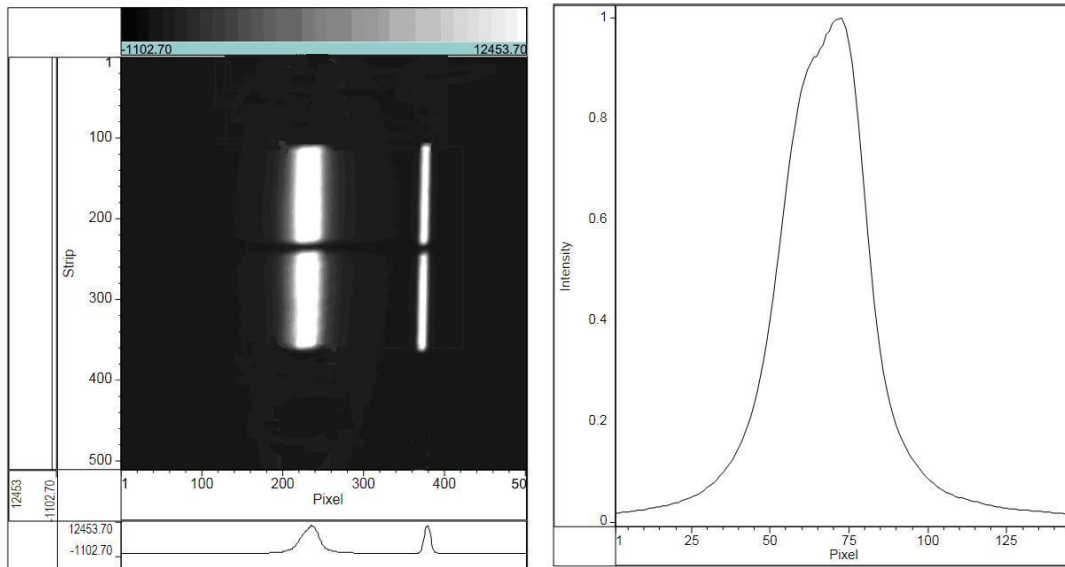


Рис. 18. Изображение и контур полосы фильтра 6563 Å в схеме интегральных измерений (фильтр при комнатной температуре)

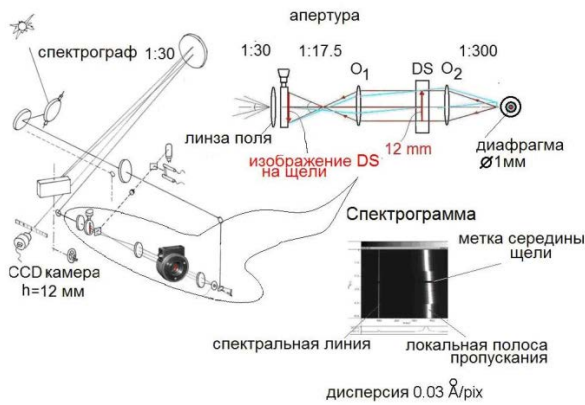


Рис. 19. Схема локальных измерений полуширины полосы пропускания и центральной длины волны  $\lambda_c$ . Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

кания 12-миллиметрового линейного участка фильтра (по размеру матрицы). Для получения спектрограмм и построения карт локальных параметров всей поверхности фильтр перемещается по двум координатам: с шагом 12 мм вдоль щели и 5 мм в перпендикулярном направлении.

На рис. 19 (внизу) как иллюстрация работы схемы приведена спектрограмма одного участка DayStar (DS) фильтра  $\lambda 6173 \text{ Å}$ . Скачок  $\lambda_c$  полосы на одном из участков фильтра и ее плавный наклон — более 0.5 полуширины полосы!

Изображения спектров полосы пропускания трех участков  $\text{H}\alpha$ -фильтра DayStar приведены вверху на рис. 20. Темная полоска, пересекающая полосу пропускания (пиксель ~№ 250 по оси Y), маркирует середину входной щели спектрографа. На двух изображениях видны скачок полосы и плавное ее искривление почти на полную ширину полосы. Справа — контур полосы пропускания, усредненный по площадке, указанной на спектрах белым прямоугольником, и нормированный на интенсивность в  $\lambda_c$ . Локальный контур одинаков для любого участка, если только в фотометрический разрез не попадает ска-

чок полосы. Полуширина полосы находится в пределах 0.45–0.50 Å. По спектрограммам даже этих участков видно, что полуширина полосы, интегрированная по всей поверхности фильтра, в несколько раз превосходит локальное значение, которое, как мы полагаем, указывается компанией в паспорте фильтра как номинальное значение полуширины полосы пропускания фильтра. По нашим измерениям: интегральная полуширина — 0.9 Å (см. рис. 18), локальная указана выше, а в паспорте — 0.38 Å.

По результатам сканирования построены карты распределения локальных параметров по поверхности фильтров. Как пример на рис. 21 показана 3D-карта распределения центральной длины волны на участке  $\text{H}\alpha$ -фильтра размером 30×30 мм.

Локальный сдвиг полосы пропускания фильтра напрямую связан с оптической толщиной разделителя (показатель преломления × геометрическая толщина) — слюдяной пластинки. Резкие скачки, наблюдающиеся по всему полю, — следы ступенек спайности от некачественного расщепления слюды; плавные неоднородности связаны с изменением показателя преломления в объеме кристалла слюды, из которого изготовлена пластинка. Максимальное локальное отклонение  $\lambda_c$  от среднего значения составляет  $\pm 0.8 \text{ Å}$ . Интегральная ширина полосы зависит от величины локального смещения  $\lambda_c$  участков и соотношения их площадей.

Ранее несколько другим методом мы измерили однородность эталона фильтра № 2688 компании Coronado. В 2009 г. ИЗМИРАН направил нам  $\text{H}\alpha$ -фильтр Coronado с целью изготовления отрезающего ИФ диаметром 50 мм. Фильтр Coronado был укомплектован небольшим, 20 мм, отрезающим фильтром для установки в окуляре любительского телескопа Solarmax, не пригодным для установки в прямом фокусе большого солнечного телескопа. Спектр полосы пропускания — «гребенка» — эталона Coronado без отрезающего фильтра вместе с  $\text{H}\alpha$ -линией лампы и их контуры изображены на рис. 22, а, б.

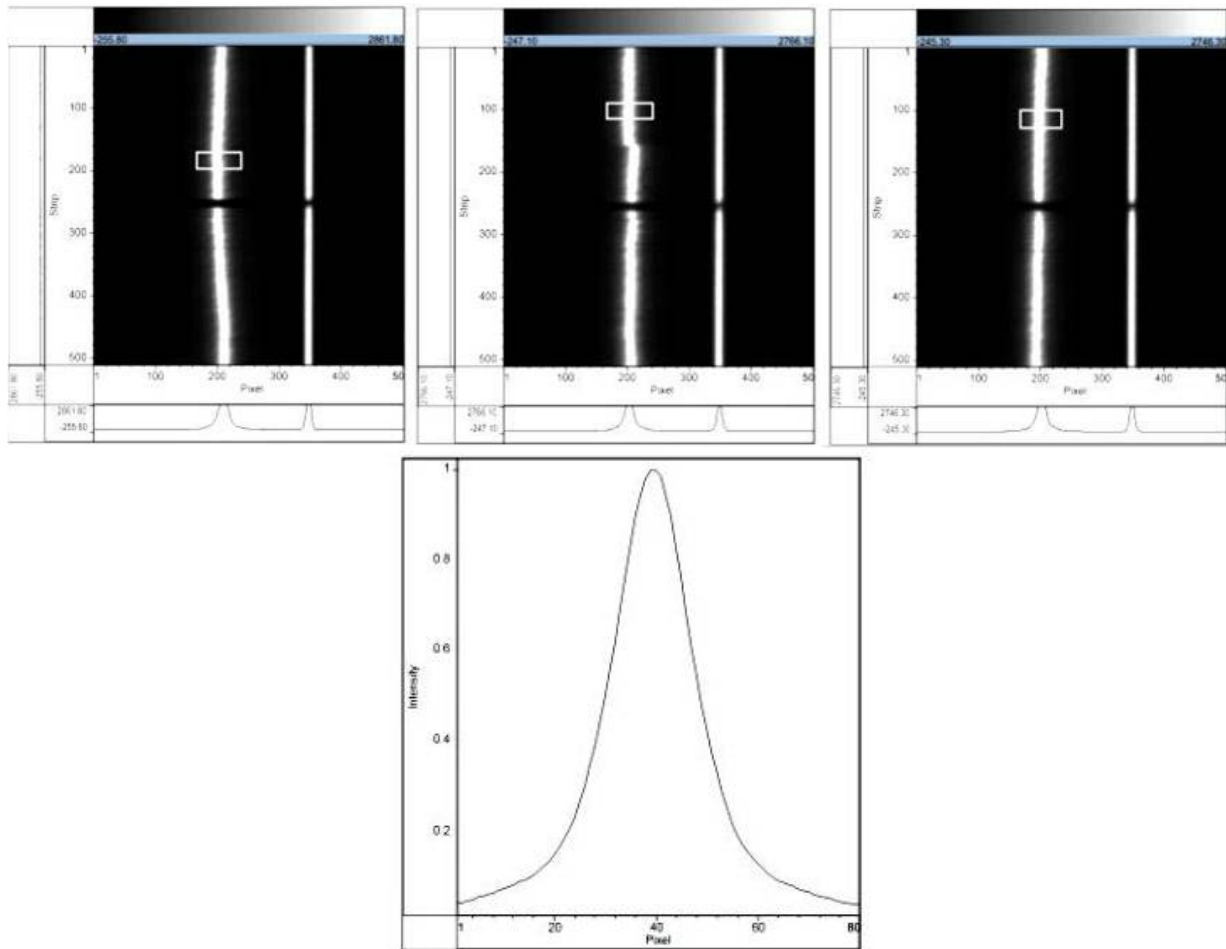


Рис. 20. Спектры и контур полосы пропускания трех линейных участков H $\alpha$ -фильтра DayStar (серийный номер NaQPE050613)

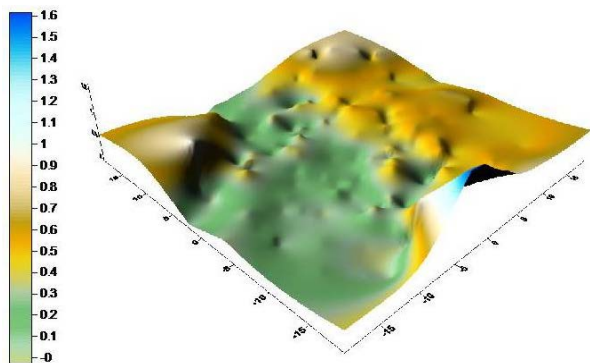


Рис. 21. 3D-карта отклонения  $n_d$  для H $\alpha$ -фильтра DayStar (серийный номер NaQPE050613). Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

Спектр (рис. 22, а) был получен при установке эталона вплотную к щели спектрографа, насколько позволяла оправа эталона, и освещении его параллельным пучком. Участок эталона вдоль радиального сечения от центрального разделителя до края показывает высокую спектральную однородность полосы. Мы не обнаружили скачков полосы пропускания, хотя при такой установке эталона они могут быть несколько размыты. В описанном раньше методе исследования неоднородностей с построением изображения эталона на щели спектрографа скачки не сгла-

живаются. На рисунке также показаны контур спектральной полосы нового отрезающего фильтра диаметром 50 мм, с полушириной полосы пропускания 5.9 Å (б) и контур его совместного пропускания с эталоном Coronado (г). Полуширина полосы эталона Coronado соответствовала паспортному значению 0.5 Å. Величина вторичных максимумов «гребенки» находится в пределах 2 % от главного максимума.

Мы также проверили однородность полосы пропускания изготовленного отрезающего ИФ. Собрали схему, позволяющую проверять однородность большого фильтра сразу вдоль всего его диаметра на спектрографе с относительно небольшой входной щелью (рис. 23). ИФ освещается объективом O<sub>1</sub> от лампы накаливания, участок изображения которой ограничивается диафрагмой диаметром около 1 мм. Изображение диафрагмы строится этим объективом за щелью спектрографа, а на щели получается сечение пучка — «проекция» ИФ размером намного меньше, чем сам ИФ. Проекция несет информацию о спектральном пропускании фильтра вдоль одного из диаметров. На рис. 24 показаны полосы пропускания для четырех диаметров и контуры сечений этих полос в центре (Y=450) и на расстоянии ~5 мм (Y=207, 700) от края фильтра относительно линии водорода. Спектры получены на 1024×1024 ПЗС-камере спектрографа (2009 г.).

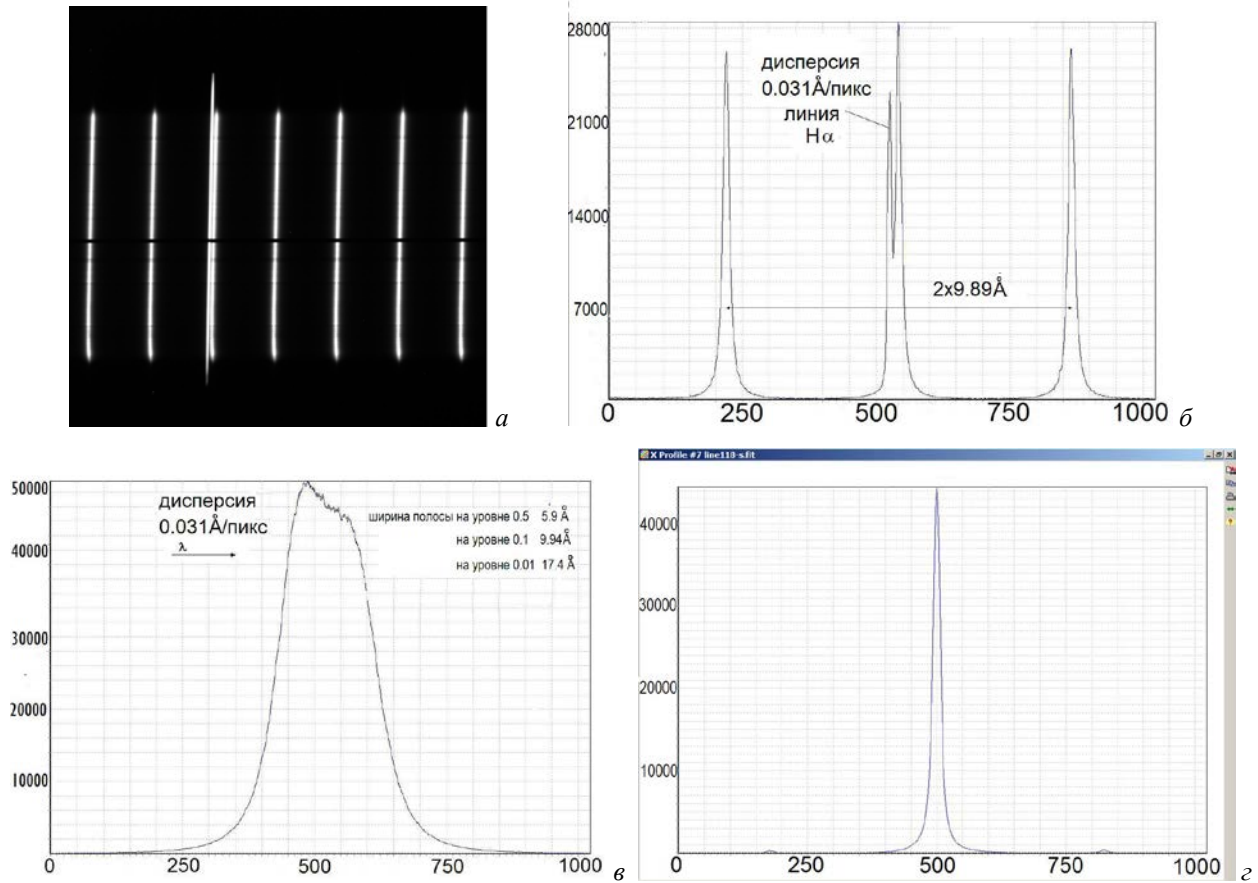


Рис. 22. Спектральное пропускание эталона Coronado (а, б), отрезающего фильтра (в) и общее пропускание (г). Дисперсия 0.031 Å/пиксель

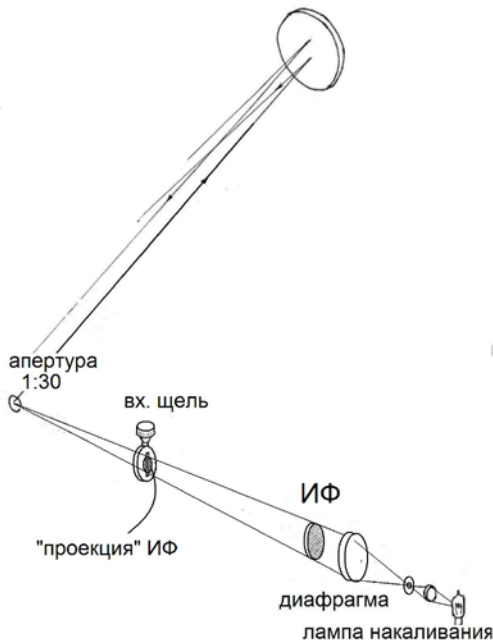


Рис. 23. Измерение однородности интерференционных фильтров в сходящемся пучке

При применении этого метода для прецизионных измерений полосы узкополосных эталонов надо учитывать разницу углов падения лучей в центре и на краю фильтра.

В спектрографическом методе для получения карты неоднородности центральной длины по всей

апертуре необходимо сканировать фильтр перед щелью спектрографа, так как при одной экспозиции регистрируется только линейный участок, «проваливающийся» в щель спектрографа. Метод сканирования полосы пропускания фильтра относительно узкой эмиссионной спектральной линии с номинальной (или близкой) для фильтра длиной волны дает более наглядную картину местоположения неоднородностей и величину изменения центральной длины волны в каждой точке апертуры фильтра. Сканирование полосы пропускания фильтра с твердым промежутком осуществляется изменением температуры промежутка. Для H $\alpha$ -фильтра с эталоном из слюды увеличение температуры на 1 °C смещает примерно на 0.1 Å пик полосы пропускания в красную область спектра, а уменьшение — в синюю. Терморегулятор DayStar-фильтра обеспечивает сканирование полосы изменением температуры в пределах  $\pm 1$  Å от номинального значения 6562.8 Å. Положение полосы и ее температурное смещение указывается в Å на дисплее фильтра (рис. 25).

На рис. 26 представлена установка, разработанная для визуализации и исследования полосы пропускания по всей поверхности фильтра.

Вся поверхность H $\alpha$ -фильтра освещается водородной гейслеровской трубкой через коллиматор с  $F=1000$  мм. Угловая апертура светящегося тела трубки устанавливается в пределах 1:30, что считается приемлемым, если допустить для наклонных пучков смещение полосы фильтра в пределах 0.2 Å.

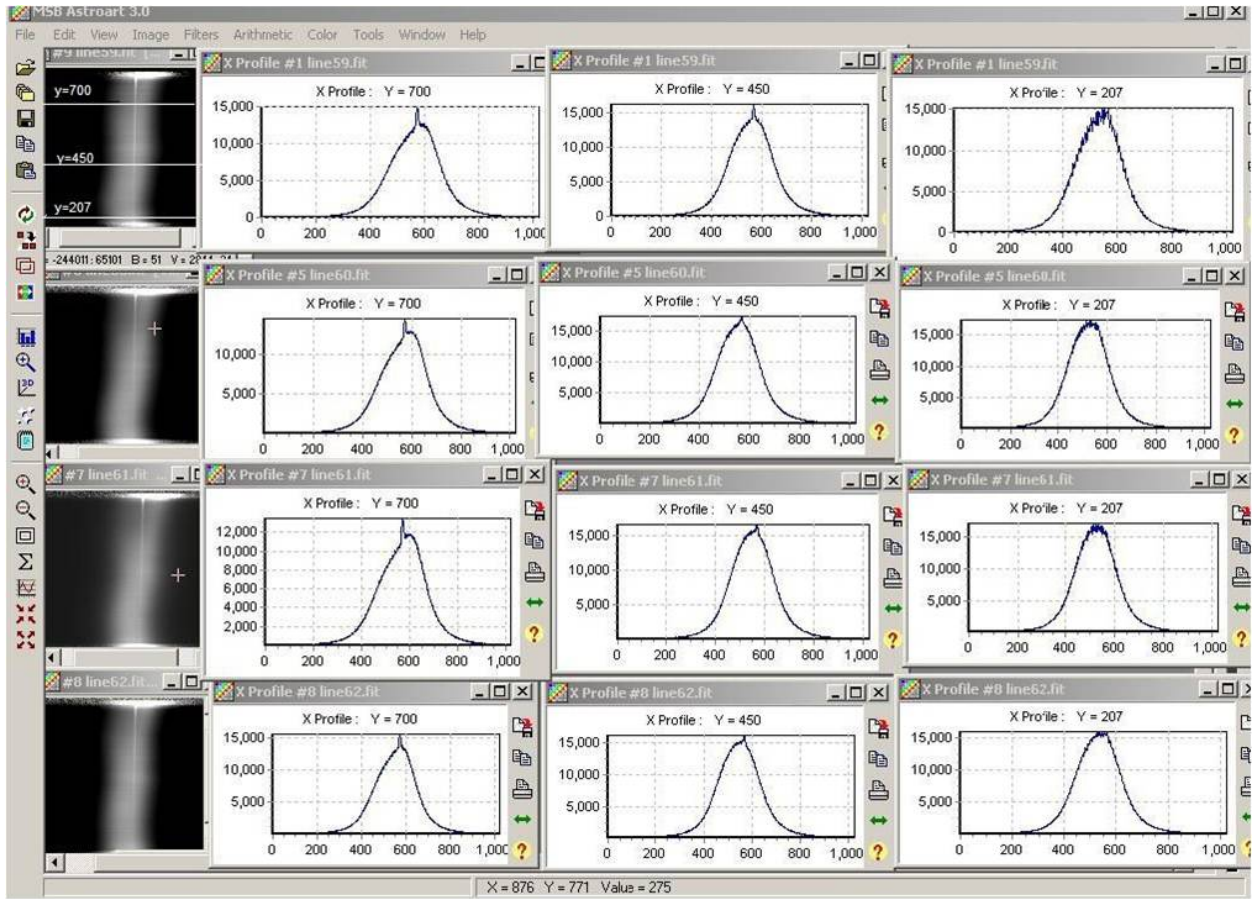


Рис. 24. Полоса пропускания ИФ при азимутах диаметра фильтра 0, 45, 90, 135° (первый–четвертый ряды по горизонтали соответственно): Y=700, 450, 207 — сечения по высоте кадра. Дисперсия 0.031 Å/пиксель. Ширина полосы фильтра  $\delta\lambda_{0.5}=6 \text{ \AA}$ ,  $\delta\lambda_{0.1}=10 \text{ \AA}$ ,  $\delta\lambda_{0.01}=20 \text{ \AA}$ , пропускание примерно 55 %, разброс положения полосы по полю  $\pm 0.4 \text{ \AA}$ , пропускание фильтра на расстоянии  $\pm 9.89 \text{ \AA}$ , где расположены соседние максимумы «гребенки» ФП, около 1.5 %



Рис. 25. H $\alpha$ -фильтр DayStar, номер HAQPE050613. На корпусе фильтра (слева) указана номинальная длина волны 6562.8 Å, полуширина полосы 0.3 Å (в паспорте 0.38 Å). На дисплее терморегулятора фильтра (справа) отображается текущее значение  $\lambda_{ц}$ . Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

Изображение эталона фильтра строится объективом с  $F=210 \text{ мм}$  на матрице камеры Nikon размером  $15 \times 24 \text{ мм}$ . Контуры полосы локального пропускания фильтра и эмиссионной линии водородной трубки (по спектрографическим данным) приведены на рис. 26 (вверху справа). Контур линии значительно уже контура фильтра — важное условие для измерений методом сканирования полосы пропускания. Внизу показаны изображения эталона фильтра для нескольких положений полосы пропускания (разные температуры) при сканировании полосы фильтра относительно линии гейслеровской трубки. Хорошо видны следы плохого расщепления

слюды по спайности, связанные с ними скачки пропускания фильтра (ср. с рис. 21), свили и неоднородности показателя преломления, вызванные, скорее всего, нарушениями роста кристалла слюды из-за нестабильности окружающих природных условий.

На рис. 27 для семи участков слюдяного эталона, которые показаны квадратиками на изображении фильтра, приведены кривые изменения их пропускания (контуры полосы) в зависимости от положения полосы фильтра относительно H $\alpha$ -линии спектральной трубки.

Размер измеряемого участка около  $1 \times 1 \text{ мм}$ . Не все кривые проходят через максимум из-за ограниченного диапазона сканирования терморегулятора фильтра. Средняя длина волны максимумов пропускания семи участков близка к значению (на дисплее фильтра)  $6563.2 \text{ \AA}$ , а не к номинальному  $6562.8 \text{ \AA}$ , указанному на корпусе фильтра. Полуширины полос порядка  $0.8 \text{ \AA}$  (по спектральным измерениям локальная полуширина полосы около  $0.5 \text{ \AA}$ , а интегральная —  $0.9 \text{ \AA}$ ). В этих данных нам важны изменения  $\lambda_{ц}$  локальных полос пропускания, а не их ширина, которую надо исправлять за контур линии. Средний разброс  $\lambda_{ц}$  по поверхности фильтра составляет около  $0.6 \text{ \AA}$ , максимальный — более  $1 \text{ \AA}$ . На участке 1 контур полосы имеет два максимума, которых, в принципе, не должно быть. Объяснение

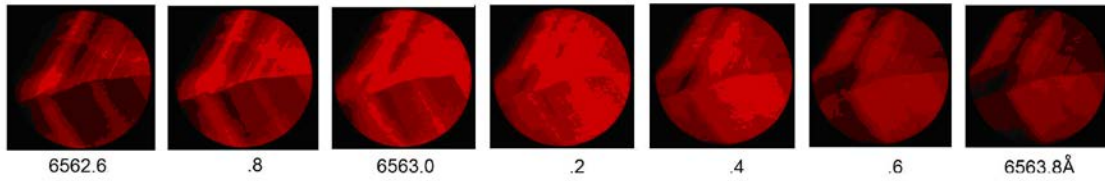


Рис. 26. Исследование полосы пропускания одновременно в каждой точке на всей апертуре фильтра. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

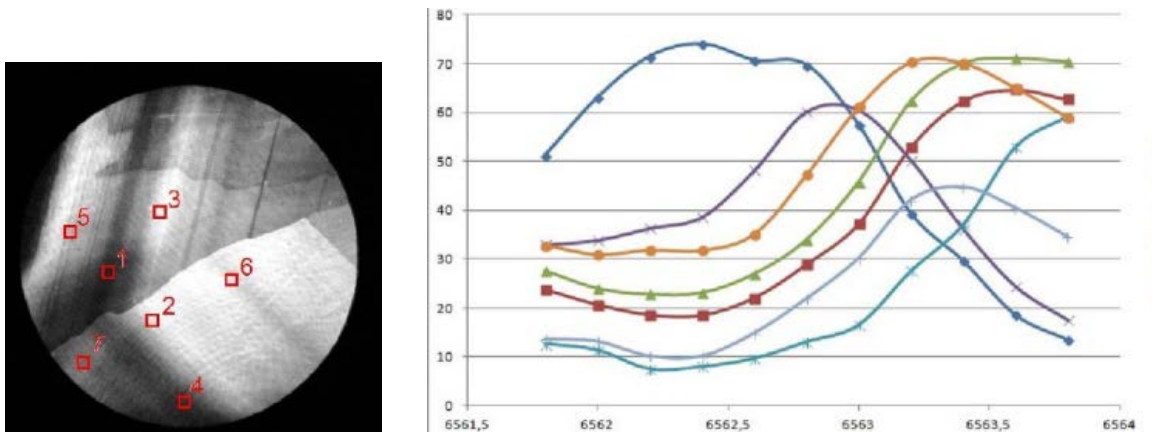


Рис. 27. Контуры полос пропускания участков, обозначенных на фильтре слева. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

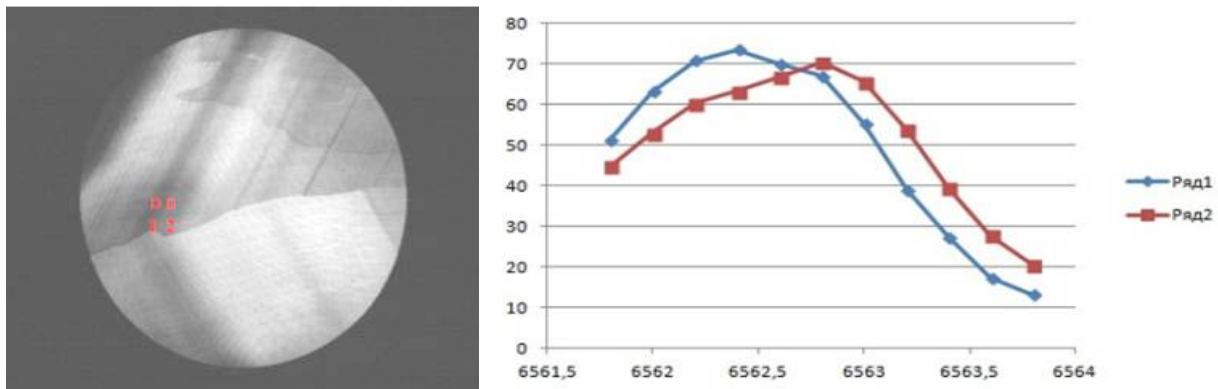


Рис. 28. Контуры пропускания близко расположенных участков эталона фильтра. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи



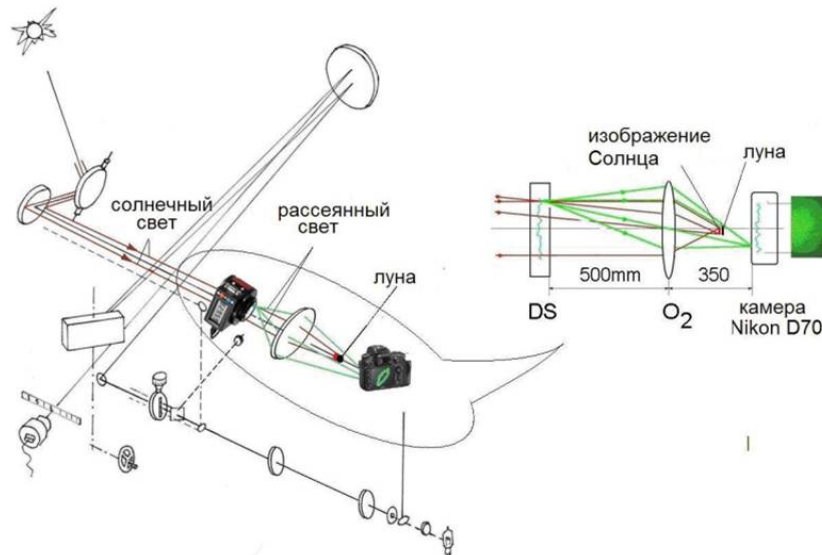


Рис. 29. Исследование однородности и рассеяния оптической стопы фильтра. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

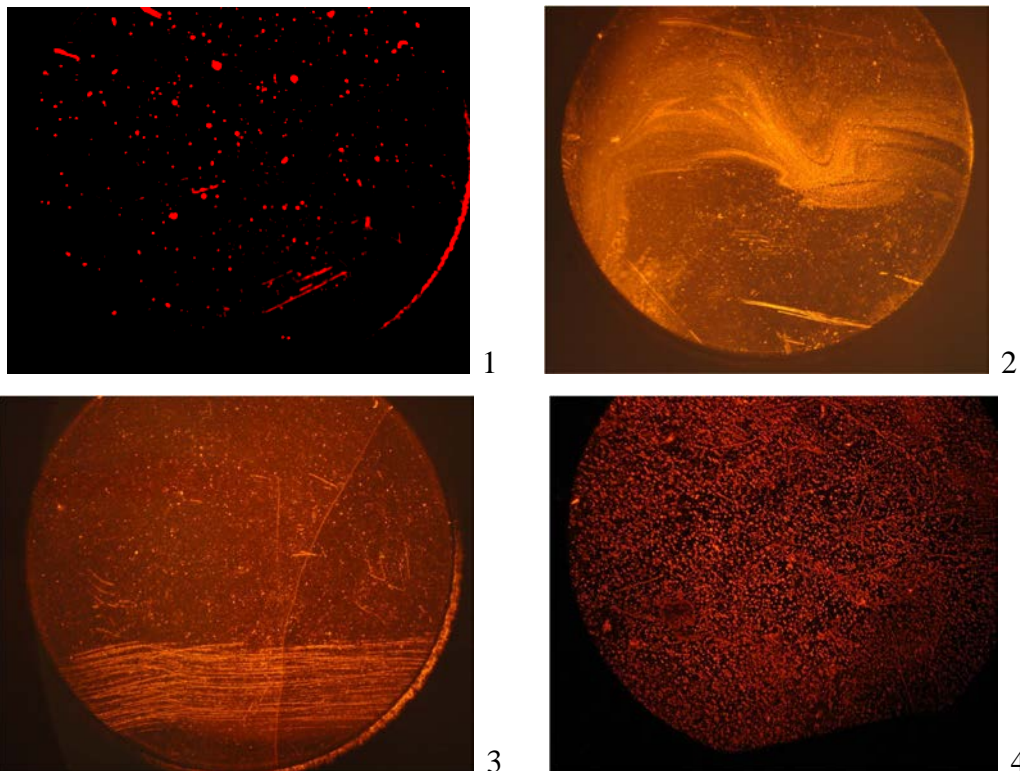


Рис. 30. Изображения в свете, рассеянном оптической стопой фильтра DayStar: 1 —  $\text{H}\alpha$  6562.9 Å; 2 —  $\text{He D}_3$  5875.7 Å; 3 —  $\text{Na D}_1$  5896.0 Å из турели SSFWTT020613; 4 —  $\text{Na D}_1$  5895.7 Å из турели SSFWTT010613. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

этому — в исследуемом месте оказались тесно расположенные участки с большим сдвигом  $\lambda_{\text{ч}}$ . На рис. 28 приведены кривые пропускания отдельно для двух площадок на месте участка 1.

Для исследования оптической однородности и рассеяния оптической стопы фильтр освещается от целостата пучком солнечного света (рис. 29), направленным вдоль верхней оптической скамьи спектрографа (см. рис. 16). Расходимость пучка 30 угл. мин. Установленный за фильтром объектив  $\text{O}_2$  в своем 300-миллиметровом фокусе строит трехмиллиметровое изображение Солнца. Яркое изображение

Солнца перекрывается заслонкой — «луной». Все освещенные поверхности оптической стопы рассеивают во все стороны свет, и он проходит мимо «луны». Тот же самый объектив  $\text{O}_2$  строит в рассеянном свете изображение стопы фильтра на матрице камеры Nikon D70. На рис. 30 приведены изображения оптических стоп четырех фильтров DayStar.

Оптическая стопа фильтра DayStar (рис. 10) содержит: слюдяной эталон с многослойными диэлектрическими зеркалами, отрезающий и блокирующий фильтр, циркулярные поляризаторы, просветленные защитные стекла — более десятка оптических дета-

лей, соединенных иммерсией. Дефекты, которые могут вносить вклад в рассеянный свет, — это резкие скачки показателя преломления в этих деталях: поток свилей (рис. 30, снимок 2), включения, пузыри, царапины на слюдяном эталоне (снимок 3), кристаллитная структура разрушенных от влажности многослойных зеркал (снимок 4). Снимок 1 демонстрирует высокое качество оптических элементов фильтра.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачей настоящей работы была помощь профессиональным исследователям и астрономам — любителям наблюдений Солнца при выборе фильтров ФП. В первой части работы были рассмотрены предложенные пятью ведущими компаниями конструкции узкополосных фильтров на основе эталона ФП и некоторые технологические вопросы их изготовления. Усилия производителей направлены на достижение экстремальных значений основных параметров фильтров ФП: полуширины полосы пропускания, резкости, углового поля зрения (допустимого угла приема излучения), светового диаметра фильтра и однородности полосы пропускания по апертуре фильтра.

Описанные во второй части работы схемы и устройства позволяют с высокой точностью провести исследования монохроматических фильтров по нескольким параметрам, оценить пригодность фильтров для профессиональных солнечных наблюдений и выработать рекомендации по их использованию. Авторы составили представление о некоторых фильтрах, содержащих эталон с твердым промежутком (DayStar, Coronado, Solar Spectrum). О фильтрах с воздушным промежутком (Solarscope, Lunt) мы можем судить по отзывам многочисленных энтузиастов солнечных наблюдений.

Параметры коммерческих фильтров, их соответствие требованиям, которые мы ранее рассматривали, зависят от конструкций и технологии изготовления фильтров, разработанных компаниями. Для использования фильтров в профессиональных исследованиях важно убедиться, что параметры фильтров, декларируемые компаниями, соответствуют реальным.

Высокое пропускание необходимо для обеспечения коротких экспозиций, которые позволяют «заморозить» влияние атмосферы на качество изображения. Все фильтры содержат эталон ФП, отрезающий фильтр и теплофильтры. Фильтры с воздушным эталоном имеют более высокое пропускание в широком диапазоне спектра, чем слюдяные твердотельные. Природный кристалл слюды — мусковит — имеет окраску, что затрудняет его использование в синей области спектра. Кроме того, в кристалле возникают два луча, поэтому в фильтр дополнительно устанавливаются поляризатор, который пропускает только один луч — обыкновенный или необыкновенный, что приводит к потере более 50 % света.

Высокая однородность центральной длины волны максимума полосы пропускания по полю фильтра — важная характеристика для доплеровских измерений. У фильтров Coronado однородность определяется постоянством показателя преломления по полю золь-гель-промежутка, необходимая величина которого подгоняется облучением ультрафиолетом и

плоскостностью оптических поверхностей эталона и разделителей. Эти «рукотворные» параметры выдерживаются компанией. Однако остается открытым вопрос их стабильности при долгом сроке эксплуатации. В фильтрах DayStar и Solar Spectrum слюдяная пластинка промежутка, изготовленная из оптически однородного и качественно расщепленного кристалла, обеспечивает полосу, однородную по апертуре фильтра и стабильную по времени. На практике же оказалось, что некоторые фильтры, полученные от компании DayStar, имели неоднородное поле зрения и не соответствовали декларированному статусу для «профессиональных исследований»! В DayStar-фильтрах, установленных на GONG, с помощью сложного термостата на пластинке слюды создавали температурные градиенты, которые локально изменяли ее показатель преломления, чтобы в какой-то степени компенсировать влияние природных оптических неоднородностей.

Устойчивость фильтра к воздействию окружающей атмосферы и стабильное по времени положение полосы пропускания обеспечивают однородность длительных рядов наблюдений.

Коммерческие фильтры с воздушным промежутком при эксплуатации в изменяющихся окружающих условиях в большинстве своем требуют постоянного участия наблюдателя в поддержке положения полосы пропускания, что осуществляется наклоном фильтра или изменением давления воздуха в промежутке эталона. Безусловно, фильтры с твердым эталоном двух компаний DayStar и Solar Spectrum имеют стабильную полосу пропускания в пределах точности электронного поддержания их рабочей температуры. Фильтры с твердым эталоном могут выдержать весовые перегрузки, транспортировку. Один раз отрегулированный фильтр может эксплуатироваться практически без участия наблюдателей. Продолжительность жизни фильтра ограничивается стабильностью зеркальных интерференционных покрытий эталона и отрезающих фильтров в условиях влажной атмосферы и нагрева в солнечном пучке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bazin C., Koutchmy S. Propriétés photométriques d'étalons Fabry-Pérot pour la raie H $\alpha$ : application à l'analyse de la frange chromosphérique du Soleil // *Observations & Travaux*. 2009. V. 74. P. 2–13.
- Gary G.A., Balasubramaniam K.S., Sigwarth M. Multiple etalon systems for the Advanced Technology Solar Telescope // *Proc. SPIE. Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics*. 2003. V. 4853. P. 252–272. DOI: 10.1117/12.460272.
- DayStar Filters. Available at: [http://www.company7.com/daystar/products\\_old.html#top](http://www.company7.com/daystar/products_old.html#top) (accessed 30 March 2014).
- H-Alpha Network Monitor. Available at: <http://halph.nso.edu/> (accessed 25 June 2014).
- Harvey J.W., Bolding J., Clark R., et al. Full-disk solar H-alpha images from GONG // *SPD Meeting*. 2011. N 42. 17.45. (Bulletin of the American Astronomical Society. V. 43).
- HI-C Sounding Rocket Mission. Available at: <http://www.nasa.gov/centers/wallops/news/hi-c.html#.VNXgvCx2dSk> (accessed 15 October 2014).
- ICSTARS and DayStar filters. Available at: <http://www.icstars.com/apage1/2011/UCBoulderSolar/pages/2011107005445-d7d85b06.htm> (accessed 15 December 2014).

Judge P.G., Tritschler A., Uitenbroek H., et al. Fabry–Perot versus slit spectropolarimetry of pores and active network: Analysis of IBIS and Hinode data // *Astrophys. J.* 2010. V. 710. P. 1486–1497. DOI:10.1088/0004-637X/710/2/1486.

Lunt A.G., Serrano M.B., Sidorin Ya., Lunt D. Etalon assembly tuned by applying counterbalanced compression forces: Patent US 7054518 B2. Publ. 30.05.2006.

Lunt D. High performance telescopic etalon filters: Patent US6181726 B1. Publ. 30.01.2001.

Lunt Solar Systems. Available at: <http://luntsolarsystems.com/shop/>, [https://www.astronomics.com/lunt-solar-systems-telescopes\\_c23.aspx](https://www.astronomics.com/lunt-solar-systems-telescopes_c23.aspx) (accessed 16 January 2015).

Martínez Pillet V., Del Toro Iniesta J.C., Álvarez-Herrero A., et al. The Imaging Magnetograph eXperiment (IMaX) for the Sunrise balloon-borne solar observatory // *Sol. Phys.* 2011. V. 268, Iss. 1. P. 57–102. DOI: 10.1007/s11207-010-9644-y.

Meade Instruments. Available at: [http://www.meade.com/product\\_pages/coronado/accessories.php](http://www.meade.com/product_pages/coronado/accessories.php) (accessed 4 February 2015).

Puschmann K.G., Balthasar H., Bauer S.M., et al. The GREGOR Fabry–Perot interferometer — a new instrument for high-resolution spectropolarimetric solar observations // *ASP Conf. Series.* 2012. V. 463. P. 423–428.

Ravindra B., Banual R.K. A dual Fabry–Perot based narrow band imager for the National Large Solar Telescope // *ASI Conf. Series.* 2011. V. 2. P. 47–53.

Resonant Spaces — H-Alpha Etalons. Available at: <http://www.cloudynights.com/page/articles/cat/articles/accessories1405754339/resonant-spaces-h-alpha-etalons-r1729> (accessed 16 March 2014).

Resonant Spaces — Part 2: An Introduction to Solid Spaced Etalons and Solar Telescope Technology. Available at: <http://www.cloudynights.com/page/articles/cat/resonant-spaces-part-2-an-introduction-to-solid-spaced-etalons-and-solar-telescope-technology-r1943> (accessed 17 September 2014).

Scharmer G.B., Henriques V.M. SST/CRISP observations of convective flows in a sunspot penumbra // *Astron. Astrophys.* 2012. V. 540, P. A19–A19-16. DOI: 10.1051/0004-6361/201118026.

Sidorin Ya. Method of manufacture of integrated optical devices: Patent US 20050227175 A1. Publ. 13.10.2005.

Sidorin Ya., Lunt D.L. Etalon cavity with filler layer for thermal tuning: Patent US 7142573 B2. Publ. 28.11.2006.

Sidorin Ya., Lunt D.L., Chou B.R. Etalon-based filters for solar and atmospheric research // *Optical Engineering.* 2005. V. 44. P. 076001-1–076001-6. DOI: 10.1117/1.1947784.

Smartt R.N. Solar corona photoelectric photometer using mica etalons // *Proc. SPIE.* 1982. V. 331. P. 442–447. DOI:10.1117/12.933486.

Solarscope LTD. Filters Systems Overview. Available at: <http://www.company7.com/solarscope/index.html> (accessed 25 June 2014).

URL: <http://thesolarexplorer.net> (accessed 30 March 2015).

URL: [https://www.astronomics.com/coronado-hydrogen-alpha-solar-filters\\_c161.aspx](https://www.astronomics.com/coronado-hydrogen-alpha-solar-filters_c161.aspx) (accessed 2 March 2015).

URL: <http://www.youtube.com/watch?v=Hx5abAO0ctc> (accessed 15 January 2015).

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ei6AUibbZmA> (accessed 25 November 2014).

## REFERENCES

Bazin C., Koutchmy S. Photometric properties of solar H-alpha Fabry–Perot etalons: Application to the analysis of the chromospheric fringe. *Observations & Travaux.* 2009, vol. 74, pp. 2–13 (in French).

Gary G.A., Balasubramaniam K.S., Sigwarth M. Multiple etalon systems for the Advanced Technology Solar Telescope. *Proc. SPIE. Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics.* 2003, vol. 4853, pp. 252–272. DOI: 10.1117/12.460272.

*DayStar Filters.* Available at: [http://www.company7.com/daystar/products\\_old.html#top](http://www.company7.com/daystar/products_old.html#top) (accessed 30 March 2014).

*H-Alpha Network Monitor.* Available at: <http://halph.nso.edu/> (accessed 25 June 2014).

Harvey J.W., Bolding J., Clark R., et al. Full-disk Solar H-alpha Images from GONG. *SPD Meeting.* 2011, no. 42, 17.45. (*Bull. Amer. Astron. Soc.* vol. 43).

*HI-C Sounding Rocket Mission.* Available at: <http://www.nasa.gov/centers/wallops/news/Hi-C.html#.VNXgvCx2dSk> (accessed 15 October 2014).

*ICSTARS and DayStar filters.* Available at: <http://www.icstars.com/apage1/2011/UCBoulderSolar/pages/20111107005445-d7d85b06.htm> (accessed 15 December 2014).

Judge P.G., Tritschler A., Uitenbroek H., et al. Fabry–Perot versus slit spectropolarimetry of pores and active network: Analysis of IBIS and Hinode data. *Astrophys. J.* 2010, vol. 710, pp. 1486–1497. DOI: 10.1088/0004-637X/710/2/1486.

Lunt A.G., Serrano M.B., Sidorin Ya., Lunt D. *Etalon assembly tuned by applying counterbalanced compression forces:* Patent US 7054518 B2, 30.05.2006.

Lunt D. *High performance telescopic etalon filters:* Patent US6181726 B1, 30.01.2001.

*Lunt Solar Systems.* Available at: <http://luntsolarsystems.com/shop/>, [https://www.astronomics.com/lunt-solar-systems-telescopes\\_c23.aspx](https://www.astronomics.com/lunt-solar-systems-telescopes_c23.aspx) (accessed 16 January 2015).

Martínez Pillet V., Del Toro Iniesta J.C., Álvarez-Herrero A., et al. The Imaging Magnetograph eXperiment (IMaX) for the Sunrise balloon-borne solar observatory. *Sol. Phys.* 2011, vol. 268, iss.1, pp. 57–102. DOI: 10.1007/s11207-010-9644-y.

Meade Instruments. Available at: [http://www.meade.com/product\\_pages/coronado/accessories.php](http://www.meade.com/product_pages/coronado/accessories.php) (accessed 4 February 2015).

Puschmann K.G., Balthasar H., Bauer S.M., et al. The GREGOR Fabry–Perot interferometer — a new instrument for high-resolution spectropolarimetric solar observations. *ASP Conf. Series.* 2012. vol. 463. pp. 423–428.

Ravindra B., Banual R.K. A dual Fabry–Perot based narrow band imager for the National Large Solar Telescope. *ASI Conf. Series.* 2011, vol. 2, pp. 47–53.

Resonant Spaces — H-Alpha Etalons. Available at: <http://www.cloudynights.com/page/articles/cat/articles/accessories1405754339/resonant-spaces-h-alpha-etalons-r1729> (accessed 16 March 2014).

Resonant Spaces — Part 2: An Introduction to Solid Spaced Etalons and Solar Telescope Technology. Available at: <http://www.cloudynights.com/page/articles/cat/resonant-spaces-part-2-an-introduction-to-solid-spaced-etalons-and-solar-telescope-technology-r1943> (accessed 17 September 2014).

Scharmer G.B., Henriques V.M. SST/CRISP observations of convective flows in a sunspot penumbra. *Astron. Astrophys.* 2012, vol. 540, A19. DOI: 10.1051/0004-6361/201118026.

Sidorin Ya. *Method of manufacture of integrated optical devices:* Patent US 20050227175 A1, 13.10.2005.

Sidorin Ya., Lunt D.L. *Etalon cavity with filler layer for thermal tuning:* Patent US 7142573 B2, 28.11.2006.

Sidorin Ya., Lunt D.L., Chou B.R. Etalon-based filters for solar and atmospheric research. *Optical Engineering.* 2005, vol. 44. 076001. DOI: 10.1117/1.1947784.

Smartt R.N. Solar corona photoelectric photometer using mica etalons. *Proc. SPIE.* 1982, vol. 331, pp. 442–447. DOI: 10.1117/12.933486.

*Solarscope LTD. Filters Systems Overview.* Available at: <http://www.company7.com/solarscope/index.html> (accessed 25 June 2014).

URL: <http://thesolarexplorer.net> (accessed 30 March 2015).

URL: [https://www.astronomics.com/coronado-hydrogen-alpha-solar-filters\\_c161.aspx](https://www.astronomics.com/coronado-hydrogen-alpha-solar-filters_c161.aspx) (accessed 2 March 2015).

URL: <http://www.youtube.com/watch?v=Hx5abAO0ctc> (accessed 15 January 2015).

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ei6AUibbZmA> (accessed 25 November 2014).