

---

## ИСЛАНДСКИЙ ШПАТ И РАЗРАБОТКА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ (ИПФ) ICELAND SPAR AND BIREFRINGENT FILTER (BF) DEVELOPMENT

---

**В.И. Скоморовский** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, skoal@iszf.irk.ru***Г.И. Куштал** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, kushtal@iszf.irk.ru***Л.С. Токарева***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, lopteva@iszf.irk.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. Tokareva***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, lopteva@iszf.irk.ru*

---

**Аннотация.** Двухлучепреломляющие кристаллы для ИПФ должны обеспечить необходимую линейную апертуру, качество волнового фронта и пропускание фильтра в заданной области спектра. На основании обзора зарубежных и отечественных разработок ИПФ анализируются трудности использования кристаллов известных месторождений. В Институте солнечно-земной физики были разработаны ИПФ с экстремальными характеристиками с использованием инновационной методики обогащения кристаллов Восточно-Сибирских месторождений и новых методов оптической обработки и контроля элементов ИПФ. Приведены характеристики фильтров. Дальнейший прогресс в создании ИПФ в нашей стране зависит от наличия необходимых синтетических кристаллов и природного кристалла исландского шпата, судьба которого в России сложилась не просто.

**Ключевые слова:** интерференционно-поляризационный фильтр, исландский шпат, морфология кристаллов, оптическая обработка, наблюдения Солнца.

---

**Abstract.** Birefringent crystals for BF are required to provide the necessary linear aperture, wavefront quality, and filter transmission in a given spectral region. Based on the review of foreign and domestic BF developments, the difficulties in using crystals from known deposits are examined. The Institute of Solar-Terrestrial Physics has developed BFs with extreme characteristics, using an innovative method for enriching crystals from East Siberian deposits and new methods for optical treatment and control of BF elements. We present the characteristics of the filters. Further progress in the creation of BFs in our country depends on the availability of necessary synthetic crystals and natural crystal of Iceland spar, which turned out to be a difficult fate in Russia.

**Keywords:** birefringent filter, Iceland spar, crystal morphology, optical treatment, solar observations.

---

### ВВЕДЕНИЕ

Высокое качество и оперативность наблюдений тонкой структуры солнечной атмосферы, проводимых с помощью ИПФ, а также быстрота настройки фильтров показывают, что ИПФ успешно конкурируют с фильтрами других типов, несмотря на дороговизну и трудоемкость изготовления. Все еще малая распространенность ИПФ на многие спектральные линии, имеющих различные характеристики, пожалуй, объясняется редкостью исландского шпата (оптического кальцита) в природе и отсутствием необходимых синтетических кристаллов. Дан обзор развития мирового фильтростроения, которое было напрямую связано с поставками исландского шпата. Достижение экстремальных спектральных характеристик фильтров и сохранение высокого качества волнового фронта в известных фильтрах на наземных и космических телескопах зависело от оптической однородности кристаллов известных месторождений. На основании обзора анализируются

причины, по которым долгое время ограничивалось развитие ИПФ с использованием исландского шпата.

Цель работы — показать, что использование кристаллосырья Восточно-Сибирских месторождений, открытых экспедицией «Шпат», и инновационная методика обогащения (вместо раскалывания кристаллов на ромбоэдры) значительно расширяют возможности изготовления ИПФ. В ИСЗФ СО РАН разрабатывались фильтры с очень узкой полосой пропускания совместно с сотрудниками экспедиции на базе обогатительного цеха экспедиции «Шпат». С одной стороны, впервые для элементов ИПФ велись раскройка кристаллов, ориентация заготовок с учетом морфологии роста природного кальцита и исследование оптической однородности заготовок на интерферометре, установленном ИСЗФ в обогатительном цехе. С другой стороны, в лаборатории института была создана оригинальная методика прецизионной ориентации и доводки (оптическая обработка с одновременным интерференционным

контролем параметров пластин) кристаллических элементов из исландского шпата. Такой подход оказался принципиальным для успешного создания в ИСЗФ СО РАН уникальных фильтров для наблюдений Солнца в линиях  $\text{BaI } 4554 \text{ \AA}$ ,  $\text{H}\beta$ ,  $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$ ,  $\text{Na}$  и других прогностических линиях. Методы изготовления, рассмотренные в обзоре, будут полезны для разработчиков новых ИПФ.

В связи с остановкой в России добычи природного исландского шпата мы обратились к синтетическому кальциту, промышленный выпуск которого был успешно начат во Всесоюзном институте синтеза минерального сырья (ВНИИСИМС). Исследования, выполненные в ИСЗФ СО РАН, показали высокую оптическую однородность полученных образцов синтетических кристаллов. Они хороши для изготовления поляризационных призм, но их размер недостаточен для использования в ИПФ.

### ИСЛАНДСКИЙ ШПАТ (ОПТИЧЕСКИЙ КАЛЬЦИТ) ЗА РУБЕЖОМ. ПЕРВЫЕ ИПФ

Начало разработки месторождения оптического кальцита Хельгустадир (Восточная Исландия) относится к середине XVII в. Если бы кальцит не ломался в виде ромбоэдра под углом к его оптической оси “lucky break” [Gunter, 2003], могли пройти столетия до того, как ученые обнаружили бы поляризационные свойства света. Первая составная поляризационная призма была изобретена Николем в 1829 г. [Kristjánsson, 2015]. Начало развития кристаллооптики можно отнести к 1873 г., когда впервые в Германии Халле организовал специальные мастерские по обработке кристаллов. Почти весь кальцит, который к началу XX в. использовался для оптических исследований и приборостроения, был получен, по видимому, из единственного карьера в Хельгустадире. Причина — исключительный размер кристаллов, их химическая чистота и отсутствие видимых дефектов. Однако с 1873 до 1914 г. добыча кристаллов носила периодический характер, что приводило к «голодным» условиям для многих ученых и приборостроителей, которые нуждались в этом материале. Новые месторождения оптических кристаллов в промышленных количествах были обнаружены на юге Африки в начале 1920-х гг., вскоре после того, как исландское правительство за немалые деньги снова «открыло» угасающий карьер Хельгустадир. В Европе много сил было потрачено на способы экономии при использовании исландского шпата, а также на открытие или изобретение заменителей.

В 1933 г. Бернар Лио представил разработку ИПФ [Lyot, 1933], которые до сих пор являются важным инструментом исследования Солнца. Первый фильтр Лио должен был содержать девять ступеней: десять поляризаторов Глазбрука и девять кристаллических пластин из исландского шпата и кварца с общей длиной оптической стопы из исландского шпата около 500 мм. Несмотря на небольшой (25 мм) световой диаметр, изготовление первого фильтра было прервано в 1934 г. из-за недостатка ромбоэдров исландского шпата, необходимого для вырезания поляризационных призм и пластин.

В 1935 г. Эдвин Лэнд изобрел пленочные листовые поляроиды, которые быстро стали коммерческим продуктом и заменили поляризаторы на основе кальцита в большинстве приборов [Land, 1941]. Несмотря на весьма обнадеживающие результаты, которые получил Лио со вторым фильтром диаметром 36 мм, фильтр имел недостатки, связанные с применением поляроидов того времени, — небольшое пропускание, особенно в синей области спектра, рассеивание света и неравномерная толщина поляроидных пленок портили качество изображений Солнца. К счастью, в 1940 и 1941 г. Лио получил два прекрасных ромбоэдра кальцита, и поляроиды, временно установленные в фильтре 1938 г., были заменены на двулучевые поляризационные призмы Аббе (кальцит—стекло) с меньшим расходом кальцита, чем требовалось для однолучевых призм Глазбрука. Кроме основного, осевого, пучка, Лио использовал также боковые пучки на выходе из последних призм Аббе для построения изображений Солнца в других спектральных линиях.

За несколько десятилетий, с тех пор как Лио выполнил теоретическую и практическую разработку ИПФ, физики в астрономических институтах и оптические компании создали фильтры, подобные фильтру Лио. Для узкополосных ступеней ИПФ с большими значениями двупреломления исландский шпат является превосходным кристаллом, но последующие и параллельные с Лио довоенные разработки ИПФ содержали только кварцевые ступени, у которых двупреломление в 17 раз меньше. Фильтры были более или менее селективными, но, чтобы получить монохроматическое изображение Солнца или короны с высоким спектральным и пространственным разрешением, не хватало высококачественных, больших размеров, кристаллов исландского шпата, хотя в конце XIX и начале XX в. его месторождения были открыты в США (штаты Монтана, Калифорния), ЮАР, Индии, Австралии, Испании, Аргентине. Кварцевые фильтры были широкополосными и предназначались для наблюдений протуберанцев. Например, Оман в Стокгольмской обсерватории в 1938 г. независимо от Лио предложил новый монохроматор [Ohman, 1938], который изготовила компания Steeg & Reuter, Bad Homburg (Германия). В 1939 г. компания Zeiss (Йена) построила два фильтра: первый, диаметром 13 мм, с полушириной полосы  $43 \text{ \AA}$  и максимальной прозрачностью 21 %; второй — диаметром 30 мм, с полосой  $20 \text{ \AA}$  и прозрачностью 30 % [Siedentopf, Wempe, 1940]. В США Джон Эванс создал фильтр [Evans, 1940] диаметром 20 мм, который пропускал полосу с полушириной  $5 \text{ \AA}$  (изготовитель Chabot Observatory USA). Тогда же Эдисон Петтит построил подобный фильтр, снабженный термостатом, и с мая 1941 г. получал с ним изображения протуберанцев [Pettit, 1941].

Усовершенствованные поляризационные пленки Лэнда в какой-то степени помогали решить проблему нехватки исландского шпата для ИПФ. В то же время в работу были запущены некоторые другие поляризационные кристаллы — как естественные, так и искус-

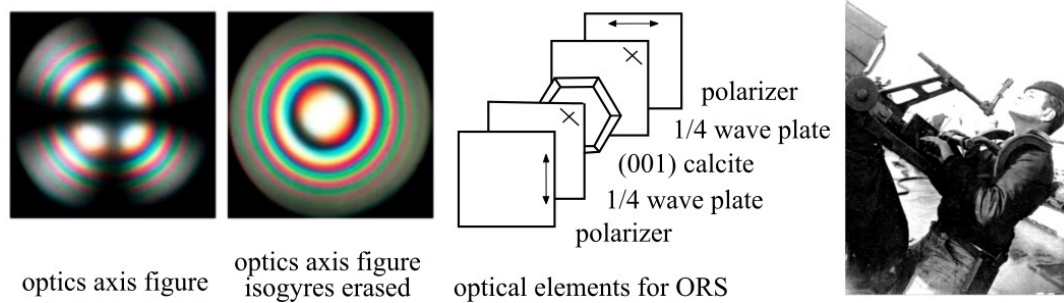


Рис. 1. Коноскопический прицел (ORS — optical ring sight) и наводка орудия на цель [Gunter, 2003; Orrell, 1995]

ственные, но исландский шпат продолжал использоваться большим спросом в различных оптических приборах и оставался востребованным в течение всего XX в.

По интересному совпадению Лэнд — изобретатель поляризационной пленки — создал часть этого спроса и дефицита. Когда США вступили во Вторую мировую войну, Лэнд изобрел оптический коноскопический прицел [Land, 1945], состоящий из двух листов поляризационной пленки и двух оптических волновых пластин, между которыми была вставлена пластинка из кристалла исландского шпата, вырезанная перпендикулярно оптической оси (рис. 1). Прицел не имеет параллакса, и величина смещения интерференционного кольца (снаряда) по цели зависит только от направления прицела (орудия) и практически не зависит от положения глаза стрелка.

Эти кольцевые прицелы использовались не только во время Второй мировой войны, но и позднее. Программа военных оптических прицелов была запущена в США весной 1942 г. после событий в Перл-Харбор. Когда в 1943 г. заказы на ORS достигли пика 90000 единиц, возникла потребность в 45000 фунтов оптического кальцита — это было беспрецедентное количество. В течение Второй мировой войны осуществлялись поиск месторождений и довольно интенсивная их эксплуатация. Исландский шпат стал считаться стратегическим ресурсом правительства США, которое засекретило исследования, проведенные по оценке запасов исландского шпата в странах Южной и Центральной Америки.

### О ПОТРЕБНОСТИ ИПФ В ИСЛАНДСКОМ ШПАТЕ. ФИЛЬТРЫ СЛУЖБЫ СОЛНЦА

Какое количество исландского шпата необходимо для ИПФ с полушириной полосы пропускания  $0.5 \text{ \AA}$ ? Теоретически, чтобы получить изображение Солнца в линии  $\text{H}\alpha$  с разрешением 1 угл. сек., необходимы телескоп с объективом диаметром 120 мм и установленный перед объективом фильтр с таким же световым диаметром 120 мм, при условии, что предельный угол наклонных пучков, проходящих через фильтр, составляет  $\pm 0.25^\circ$  (диаметр Солнца) для допустимого смещения полосы пропускания 0.1 от ее полуширины.

Если использовать широкоугольные ступени Лيو I типа с кристаллами исландского шпата, получается увеличение поля зрения фильтра в 4.4 раза [Lyot,

1944]. В этом случае фильтр может быть установлен в перестраивающей системе и в первом приближении (без учета диаметра оправы, длины оптической стопы и виньетирования) его диаметр должен быть не менее 28 мм (120/4.4). Чтобы оптимально сбалансировать разрешающую способность телескопа с параметрами установленного ИПФ, необходимо выполнить условие, связывающее параметры фильтра и телескопа [Клевцов, 1984]. Для обеих установок (телецентрический либо параллельный ход лучей) связь между параметрами фильтра и диаметром объектива телескопа  $D$  определяется одной и той же формулой

$$d = D \frac{\omega}{\varepsilon} + \frac{l\varepsilon}{n} \quad (1)$$

или

$$D = \frac{\varepsilon}{\omega} \left( d - \frac{l\varepsilon}{n} \right), \quad (2)$$

где  $d$  — диаметр входного окна,  $\varepsilon$  — максимально допустимый угол падения на фильтр,  $l$  — длина оптической стопы фильтра,  $n$  — ее средний показатель преломления,  $\omega$  — угловое невиньетированное поле телескопа. При этом относительное отверстие системы  $D/f'$  должно быть меньше или равно угловому полю фильтра:  $D/f' \leq 2\varepsilon$ , где  $f'$  — эквивалентный фокус телескопа.

Возможности обеих установок в отношении разрешающей способности одинаковы, и если угол наклона полевых лучей не превышает максимальный угол падения  $\varepsilon$ , можно считать, что обе установки обеспечивают примерно одинаковую монохроматичность. Чтобы повысить разрешающую способность, необходимо увеличить входное окно фильтра (диаметр кристаллов) и использовать телескоп с большим объективом.

Для  $\text{H}\alpha$ -ИПФ с полушириной полосы пропускания  $0.5 \text{ \AA}$  (с пленочными поляризаторами вместо призм, широкоугольными элементами и дополнительной контрастной ступенью) суммарная длина кристаллов исландского шпата должна составлять более 50 мм. Длина всей оптической стопы ИПФ с использованием пленочных поляризаторов, кальцитовых и кварцевых ступеней, фазовых полуволновых пластинок, защитных стекол и оправ составляет около 140 мм. Для телескопа с объективом 120 мм при регистрации всего диска Солнца световой диаметр входного окна фильтра (кристаллов шпата),

уточненный по формулам (1), (2), должен быть около 30 мм. Из-за недостаточного пропускания в синей области спектра часть пленочных поляризаторов в ИПФ К СаП заменяется двупреломлящими призмами шпат — плавленый кварц и необходимая длина ступеней из исландского шпата увеличивается до 120 мм.

Поступление исландского шпата для зарубежных ИПФ можно ожидать из наиболее крупных месторождений, открытых в конце XIX и начале XX столетий в США (штаты Монтана, Калифорния), Южно-Африканской Республике, Мексике, Австралии, Испании, Аргентине и позднее в Китае. В настоящее время месторождения Южной Африки являются основной базой, снабжающей западные страны оптическим исландским шпатом. Американская фирма Karl Lambrect (Вашингтон) осуществляет там поиск, разведку и эксплуатацию месторождений, а также проводит обработку кристаллов и изготовление поляризационных устройств.

В 50-х гг. французская фирма O.P.L. изготовила дюжину коммерческих фильтров с полосой 0.75 Å. Фирма В. Halle (Западный Берлин) в 50–60-х гг. освоила серийный выпуск ИПФ на линии 6563 Å с полосой 0.5 Å и 3933 Å с полосой 0.3 Å, а также предлагала для заказа фильтры на линии 4861 и 10830 Å. В 70-х гг. фирма Opton (Карл Цейсс Оберкохен) выпустила H $\alpha$ -фильтр с полосой 0.25 Å, регулируемой в диапазоне  $\pm 16$  Å, а затем универсальный фильтр с полосой 0.25 Å, сканируемой в диапазоне 4200–7000 Å [Скоморовский, Иоффе, 1980].

Десятки фильтров В. Halle на линии H $\alpha$  и KCaП и несколько H $\alpha$ -фильтров Opton использовались в СССР и социалистических странах. Со временем ремонт и замена кристаллических элементов большинства из этих фильтров выполнялась в ИСЗФ СО РАН. По дефектам на периферии некоторых оптических элементов ИПФ было видно, что подборка исландского шпата для толстых ступеней высокого порядка интерференции диаметром 30–32 мм выполнялась изготовителями фильтров на пределе раскрытия ромбоэдров из природных кристаллов. Иногда фирмы В. Halle устанавливали в ИПФ кристаллические элементы, которые по допускам на изготовление следовало бы пустить в брак [Скоморовский, Иоффе, 1980].

В начале 80-х в «гонку» создания ИПФ включилась группа китайских ученых. Развитая к этому времени оптико-технологическая база, богатые месторождения оптического кальцита в Китае содействовали успеху. Производство фильтров в Китае ведется на коммерческой основе в Нанкинском исследовательском центре астрономических инструментов (NAIRC). Изготовлено несколько десятков фильтров, которыми оснащены обсерватории Китая, Кореи и Японии. Правительство Китая осуществляет большое бюджетное финансирование новых разработок ИПФ для научных исследований.

### УЗКОПОЛОСНЫЕ ИПФ С ПОЛОСОЙ ПРОПУСКАНИЯ 0.125 Å И МЕНЕЕ ЗА РУБЕЖОМ

Дело обстоит сложнее с подбором высококачественных кристаллов исландского шпата при изготовлении толстых ступеней узкополосных ИПФ.

Желательно также, чтобы толстые ступени имели увеличенный диаметр. Условие (1), (2) учитывает требования пространственного разрешения, но не учитывает необходимости увеличения размеров объектива телескопа (и фильтра) для удовлетворения светового «голодания» приемников излучения. Это происходит в случаях получения с узкополосным фильтром изображений поля скоростей и магнитных полей Солнца с высоким пространственным, спектральным и временным разрешением, когда в узкой полосе фильтра, модулированной по поляризации и скорости, проходит мало света. Увеличение размеров объектива (сбора света) приводит к уменьшению размера регистрируемого участка Солнца из-за ограниченного диаметра и углового поля фильтра. Например, с серийным универсальным фильтром фирмы Цейсс Оберкохен [Скоморовский, Иоффе, 1980] (полуширина полосы пропускания 0.25 Å, входная апертура  $\varnothing 36$  мм, выходная  $\varnothing 28$  мм, угловое поле  $\pm 1.6^\circ$ , длина стопы 280 мм), установленным на вакуумном телескопе обсерватории Сакраменто Пик (входной зрачок  $\varnothing 760$  мм), размер наблюдаемого участка солнечной поверхности по (1), (2) составляет  $\sim 4'$ . С увеличением светового диаметра фильтра (поперечного размера кристаллов) пропорционально увеличивается размер регистрируемого участка на Солнце при том же пространственном разрешении.

Потребность в оригинальных ИПФ всегда была настолько велика, что отдельные учреждения и ученые вели и продолжают вести самостоятельные (или в сотрудничестве с оптическими фирмами) разработки фильтров с экстремальными характеристиками для специализированных наземных и космических телескопов или улучшают параметры фильтров, выпущенных оптическими фирмами.

#### Австралия

В лаборатории стандартов (Сидней) в 1961 г. был впервые изготовлен регулируемый в широком диапазоне  $\pm 16$  Å H $\alpha$ -фильтр с полосой 1/8 Å [Steel et al., 1961]. Долгое время экспериментаторы полагали, что полоса 1/8 Å является предельной для двупреломляющего фильтра из исландского шпата, пока в СССР в 1973 г. в СибИЗМИРе не был изготовлен сверхузкополосный ИПФ с полосой 0.08 Å из кристаллов, добытых экспедицией «Шпат».

#### США

В обсерватории Сакраменто-Пик всеволновой фильтр был практически реализован на основе переоборудованного H $\alpha$ -фильтра фирмы Оптон с полосой 0.25 Å, к которому была добавлена регулируемая широкоугольная 0.125 Å ахроматическая ступень из исландского шпата. Беккерс совместно с фирмой выполнил модернизацию фильтра: для сужения полосы до 0.125 Å (в области H $\alpha$ ) был установлен дополнительный элемент из исландского шпата [Beckers et al., 1975]. Чтобы сохранить с удлинением стопы наблюдаемое поле зрения 4', было допущено увеличение спектрального смещения полосы для наклонных пучков до 0.017 Å вместо 0.012 Å.

В исследовательской лаборатории Локхид (Пало Алто, Калифорния) были выполнены работы по со-

вершенствованию ИПФ для космических полетов (1976 г.). Сконструирован макет фильтра с полосой  $0.1 \text{ \AA}$  для отработки образца фильтра на космической обсерватории Spacelab-2, и на основе макета создан полетный вариант солнечного поляриметра (SOUP) в области спектра  $4000\text{--}7600 \text{ \AA}$  с полосой  $0.05 \text{ \AA}$  ( $\lambda_{\text{ц}} 5250$ ) для измерения магнитных полей [Title, 1976].

#### Франция

В Медонской обсерватории сконструирован монохроматор типа Лио для получения двумерных изображений и для измерений магнитных полей и скоростей [Dollfus et al., 1985]. Полностью регулируемый инструмент имеет полуширину полосы пропускания  $0.121 \text{ \AA}$  ( $\lambda_{\text{ц}} 5250 \text{ \AA}$ ) и высокое пропускание в спектральном диапазоне от  $5000$  до  $6700 \text{ \AA}$ .

#### Китай

Телескоп для изучения солнечного магнетизма и активности (SMAT) установлен на солнечной станции Хуайроу (HSOS). Инструмент состоит из двух телескопов, которые соответственно проводят измерения полного вектора магнитного поля и  $\text{Ha}$ -наблюдения всего диска. Магнитограф содержит ИПФ,  $\lambda_{\text{ц}} 5324.19 \text{ \AA}$ , полуширина полосы пропускания  $0.1 \text{ \AA}$ , чистая апертура фильтра  $37 \text{ мм}$  [Zhang Hong-Qi et al., 2007].

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ИСЛАНДСКОГО ШПАТА НА ПАРАМЕТРЫ УЗКОПОЛОСНЫХ ИПФ

Разработчики нестандартных узкополосных фильтров ощущали нехватку высококачественных кристаллов и сталкивались с необходимостью преодолеть влияние их оптической неоднородности на оптические и спектральные характеристики фильтров.

#### Регулируемый $1/8 \text{ \AA}$ $\text{Ha}$ -фильтр

С этим фильтром [Steel et al., 1961; Брей, 1977] (рис. 2), изготовленным в Лаборатории стандартов (Сидней, Австралия), благодаря его узкой полосе сделано немало пионерских работ по тонкой структуре и движениям в солнечной хромосфере. Авторы справедливо считали, что из-за недостаточных размеров ромбоэдров кристаллов исландского шпата, имеющих в то время в наличии, маловероятно, что более узкая полоса может быть достигнута с ИПФ этого типа. По заимствованным из указанной работы интерферограммам (рис. 3) оптического качества одного из кальцитовых элементов диаметром  $35 \text{ мм}$  и толщиной  $46.4 \text{ мм}$  видно, что для изготовления толстых элементов этого фильтра были использованы неоднородные кристаллы. Как показано далее, эти неоднородности вызваны невозможностью правильной ориентации заготовок относительно слоев роста в кристаллах, расколотых на ромбоэдры.

Для улучшения спектральных характеристик в этом фильтре была выполнена ретушь поверхности толстых элементов так, чтобы выровнять искривление полос равного двупреломления — именно они определяют спектральные характеристики фильтра. По нашему мнению, в результате ретуши спектральные характеристики элемента стали хорошими,

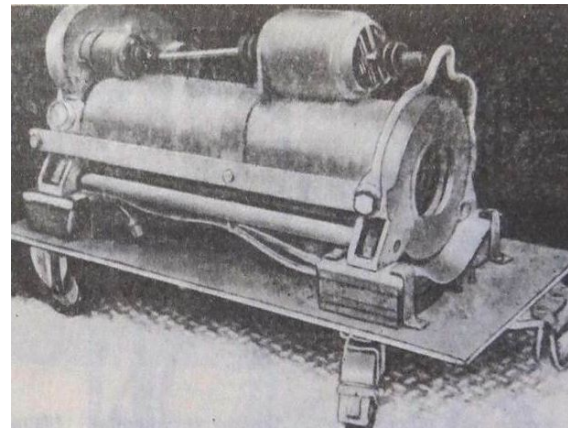


Рис. 2. ИПФ  $1/8 \text{ \AA}$

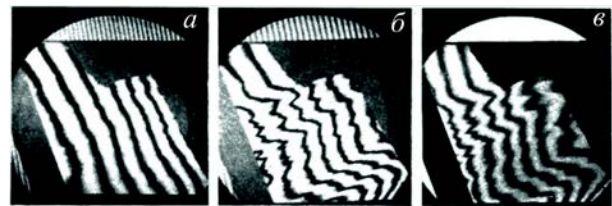


Рис. 3. Интерферограммы: о-луч (а); е-луч (б); полосы равного двупреломления — разность хода о- и е-лучей (в)

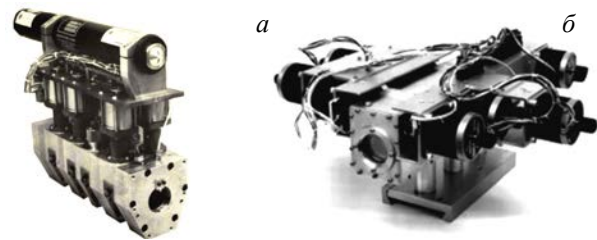


Рис. 4. Прототип полетного  $0.1 \text{ \AA}$  фильтра для Spacelab 2 (а) и фильтр LAPPU (б)

но так как все элементы, в том числе и с ретушированной поверхностью, были погружены в иммерсию для снижения френелевских отражений, в оптической стопе возникли искажения волнового фронта, что привело к ухудшению изображения [Bray, Winter, 1970].

#### Фильтры Тайтла

Сконструированные А. Тайтлом фильтр для Spacelab [Title, 1976] и его лабораторный предшественник фильтр LAPPU (Lockheed Alternative partial polarizer universal filter) показаны на рис. 4. Это регулируемые ИПФ с использованием частичных поляризаторов для увеличения пропускания. Каждый фильтр имеет полосу пропускания  $\sim 0.1 \text{ \AA}$  и апертуру  $35 \text{ мм}$ . В LAPPU все элементы кальцитовые, общая длина кальцита  $179 \text{ мм}$ . Самый тонкий ( $1.4 \text{ мм}$ ) — не широкоугольный, а самый толстый в суммарном наборе —  $81.7 \text{ мм}$ .

Однако при изготовлении фильтров кристаллы ромбоэдров кальцита для самых толстых элементов были недостаточно большими или недостаточно однородными. Необходимо было сделать оптическую полировку локальную ретушь, чтобы компенсировать незначительные неоднородности кальцита и обеспечить конечную апертуру фильтра  $33 \text{ мм}$ . Интерферограммы на рис. 5, взятые из работы [Title, 1976], указывают на то, что оптическая стопа фильтра

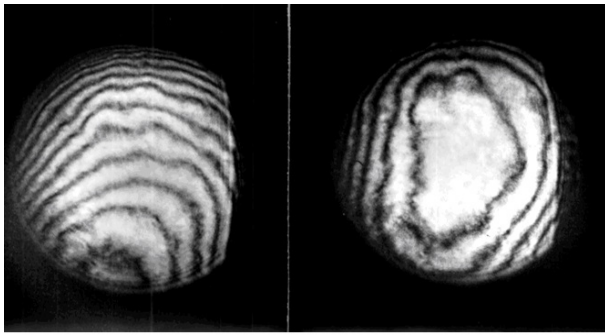


Рис. 5. Интерферограммы волнового фронта фильтра LAPPU

вводит кривизну волнового фронта  $\sim 2\lambda$  и такой же астигматизм. Снизить влияние этих дефектов удалось установкой фильтра на телескопе в пучке  $f/30$  на расстоянии 15 см от фокальной плоскости: изменения фокуса, вызванные искажениями волнового фронта, составляют менее одной десятой глубины резкости, ограниченной дифракцией.

Еще несколько из известных нам последующих разработок ИПФ, апертура которых оставалась в пределах 35 мм, так как высококачественный кальцит, пригодный для фильтров, оставался дефицитным.

*Французский поляриметр* [Dollfus, Moity, 1993] в обсерватории Медон имеет почти те же самые параметры, как монохроматор [Dollfus et al., 1985].

Спектральное разрешение 45000 (или 013 Å в  $\lambda$  5800 Å), апертура 0.033 рад, прозрачность 20 %, регулирование от 5000 до 6700 Å. Диаметр фильтра (кристаллов) — 32 мм. Для изготовления двух кальцитовых пластинок 29.12 и 58.40 мм природные большие кристаллы были тщательно отобраны по однородности их двойного преломления. Тем не менее, в дальнейшем потребовалась локальная ретушь поверхностей пластинок (во время полировки) для получения однородного двойного преломления по всему 32-мм линейному полю зрения.

Для построения фильтра Лию  $He I$  10830 Å, полуширина полосы пропускания 0.13 нм [Kopp et al., 1997], электрически перестраиваемого с помощью жидкокристаллических замедлителей, компания Meadowlark Optics вынуждена использовать четыре самые узкополосные кальцитовые ступени из существующего Na-фильтра (Halle) со световым окном 32 мм, так как кальцит фильтрового качества и дефицитен, и дорог.

Для измерений полного вектора магнитного поля на телескопе T2 [Ueno et al., 2004] четырехтрубного телескопа Solar Magnetic Activity Research Telescope (SMART) обсерватории Hide, в Нанкинском институте астрономической оптики и технологии Академии наук Китая (NIAOT, бывш. NAIRC) был разработан фильтр Лию с полушириной полосы пропускания 0.125 Å на  $\lambda$  6302 Å с самой большой в мире пятидесятимиллиметровой линейной апертурой. Элементы фильтра изготовлены из кристаллов, возможно, полученных из месторождения Гуйчжоу (Китай). Но оказалось, что пространственное разрешение вектор-магнитограмм не такое хорошее, как ожидалось при использовании фильтра (и телескопа) с большой апертурой. Источником проблем оказались недопустимые аберрации фильтра Лию, вызван-



Рис. 6. 1863–1872 гг. Техники раскалывают кристаллы исландского шпата [90 Jahre im Dienste der Optik, 1963]

ные, по нашему мнению, оптическими неоднородностями кристаллов исландского шпата. После модернизации (ремонта) линейное поле фильтра было ограничено до 30 мм.

Вынужденное использование разработчиками ИПФ неоднородных заготовок кристаллов, как будет показано ниже, было вызвано недостаточной информированностью поставщиков исландского шпата в вопросах образования кристаллов, кинетике их послыного роста и способах оценке качества оптических кристаллов для ИПФ. Чистые без трещин участки определялись визуально, и их выделение проводилось выкалыванием зубилом ромбоэдров из природных кристаллов (рис. 6). Часто расколы проходили по однородной монообласти кристалла, и ее размеры оказывались маленькими даже в больших ромбоэдрах.

Эта форма раскоя, совсем не выгодная для изготовления кристаллических элементов ИПФ, просуществовала во всех странах долгие годы. В России в 60-е годы был положен конец этой варварской методике обогащения, из-за которой потребители, в свою очередь, при выкраивании поляризационной оптики из ромбоэдров отправляли в отходы много оптического материала.

## ИСЛАНДСКИЙ ШПАТ И ПЕРВЫЕ РАЗРАБОТКИ ИПФ В РОССИИ

Проявления исландского шпата на территории России были отмечены давно. Известны месторождения в Якутии, районе Крыма, Туве, на Кавказе.

Но промышленные месторождения долго не удавалось найти. Целенаправленные геолого-разведочные работы привели в конечном итоге к ряду открытий в бассейне Нижней Тунгуски. Разведку месторождений и добычу минерального сырья вела экспедиция «Шпат» ВПО «Союзкварцсамоцветы» Министерства геологии СССР. В 1926–1946 гг. была доказана промышленная ценность месторождений в трапах лавовой области и весьма ценного месторождения Джекинда в туфовой области, на котором было добыто значительное количество исландского шпата, обеспечившее на несколько лет вперед потребности оптической промышленности [Серых, Фролов, 2007].

До начала промышленного освоения месторождений исландского шпата этот уникальный минерал использовался главным образом в изготовлении оптических поляризационных призм для микроскопов. Первым сигналом для серьезного рывка к поиску, разведке и добыче минерала послужило обнаружение кристаллов исландского шпата в прицельной системе (см. рис. 1) истребителя Мессершмитт, захваченного на первом этапе Великой Отечественной войны. Изучение месторождений и довольно интенсивная их эксплуатация осуществлялись в течение ВОВ. Вместе с тем прочной минерально-сырьевой базы с балансowymi запасами или прогнозными ресурсами исландского шпата создано не было.

В начале 50-х годов в связи с интенсивным развитием оптико-механической промышленности СССР потребность в исландском шпате и его добыча увеличились. Промышленность предъявляла жесткие требования к качеству оптического кальцита по пропусканию, рассеянию, оптической однородности. Вес добытых отдельных кристаллов достигал порой десятков и сотен килограммов, но кондиционного оптического материала удавалось получить гораздо меньше. Кристаллы могут частично разрушаться при применении «мягких» ударов (взрывов) при извлечении из твердых базальтовых пород или при перепаде температуры при быстром выносе на поверхность из промерзших мягких туфовых пород. Извлеченные из недр кристаллы шпата — это не более чем сырье для последующего обогащения. На первых порах обогащение кальцита в тунгусской экспедиции вели очень неэкономичным традиционным методом: кристаллы раскалывали на бездефектные ромбоэдры с помощью молотка и зубила (см. рис. 6).

Несмотря на наличие в экспедиции «Шпат» кристаллов, неожиданно оказалось, что в 50-е гг. на оптико-механических предприятиях сложилось мнение об отсутствии в стране оптического кальцита. Скорее всего, это было связано с засекречиванием в военное время запасов месторождений и о наличии кристаллов Госплану не было известно. Промышленность была ориентирована на закупку шпата за рубежом [Серых, Фролов, 2007], на замену шпата поляроидами, а при невозможности их использования из-за низкого качества — на снятие приборов с производства. Геологам потребовалось неоднократное посещение Государственного оптического института (ГОИ), Ленинградского оптико-механического объединения (ЛОМО), установление связи с другими предприятиями, с тем чтобы гарантировать им обеспечение оптическим сырьем [<http://forum.web.ru/viewtopic.php?f=24&t=4544&start=0&sid=f100c7021833f2267b7fd7df58057b2326>].

В итоге расширения геологоразведочных работ уже начиная с 60-х гг. была создана минерально-сырьевая база оптического кальцита, позволившая с 1960 по 1991 г. полностью удовлетворить потребности оптико-механической промышленности СССР. В пос. Тура был создан обогатительный цех, в который доставляли кристаллы со всех сибирских месторождений, и можно было, не отправляя кристаллы в централизованный цех в Москву, как это делалось раньше, проводить оценку кристаллов и месторождений. В экспедиции «Шпат» была разрабо-

тана и внедрена технология обогащения, в основу которой вместо раскалывания кристаллов на ромбоэдры положены распиливание кристаллов на пинакоидальные пластины (ориентированные перпендикулярно оптической оси), дешифрование их внутреннего строения и раскрой на оптически ориентированные заготовки заданных размеров и качества. Основной вклад в разработку и внедрение технологии обогащения внесли д.г.-м.н. А.В. Скропышев, к.г.-м.н. А.В. Шустов, начальник экспедиции «Шпат» И.А. Золотухин, начальник цеха А.Л. Кукуй, главный механик экспедиции В.А. Цветков. Внедрение этой технологии вместо раскалывания кристаллов по спайности позволило многократно увеличить выход оптического кальцита из шпата-сырца и перейти на поставки потребителям заготовок оптических деталей вместо спайных ромбоэдров.

Разработка конструкций ИПФ в СССР велась самобытно и практически в отрыве от западных ученых и фирм, между которыми поддерживались широкие научные и производственные контакты. В 1949 г. в Крымской астрофизической обсерватории первый в СССР ИПФ со ступенями из кварца был успешно применен для изучения солнечных протуберанцев [Северный, Гильварг, 1949]. В последующие годы в ГОИ по расчетам и методике С.Б. Иоффе был создан уникальный ИПФ с кристаллами исландского шпата [Иоффе и др., 1950]. В то время фильтр имел самую узкую полосу пропускания 0.6 Å. Он был успешно испытан в Пулковско. Затем под руководством С.Б. Иоффе в ГОИ были изготовлены ИПФ на разные (сильные) линии хромосферы и короны [Виноградова и др., 1989] и организовано промышленное изготовление Н $\alpha$ -фильтров на ЛОМО. К началу Международного геофизического года (1957) сеть станций Службы Солнца была оснащена специальными хромосферными телескопами с ИПФ-1 на линию Н $\alpha$  с полушириной полосы 0.6 Å. Световой диаметр фильтров составлял 28 мм.

В 80-х гг. новый фильтр ИПФ-6 (полоса 0.5 Å) с широкоугольными термокомпенсированными ступенями, регулируемый в пределах  $\pm 1$  Å [Виноградова, Кузнецов, 1986], был разработан совместно ГОИ и ЛОМО (наличие хороших кристаллов содействовало разработке). Отдельные обсерватории получили такие фильтры, но из-за медленного производства и затянувшейся доводки ИПФ-6 так и не завоевали рынок астрономов.

Производство ИПФ в России было остановлено. К сожалению, в течение десяти лет из-за порчи дихроичных поляризаторов в солнечном пучке ИПФ вышли из строя. Позднее то же самое произошло с фильтрами Халле. Возник риск исчезновения сети Службы Солнца в СССР.

## **РАЗРАБОТКИ ФИЛЬТРОВ В ИСЗФ. ОСОБЕННОСТИ ОТБОРА КРИСТАЛЛОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИХ ОБРАБОТКИ И КОНТРОЛЯ**

Большая необходимость в ремонте ИПФ ЛОМО, Халле, потребность в специализированных узкопо-

лосных фильтрах и, безусловно, инициатива и поддержка директора В.Е. Степанова стимулировали организацию в начале 60-х гг. в Институте солнечной-земной физики (бывший СибИЗМИР) оптической лаборатории и создание новых разработок ИПФ и крупногабаритной оптики [Скоморовский и др., 2013]. И до того как на ЛОМО был организован участок для модернизации ИПФ-1 (новое название ИПФ-4), ремонт этих фильтров и замена вышедших из строя поляризаторов и кристаллических элементов из исландского шпата фильтров компаний Халле и Оптон на линии Na и KCaII выполнялась в оптической лаборатории института. В то время кристаллы в виде спайных ромбоздров для ремонта фильтров мы закупали (практически не контролируя их оптическое качество) в Москве в централизованном цехе экспедиции «Шпат».

Энтузиасты новой технологии обогащения кристаллов в северном пос. Тура (Эвенкия) считали важным, чтобы весь экономический цикл от поиска и разработки месторождений до поставки готовой продукции находился бы у одного производителя (экспедиция «Шпат»), заинтересованного в рациональном расходовании и минимизации отходов ценных кристаллов. Планировалось создание оптического участка для изготовления и поставки заказчикам поляризационной оптики. Экспедиция «Шпат» была заинтересована также в сотрудничестве с оптиками ИСЗФ по разработке методики отбора заготовок для ИПФ и исследованию их оптического качества на интерферометре (рис. 7).

Возможность получения заготовок исландского шпата высокого качества стала предпосылкой для разработки в ИСЗФ фильтров с большой апертурой и высоким пропусканием, в частности, двухполос-



Рис. 7. Обоганительный цех экспедиции Шпат: начальник экспедиции И.А. Золотухин, главный механик В.А. Цветков, минералог А.В. Шустов, зав. лаб. ИСЗФ В.И. Скоморовский (а); интерферометр Тваймана, установленный оптиками ИСЗФ (б)

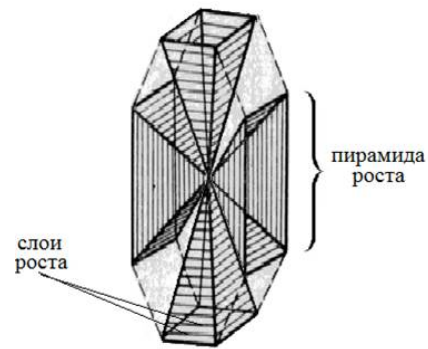


Рис. 8. Схема роста кристалла



Рис. 9. Кристаллы в цехе из месторождения Разлом (Иркутская обл.). Оптическая ось в кристаллах направлена вертикально

ного ИПФ на важные в прогностическом отношении спектральные линии бария BaII 4554 Å и водорода Hβ с шириной полос пропускания 0.08 и 0.09 Å соответственно. Расчетная длина оптической стопы этого фильтра из кристаллов только исландского шпата (двупреломляющие элементы и поляризационные призмы) с апертурой 40 мм составляла 320 мм. Процесс изготовления оптической стопы фильтра должен включать тщательный отбор заготовок и изготовление из них элементов фильтра заданной толщины с точной ориентацией оптической оси.

#### Отбор заготовок

Монокристаллы включают разные пирамиды роста, которые представляют собой части кристаллов, образованные параллельными слоями, возникающими при передвижении одной грани кристалла в процессе роста (рис. 8). При изменении внешних условий могут изменяться показатель преломления и содержание примесей в кристалле.

После предварительного просмотра кристаллы месторождений Крутое, Бабкинское, Полиджикит, Разлом (рис. 9) и др., в которых содержалось высококачественное сырье, в цехе на станках с алмазными кругами распиливались перпендикулярно оптической оси на пластины с бездефектными областями максимальных размеров.





Рис. 10. Пирамиды и слои роста — фигуры травления на пластине исландского шпата (оптическая ось направлена перпендикулярно плоскости рисунка)



Рис. 11. Оптик оценивает светорассеяние пирамиды роста в кристаллической пластине

Пирамиды и слои роста делают заметными после травления пластин в кислоте (рис. 10) или после полировки их поверхностей и просмотре объемной и поверхностной люминесценции пластин при освещении ультрафиолетовым светом через светофильтр УФС-1. Границы пирамид роста в объеме пластины уточнялись по величине светорассеяния лазерного луча, которое также зависит от индивидуальных свойств пирамиды (рис. 11). Пластины мы раскраивали, стараясь получить для элементов ИПФ наибольшие по размерам заготовки из одной пирамиды роста, беря на себя ответственность за допустимый размер дефектной зоны.

Измерения, выполненные нами в цехе на интерферометре Тваймана, подтверждали высокую оптическую однородность пирамиды спайного ромбоэдра [Скропышев, Кукуй, 1973], причем практически одинаковую по всем направлениям в пределах  $1 \cdot 10^{-6}$ . Поэтому в заготовках из этой пирамиды, в которой не обнаруживались слои роста, рабочее направление светового пучка выбиралось перпендикулярно оптической оси вдоль наибольшего размера пирамиды. Такое направление часто не совпадало с осями симметрии, используемыми для ориентировки кристалла на рентген-гонометре, но зато сохранялось ценное сырье. Заготовки кальцита, вырезанные из других пирамид роста, часто обнаруживают слоистую структуру, доставившую трудности при изготовлении австралийского ИПФ с полосой  $1/8 \text{ \AA}$  (см. рис. 4). Показатели преломления в слоях одной пирамиды

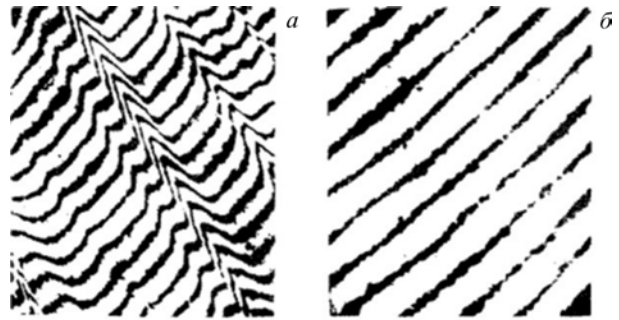


Рис. 12. Однородность кристаллической заготовки: не ориентированной (а); ориентированной относительно слоев роста (б)

роста и в различных пирамидах иногда отличаются на  $5 \cdot 10^{-5}$ .

Для повышения оптического качества заготовок элементов ИПФ, изготавливаемых из пластин со слоями роста, распиливание пластин мы проводили параллельно оптической оси по нормали к слоям роста в большей части бездефектного объема. [Шустов и др., 1970]. Тогда пучок света будет проходить через фильтр перпендикулярно слоям роста. Влияние слоев роста видно на изображении (рис. 12), полученном на интерферометре Тваймана [Kushtal, Skomorovsky, 2002]. Однородность ориентированной заготовки, особенно по двойному преломлению (см. рис. 3), не будет иметь резких скачков по полю зрения. Заготовки с локальными неоднородностями, искажающими интерференционные полосы по двойному преломлению не более чем на 1/10 полосы, мы считали приемлемыми для изготовления ИПФ.

Конечно, при нашем интерферометрическом отборе «сортность» уникальных заготовок исландского шпата и их цена вырастали. И это было выгодно экспедиции. Но главная причина, по которой сотрудники экспедиции нам помогали — желание сохранить сырье для уникальных разработок, не «пустить его под нож» для изготовления сравнительно небольших по размеру поляризационных призм и лучеразводящих элементов, заказы на которые все больше и больше стали поступать в экспедицию от оптической и электронной промышленности. Начальник обогащенного цеха экспедиции А.Л. Кукуй извещал ИСЗФ СО РАН о возможном выходе больших однородных заготовок из исландского шпата для разработки элементов фильтров.

#### Прецизионное ориентирование элементов ИПФ

Форма восьмигранника кристаллических элементов ИПФ удобна для их взаимной ориентации под углом  $\pm 45^\circ$  (рис. 13). Заготовки вырезаются из пластин без привязки к другим кристаллографическим осям кристалла для получения максимального размера элементов ИПФ. Поскольку в этом случае трудноиспользовать рентген-гонометр, был сконструирован коноскоп [Домышев и др., 1989] для прецизионной ориентации оптической оси в элементах относительно рабочего направления (рис. 14). Кристаллический элемент устанавливается на предметный столик коноскопа, который представляет собой слегка рассеивающую прозрачную пластинку. Она освещается параллельным пучком монохроматического света от точечного источника света (лазера).

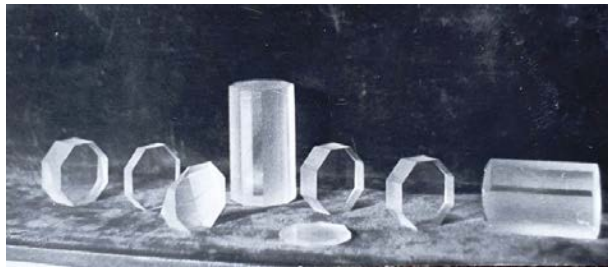


Рис. 13. Кристаллические элементы ИПФ из исландского шпата

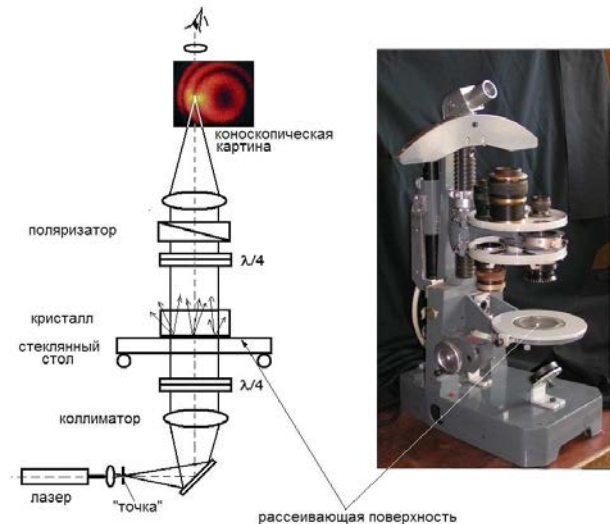


Рис. 14. Коноскоп

Коноскопическая картинка строится в свете, рассеянном пластинкой, а изображение светящейся точки — параллельным пучком, проходящим через пластинку. Кристаллический элемент обрабатывается до устранения биения коноскопической картинке при вращении предметного столика. Сам столик выставляется однажды по отсутствию биения автоколлимационного изображения точки получаемого от обратной полированной стороны рассеивающей пластинки столика. Точность измерений  $\sim 1'$  практически не подвержена инструментальной ошибке.

#### Оптическая обработка элементов ИПФ

Ориентированные элементы ИПФ доводятся по толщине, плоскостности и плоскопараллельности оптическим полированием. В сумме эти три параметра не должны вносить смещение их полосы пропускания более десятой порядка интерференции по двойному преломлению ( $0.36 \text{ мкм}$  для  $\lambda 6563 \text{ \AA}$ ) [Giovannelli, Jefferies, 1954]. Доводку по толщине элементов осуществляют поочередным полированием на станке их плоских поверхностей с одновременным интерферометрическим контролем плоскостности и плоскопараллельности. Кристаллы исландского шпата имеют разные коэффициенты расширения в направлении вдоль и перпендикулярно оптической оси. Поэтому важно, чтобы оптическая полировка не приводила к разнице температур нижней обрабатываемой и верхней свободной поверхности. Именно градиент температуры, а не анизотропия механических свойств приводит к астигматическому искривлению обрабатываемой поверхности. В ИСЗФ СО РАН были разработаны инструменты, режимы прецизион-



Рис. 15. Станок с интерферометром для доводки пластин



Рис. 16. Двусторонняя оптическая полировка элементов

ной обработки элементов ИПФ на оптическом станке и интерферометр с клиновой кристаллической пластинкой для контроля оптической толщины обрабатываемой пластинки относительно опорной непосредственно в рабочей зоне станка (рис. 15) [Домышев и др., 1981].

Прецизионным методом доводки является также двусторонняя обработка — оптическое полирование на станке одновременно обеих сторон большого количества кристаллических элементов одинаковой толщины (рис. 16). Процесс обеспечивает плоскопараллельность элементов и отсутствие термических деформаций, так как нет разницы температур между поверхностями. Мы разработали инструменты, нашли режимы и первыми в нашей стране адаптировали этот способ для двусторонней оптической обработки элементов ИПФ — кварцевых четвертьволновых и полуволновых пластинок [Домышев и др., 1976]. Этот процесс может быть с успехом перенесен на доводку элементов из исландского шпата при массовом производстве ИПФ типа Лио или одного фильтра Шольца, содержащего десятки одинаковых элементов.

#### Разработки ИПФ

Наличие кристаллов исландского шпата, добытых и обогащенных в экспедиции «Шпат», тщательный отбор однородных заготовок, выполненный оптиками ИСЗФ, новые технологии обработки и контроля кристаллических элементов сделали возможным создание узкополосных ИПФ для исследования тонкой структуры, поля скоростей и магнитных полей на разных уровнях солнечной атмосферы.

В 1973 г. был введен в работу двухполосный ИПФ на линии ВаII  $4554 \text{ \AA}$  (полоса  $0.08 \text{ \AA}$ ) и H $\beta$   $4861 \text{ \AA}$  (полоса  $0.09 \text{ \AA}$ ) [Александрович и др., 1975;

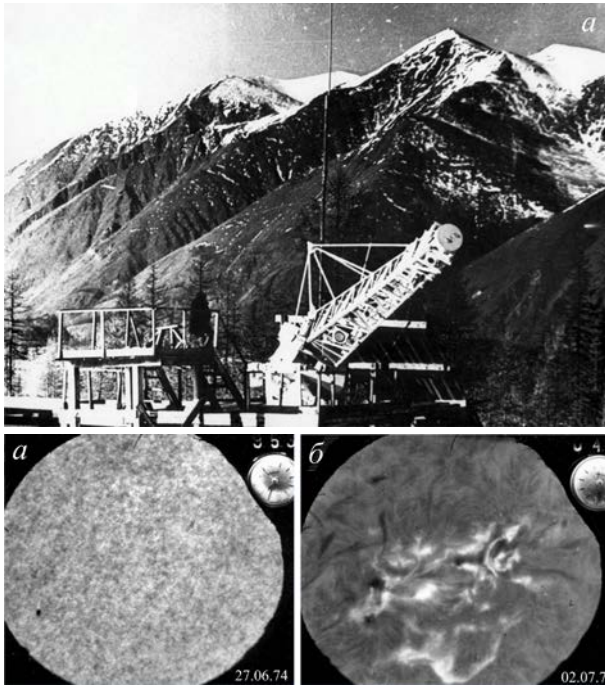


Рис. 17. БВК-1 Саянской обсерватории (а) и фильтрограммы в линиях BaII 4554+0.05 (б) и Hβ 4861 Å (в)



Рис. 18. Интерферограммы волнового фронта фильтра BaII 4554 Å, Hβ 4861 Å

Kushtal, Skomorovsky, 2002], регулируемый в пределах ширины спектральных линий (рис. 17). Пожалуй, по своим характеристикам ИПФ был одной из самых удачных разработок в практике фильтростроения и до сих пор является уникальным инструментом.

Апертура фильтра составляет 40 мм, длина всей оптической стопы из кристаллов кварца и исландского шпата — 430 мм, длина только шпатовой части (призмы шпат—стекло СТК-3 и двупреломляющие элементы) — 320 мм. Интерферограммы (рис. 18) показывают, что оптическая однородность всей оптической кристаллической стопы находится в пределах  $1/4\lambda$ , что значительно выше, чем, например, в фильтре LAPPU (см. рис. 5).

Двухполосный ИПФ на линии BaII 4554 Å и Hβ 4861 Å был установлен на Большом внеатмосферном солнечном коронографе (БВК-1) Саянской солнечной обсерватории (см. рис. 17). С фильтром получен многолетний ряд наблюдений и исследований тонкой структуры и волновых процессов в средней и верхней атмосфере Солнца. Как иллюстрация работы инструмента приведены полученные В.И. Скоморовским фотографии участка солнечной поверхности в крыле линии бария +0.05 Å и в центре линии водорода (покадровая кинокамера РФК-5, 35-мм кинофото-пленка, тип 17, выдержка 0.1 с).

В соответствии с договором о научном сотрудничестве между Утрехтским университетом (Нидер-



Рис. 19. Шведский вакуумный телескоп (SVST)



Рис. 20. Российские наблюдатели с ИПФ на SVST

ланды) и ИСЗФ СО РАН об установке фильтра и проведении совместных наблюдений на Голландском открытом телескопе DOT предварительные тестовые наблюдения были выполнены на Шведском вакуумном солнечном телескопе (рис. 19, 20) на острове Ла Палма. В 2000 г. на этом телескопе было получено большое количество кадров в центре и крыльях линии бария для последующей обработки изображений Солнца. На рис. 21 показаны спекл-восстановленные изображения в крыльях линии  $\pm 0.05$  Å и доплерограмма [Sütterlin et al., 2001]. Наблюдения продемонстрировали, что линия BaII 4554 Å является превосходным диагностом доплеровских скоростей, а оптическое качество фильтра соответствует требованию дифракционного разрешения для заданного поля зрения телескопа. В настоящее время ИПФ (рис. 22) установлен на Голландском открытом телескопе (DOT) в многоканальной фильтровой системе для исследований тонкой структуры, скоростей и магнитных полей в атмосфере Солнца [Hammerschlag et al., 2010].

Двухполосный регулируемый ИПФ на важные в прогностическом отношении хромосферные линии HeI 10830 Å и Ha 6563 Å (полуширина полосы пропускания 0.46 и 0.23 Å соответственно) был изготов-

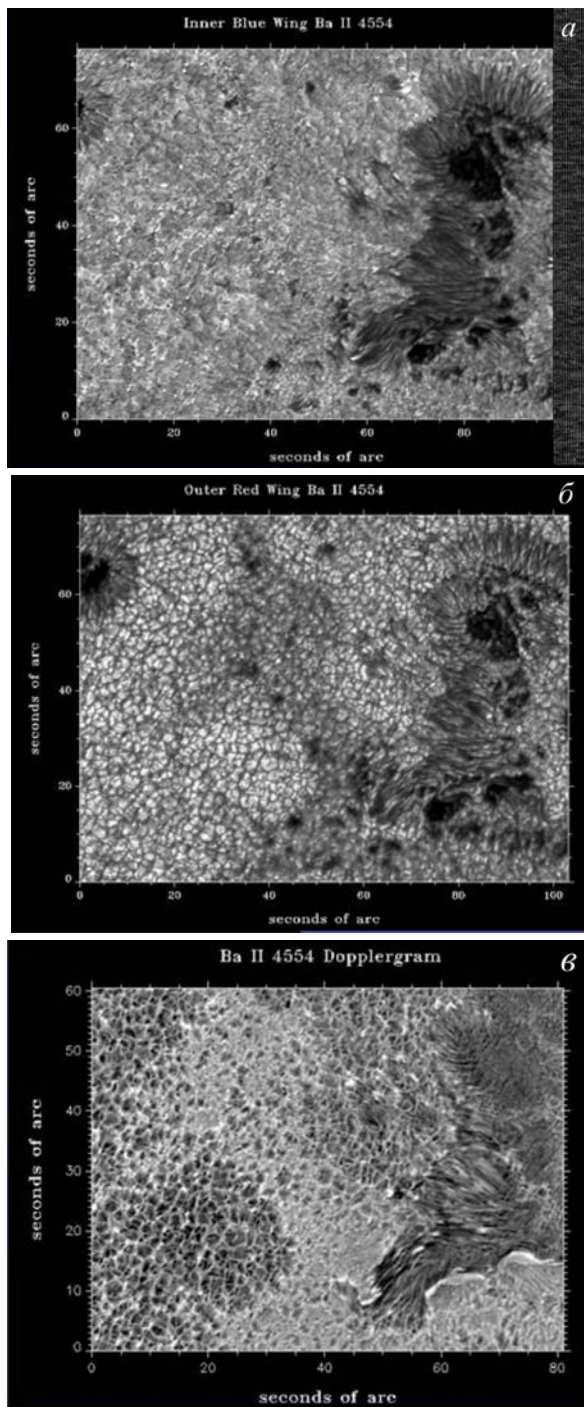


Рис. 21. Снимки в синем и красном крыльях линии бария (а, б). Каждое изображение — результат совмещения ~100 кадров, полученных с выдержкой 0.2 с; доплерограмма (в)

лен в ИСЗФ в 1997 г. [Кушталь, Скоморовский, 2000; Домышев и др., 2004]. Несмотря на значительный прогресс в разработках ИПФ, до этого не было достаточно успешных попыток изготовить фильтр, работающий одновременно в видимом и ИК-диапазоне. Чтобы изменением температуры можно было настроить фильтр на другие интересные спектральные линии, все элементы фильтра, за исключением четвертьволновых и полуволновых пластинок, сделаны из одного материала — исландского шпата.

С этим ИПФ на Большом внеатмосферном коронографе (БВК2) можно проводить спектральные наблюдения одновременно с фильровыми (рис. 23).

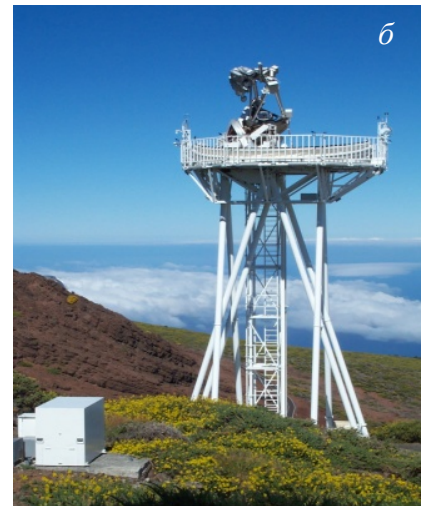
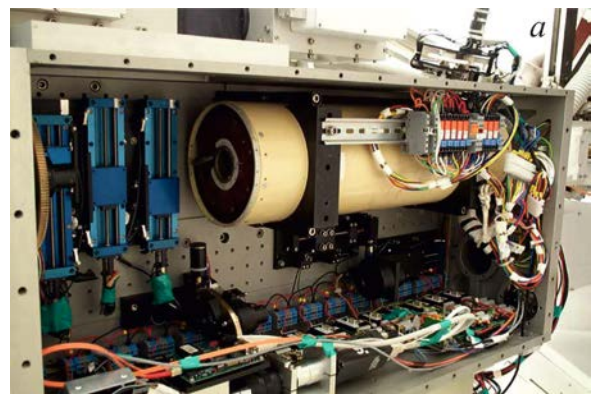


Рис. 22. Фильтр на линии BaII 4554 Å, Hβ 4861 Å (а), установленный на DOT (б)

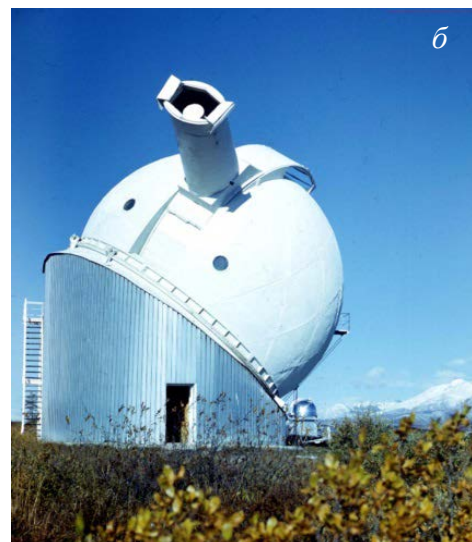
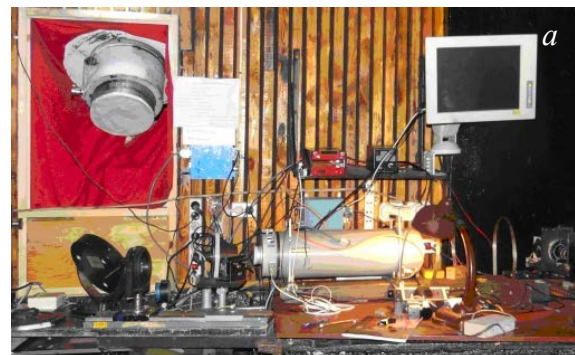


Рис. 23. ИПФ на линии гелия и водорода (а) на БВК-2 (б)

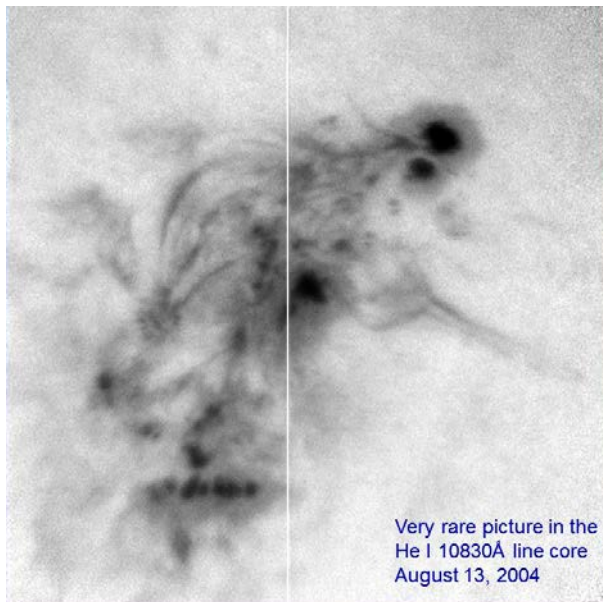


Рис. 24. АО в линии HeI 10830 Å

Фильтрограмма активной области в центре линии гелия приведена на рис. 24. Тонкая белая вертикальная линия — изображение щели спектрографа.

За прошедшие годы в ИСЗФ выполнены другие разработки с использованием крупных кристаллических заготовок исландского шпата:

- ИПФ (полоса 0.6 Å) на красную линию короны был успешно испытан на Большом внезатменном коронографе Саянской обсерватории, а затем использовался на коронографе Абастуманской обсерватории [Хецуриани и др., 1989].

- Na-фильтр с полосой пропускания 0.38 Å сконструирован и изготовлен для искателя солнечного синоптического телескопа (СОЛСИТ) [Лоптева и др., 2018].

- Замена вышедших из строя кальцитовых элементов ИПФ Na-телескопа Байкальской астрофизической обсерватории [Скоморовский и др., 2016].

В настоящее время изготавливается ИПФ на линию FeI 6173 Å для измерения солнечных магнитных полей. В состав фильтра входит узкополосный фильтр-модулятор поляризации (полоса пропускания 0.06 Å, световой диаметр 42 мм) и предварительный фильтр Шольца. Впервые оба фильтра содержат элементы из отрицательного кристалла (исландский шпат) и положительного кристалла (парателлурит) [Skomogovskiy et al., 2012].

Использование кристаллов разных знаков дает возможность увеличения углового поля фильтра и экономии исландского шпата.

На изготовление этих приборов мы исчерпали наши «стратегические» запасы больших заготовок природного исландского шпата. Шестидесятые—восьмидесятые годы были наиболее благоприятными для работы экспедиции «Шпат» и результативными в развитии геологических исследований месторождений и добычи исландского шпата в нашей стране. Этот период совпал с интенсивным развитием науки и усилением внимания государства к удаленным, малосвоенным регионам страны. Однако в связи с глубоким кризисом российской промышленности резко

уменьшилось потребление оптического сырья. Возникший в 90-х гг. диспаритет между ценами на энергоносители, горнотехническое оборудование, транспортные услуги, с одной стороны, и ценами на минеральное сырье, с другой, привел к тому, что значительная часть разведанных запасов перешла в разряд нерентабельных для отработки. В 2001 г. было полностью прекращено финансирование разведки и добычи исландского шпата.

## СИНТЕТИЧЕСКИЙ ИСЛАНДСКИЙ ШПАТ

Еще в 60-е гг., когда в мире наблюдалось некоторое снижение доступности природного кальцита, становилось важным его выращивание. Для кристаллов кальцита популярный метод выращивания из расплавов непригоден, так как при высокой температуре кальцит разлагается. Наиболее перспективным методом является гидротермальная технология — выращивание кристаллов в однородной среде раствора кальцита при высоких давлениях, но при относительно низких температурах в условиях, максимально приближенных к природному росту кристаллов [Икорникова, Бутузов, 1956]. Исландский шпат является одним из самых поздних продуктов природного гидротермального процесса [Еремин, 2004], он кристаллизовался в открытых полостях горных пород при температурах 180–400 °C и давлениях до нескольких мегапаскалей. Поэтому выращивание при температурах, далеких от температуры плавления, способствует образованию кристаллов с низким уровнем напряжений, а значит оптически однородных.

Этот метод выращивания кристаллов кальцита использовался в СССР [Икорникова, 1975], США [Kinloch et al., 1974], Франции [Gener et al., 1974], Японии [Kikuta, Hirano, 1990], но технология именно промышленного выращивания кристаллов кальцита на затравочных пластинах в автоклаве с раствором разработана впервые в мире в ВНИИСИМС ст.н.с. Ю.В. Погодиным [Pogodin, Dronov, 1972] и развита его учениками [Lyutin et al, 1980].

Были найдены составы растворов, в которых удалось подавить спонтанную кристаллизацию и где кальцит имеет положительный коэффициент растворимости. Поэтому синтез кристаллов проводят при прямых перепадах температур. Шихту, изготовленную из фрагментов природных кристаллов, загружают в зону растворения (нижняя часть автоклава), а затравочные пластины, вырезанные из крупных кристаллов природного исландского шпата, — в зону кристаллизации (верхняя часть автоклава). Благодаря тепловой конвекции, создаваемой распределенными нагревателями ( $\Delta T=5-10$  °C), насыщенный раствор перемещается из более высокотемпературной нижней зоны растворения в более низкотемпературную верхнюю зону кристаллизации. Из-за перенасыщения раствора при температуре зоны кристаллизации на затравки осаждается избыток растворенного CaCO<sub>3</sub>. Длительность циклов кристаллизации варьировалась в пределах 20–250 сут, температура 200–400 °C, давление 10–150 МПа (~100–1500 тех. атм.).

Оптические неоднородности по показателям преломления монокристаллов кальцита ВНИИСИМС, выращенных в гидротермальных условиях на ориентированных затравках, параллельных граням призмы ( $\overline{1120}$ ), были исследованы на интерферометре Тваймана в ИСЗФ СО РАН [Бородин и др., 1985]. Кристаллы с такой ориентацией очень выгодны для изготовления пластин ИПФ. Чтобы исключить влияние формы поверхностей на измерения оптической однородности, поверхности кристалла, имеющего размер  $60 \times 34 \times 8$  мм, обрабатывались в пределах  $0.2\lambda$ , а затем на них на иммерсии ( $n_d = 1.57$ ) накладывались плоские стекла, вносящие искажения не более  $0.05\lambda$ . На рис. 25, а показана интерферограмма волнового фронта синтетического кальцита в е-луче. Измерения показывают, что оптические неоднородности по показателю преломления в образце толщиной 7 мм составляют не более  $3 \cdot 10^{-6}$ .

Разность волновых фронтов обыкновенного и необыкновенного лучей показана на интерферограмме (рис. 25, б), полученной при установке образца вместе с кварцевым клином между параллельными поляризаторами в одном плече интерферометра при закрытом втором, при этом направление оптической оси образца составляло  $45^\circ$  с осями поляризаторов. Именно в такой схеме работают элементы ИПФ. Видно, что кристалл может обеспечить однородность спектральной полосы фильтра не хуже, чем  $0.1\lambda$  по двойному преломлению. По теневой картине в этом образце свиля и пузырьковые включения не обнаружены.

Таким образом, по качеству синтетические кристаллы при достаточно больших размерах могли бы заменить природный кальцит, лучшие образцы которого не превосходят размера  $60 \times 60$  мм. При внедрении этих разработок в промышленность острота проблемы, связанной с кальцитом, могла быть снята.

Нет сомнений, что исследование роста кристаллов кальцита — важная тема и гидротермальная технология остается одним из наиболее перспективных методов выращивания высококачественных кристаллов кальцита в однородной среде при высоких давлениях и относительно низких температурах. Так, в Московском политехническом университете [Нефедова, 2016] процесс синтеза осуществлен в области температур  $260\text{--}270^\circ\text{C}$  и давления 70 МПа. В результате проведенных от 30 до 140 сутокных циклов синтеза в присутствии разных примесей подтверждена возможность выращивания монокристаллов оптического кальцита на затравочных пластинах, параллельных естественным граням (габитусу)

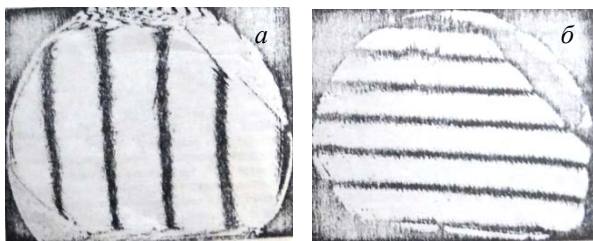


Рис. 25. Интерферограммы волнового фронта синтетического кальцита в двойном ходе: е-луч (а); разности волновых фронтов е- и о-лучей (б)

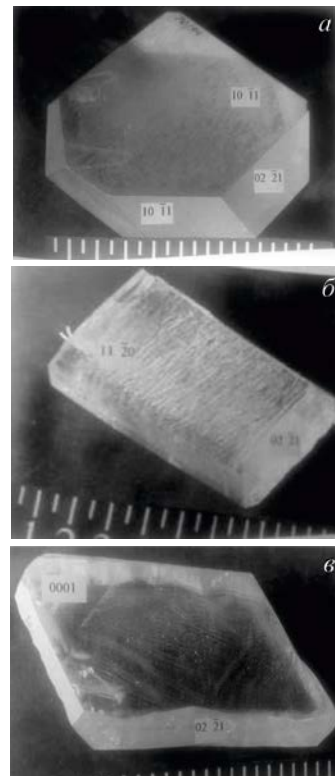


Рис. 26. Кристаллы выращены на затравочных пластинах, вырезанных из природного или синтетического кальцита параллельно граням естественного роста: параллельно спайному ромбоэдру (а); параллельно оптической оси (б); перпендикулярно оптической оси (в)

в промышленных масштабах. Размеры синтетических монокристаллов (рис. 26) пригодны для изготовления различных оптических призм размером от 10 до 20 мм, но, к сожалению, недостаточны для изготовления элементов ИПФ.

В настоящее время компания Crystaltechno Ltd [<http://crystaltechno.com>] предлагает синтетический монокристаллический исландский шпат в виде пинакоидальных пластин со световым диаметром 10–50 мм и толщиной 2–8 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исландский шпат (солнечный камень) — еще мореходы-викинги с его помощью находили направление на скрытое облаками Солнце и по нему определяли свое местоположение. Благодаря исландскому шпату сделаны важные научные открытия, изобретены поляризационные призмы и узкополосные фильтры. Классический ИПФ может содержать кристаллических пластины исландского шпата (поляризационные ступени, двупреломляющие или поляризационные призмы) диаметром 30–45 мм общей длиной 100–300 мм и более. Возможности ИПФ определяются качеством оптических кристаллов и технологическим прогрессом в создании фильтров. Научные учреждения и промышленность в разных странах пришли своим путем к созданию современных ИПФ. Чистая апертура фильтра зависела от наличия исландского шпата, источником которого для западных разработчиков могли быть шахты в Мексике, Южной Африке, Индии и, возможно, в США. Гарри Рэмси (Lockheed) исследовал и оценил образцы юж-

ноафриканского кальцита, поставляемые компанией Karl Lambrect. Он считал, что при наличии высококачественного кальцита нет необходимости искать альтернативные материалы, а создатели фильтров, желающие получить образцы для чистой апертуры 50 мм и более, должны иметь достаточные знания о кальците и быть в тесном контакте с разработчиками месторождений [Title, Rosenberg, 1979].

Именно по этому пути пошли разработчики ИПФ в России, и благодаря сотрудничеству ИСЗФ СО РАН и экспедиции «Шпат» были созданы уникальные узкополосные фильтры для наблюдений процессов на Солнце. Одновременно с этим в ИСЗФ разработаны инструменты и технологические процессы прецизионной обработки и контроля кристаллических пластин. Разработки станков для оптической двусторонней обработки и доводки кристаллических пластин с одновременным контролем их параметров были переданы для внедрения на предприятия оптико-механической промышленности СССР: ЛОМО (Ленинград), БелОМО (Минск), ЛЗОС (Лыткарино, Моск. обл.), Монокристалл (Харьков).

В 1970 г. за открытие месторождений исландского шпата и обеспечение отечественной промышленности оптическим сырьем коллективу геолого-разведочной экспедиции «Шпат» была присуждена Государственная премия СССР: сократились потери драгоценного минерала, потребители стали получать не «сырой» материал, а заготовки, из которых можно было изготавливать призмы с меньшими затратами. Однако потребность отечественной промышленности в исландском шпате в постперестроечный период значительно уменьшилась, и дальнейшее наращивание сырьевой базы исландского шпата Федеральное агентство по недропользованию признало нецелесообразным. В связи с тем, что экспедиция «Шпат» вела не только разведку, но одновременно и добычу, последняя полностью прекращена. В России нет надежды на появление каких-либо заготовок исландского шпата из разведанных месторождений. Финансирование научных учреждений, заинтересованных в кальците, далеко не достаточно для возрождения отрасли. Солнечный камень продолжает лежать где-то в эвенкийской тайге.

В настоящее время по многим причинам развитые страны прекратили промышленное производство ИПФ. Единственным поставщиком фильтров в мире является Нанкинский институт астрономической оптики и технологии (NIAOT) Китайской академии наук. Производство фильтров в Китае ведется на коммерческой основе благодаря достигнутому высокому технологическому уровню и открытому богатому месторождению исландского шпата в провинции Гуайчджоу. Правительство Китая осуществляет большое бюджетное финансирование новых разработок ИПФ для научных исследований.

В США разработчики регулируемого ИПФ для исследований короны в эмиссионных линиях в области 500–1100 нм (полуширина полосы пропускания фильтра 0.5 Å в области 600 нм) на самом большом в мире коронографе с апертурой 1.5 м [Tomczyk et al., 2016] рассматривают применение наряду с исландским шпатом синтетических кри-

сталлов: ниобата лития, парателлуриата, КДР, фтористого магния и др. Критерий применимости кристалла для поляризационных ступеней ИПФ — их световая эффективность (étendue — произведение светового диаметра и углового поля), которая не должна уменьшить эффективность телескопа. Наиболее эффективным для поля зрения 2° считается применение в фильтре с указанной полосой пропускания ниобата лития, если принять, что могут быть выращены однородные кристаллы со световым диаметром 100 мм, чтобы сравниться по étendue с природными кристаллами исландского шпата диаметром до 60 мм, которые иногда были доступны. Кристаллы шпата более эффективны в узкополосных фильтрах для исследования тонкой структуры с высоким спектральным разрешением на небольшом поле зрения.

Надежды на большие кристаллы искусственного шпата пока нет, а на природные есть, но как их в России получить?

В России обсуждается воссоздание сети Службы Солнца, оснащенной современными телескопами с ИПФ. Полагаем, что для выполнения разработок для Службы Солнца, а также создания фокальных инструментов (узкополосных монохроматических фильтров) Крупного солнечного телескопа КСТ-3 необходимы кристаллы исландского шпата, конкуренты которому находятся в стадии разработки. Тенденции развития таковы, что ИПФ должны обеспечивать автоматизированную службу Солнца для наблюдений с высоким пространственным и временным разрешением и информативностью, а также являться основным инструментом исследования Солнца. Подтверждением этому служат описанные разработки ИПФ в США, Китае, Франции, Германии. Десятки приборов, в которых используется высококачественный шпат, установлены на западных обсерваториях и размещаются на космических аппаратах.

Трудность создания в России необходимых ИПФ состоит не в том, что в стране не хватает оптического кальцита, а в том, что оптическая промышленность пока отказывается принимать заказы российских обсерваторий. Вероятно, необходимо замкнуть коммерческую цепочку, чтобы обогащение (добыча) сырья было связано с реализацией уникальных изделий, если их производство будет достаточно. Надеемся, что ситуация с научным приборостроением в стране переломится в лучшую сторону и сырьевая база должна быть к этому готова. Возможно, что добыча исландского шпата и высокие технологии по производству ИПФ будут восстановлены в России.

Авторы благодарны начальнику экспедиции «Шпат» И.А. Золотухину за приглашение принять участие в отборе и исследовании заготовок исландского шпата для ИПФ, к.г.-м.н. А.В. Шустову и механику обогатительного цеха экспедиции В.А. Цветкову — их знания морфологии кристаллов и технологии их обогащения способствовали успешной разработке фильтров. Авторы благодарят И.М. Каца за полезное обсуждение.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16. Результаты получены с использованием Уникальной научной установки «Большой солнечный вакуумный телескоп» [<http://ckp-rf.ru/usu/200615>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александрович С.В., Домышев Г.Н., Коровкин А.И., Скоморовский В.И. Узкополосный интерференционно-поляризационный фильтр с двумя полосами пропускания. *Новая техника в астрономии*. 1975. Вып. 5. С. 34–39.

Бородин В.Л., Гречушников Б.Н., Домышев Г.Н. и др. Оптические свойства монокристаллов синтетического кальцита. *Оптика анизотропных сред: международный сборник*. М.: МФТИ, 1985. С. 37–40.

Брей Р.Дж. Управляемые компьютером узкополосные оптические фильтры в солнечной астрономии. *Радиофизика*. 1977. Т. 20, № 9. С. 1318–1329.

Виноградова Т.А., Кузнецов Б.В. Интерференционно-поляризационный фильтр ИПФ-6. *Оптико-механическая промышленность*. 1986. № 4. С. 28–30.

Виноградова Т.А., Иоффе С.Б., Кузнецов Б.В. Оптические интерференционно-поляризационные фильтры. *Труды ГОИ*. 1989. Т. 72. Вып. 206. 162 с.

Домышев Г.Н., Садохин В.П., Скоморовский В.И. Способ двустороннего полирования: авт. св. № 825539. *Бюллетень изобр.* 1976. № 45.

Домышев Г.Н., Садохин В.П., Скоморовский В.И. Станок для доводки плоских поверхностей: авт. св. № 878531. *Бюллетень изобр.* 1981. № 41.

Домышев Г.Н., Садохин В.П., Скоморовский В.И. Способ ориентирования кристаллических пластин: авт. св. № 1506420. *Бюллетень изобр.* 1989. № 33.

Домышев Г.Н., Кушталь Г.И., Садохин В.П., Скоморовский В.И. ИПФ не сдвоятся (модернизация двухполосного фильтра HeI 10830 Å, Na). *Солнечно-земная физика*. 2004. Вып. 6. С. 156–160.

Еремин Н.И. *Неметаллические полезные ископаемые*. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 2004. 259 с.

Икорникова Н.Ю. *Гидротермальный синтез кристаллов в хлоридных системах*. М.: Наука, 1975. 224 с.

Икорникова Н.Ю., Бутузов В.П. О гидротермальном синтезе кальцита. *Докл. АН СССР*. 1956. Т. 111, № 1. С. 105–106.

Иоффе С.Б., Прокофьева И.А., Эйгенсон М.С. Хромосферный телескоп. *Докл. АН СССР*. 1950. Т. 75. № 5. С. 629–631.

Клевцов Ю.А. Особенности работы интерференционно-поляризационного фильтра в оптической схеме телескопа. *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца*. 1984. Вып. 69. С. 183–189.

Кушталь Г.И., Скоморовский В.И. Двухполосный регулируемый интерференционно-поляризационный фильтр (ИПФ) на линии HeI 10830 Å и Na. *Оптический журнал*. 2000. Т. 67, вып. 6. С. 99–106.

Лоптева Л.С., Кушталь Г.И., Прошин В.А. и др. Хромосферные телескопы Байкальской астрофизической обсерватории. *Новый свет. Известия ГАО*. 2018. № 226. С. 35–45.

Нефедова И.В. Моделирование габитуса монокристаллов оптического кальцита с помощью различных примесей гидротермальных растворов. *Системные технологии*. 2016. № 21. С. 40–44.

Северный А.Б., Гильварг А.Б. Интерференционно-поляризационный фильтр для исследования Солнца и опыт его применения. *Известия КраО*. 1949. Т. 4. С. 3–22.

Серых Н.М., Фролов А.А. Из истории развития отраслевого направления работ на пьезооптическое, кварцевое и камнесамоцветное сырье. *Разведка и охрана недр*. 2007. № 10. С. 2–9.

Скоморовский В.И., Иоффе С.Б. Монохроматические фильтры для наблюдений Солнца. *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца*. 1980. Вып. 52. С. 128–149.

Скоморовский В.И., Прошин В.А., Кушталь Г.И. Весомая оптика ИСЗФ. *Солнечно-земная физика. Труды Всероссийской конференции по солнечно-земной физике, посвя-*

*щенной 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН В.Е. Степанова*. Иркутск, 16–21 сентября 2013 г. 2013. С. 277–285.

Скоморовский В.И., Кушталь Г.И., Лоптева Л.С. и др. Хромосферный телескоп Байкальской астрофизической обсерватории. *Новый свет. Солнечно-земная физика*. 2016. Т. 2, № 2. С. 69–85. DOI: [10.12737/17376](https://doi.org/10.12737/17376).

Скропышев А.В., Кукуй А.Л. Исландский шпат. Л.: Недра, 1973. 192 с.

Хецуриани Ц.С., Хуцишвили Э.В., Скоморовский В.И. и др. О наблюдении солнечной короны в красных лучах в Абастумани. *Бюллетень Абастуманской астрофизической обсерватории*. 1989. № 66. С. 105–112.

Шустов А.В., Стожаров А.И., Доладугина В.С. *Способ обработки естественных кристаллов исландского шпата*: авт. св. № 281241. 1970.

Beckers J., Dicson L., Joyce R. A fully tunable Lyot—Ohman filter. IP No. 227. February 1975. Air Force Cambridge Research Laboratories (LM) Hansom AFB Massachusetts 01731.

Bray R.J., Winter J.G. High-resolution photography of the solar chromosphere. VIII Computer control of tunable 1/8 Å filter. *Solar Phys.* 1970. Vol. 15. P. 309–316.

Dollfus A., Moity J. Filter magnetograph measurements at Meudon Observatory. *ASP Conference Ser. The Magnetic and Velocity Fields of Solar Active Regions*. 1993. Vol. 46. P. 199–202.

Dollfus A., Colson G., Crussaire D., Launay F. A monochromator for solar quantitative imagery — the instrument FPSS. *Astron. Astrophys.* 1985. Vol. 151. P. 235–253.

Evans J. *The quartz polarizing monochromator*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific. San Francisco, California. 1940. No. 309. P. 305–311.

Gener F., Bricard M.C., Lemetre R., Aumont R. Recrystallisation hydrothermale de la calcite dans des solution d'halogeuers d'ammonium. *High Temperatures – High Pressures*. 1974. Vol. 6, no. 6. P. 657–662.

Giovanelli R.G., Jefferies J.T. On the optical properties of components for birefringent filters. *Australian Journal of Physics*. 1954. Vol. 7. P. 254–269.

Gunter M.E. A Lucky Break for Polarization: The Optical Properties of Calcite. *Calcite issue of extraLapis English*. 2003. No. 4. P. 40–45.

Hammerschlag R., Skomorovsky V., Bettonvil F.C.M., et al. The Irkutsk barium filter for narrow-band wide-field high-resolution solar images at the Dutch Open Telescope. *Proc. SPIE*. 2010. Vol. 7735. Id. 773585. DOI: [10.1117/12.858450](https://doi.org/10.1117/12.858450).

Kikuta K., Hirano S. Hydrothermal Growth and Dissolution Behaviour of Calcite Single Crystal in Nitrate Solutions. *J. Crystal Growth*. 1990. Vol. 99. P. 895–899.

Kinloch D.R., Belt R.F., Puttbach R.C. Hydrothermal Growth of Calcite in Large Autoclaves. *J. Crystal Growth*. 1974. Vol. 24/25. P. 610–613.

Kopp G.A., Derks M.J., Elmore D.F., et al. Tunable liquid-crystal filter for solar imaging at the HeI 1083-nm line. *Applied Optics*. 1997. Vol. 36, no. 1. P. 291–296. DOI: [10.1364/ao.36.000291](https://doi.org/10.1364/ao.36.000291).

Kristjánsson L. *Iceland Spar and its Influence on the Development of Science and Technology in the Period 1780–1930: Notes and References*. Institute of Earth Sciences, University of Iceland, 2015. 321 p.

Kushtal G.I., Skomorovsky V.I. Advancements in the geometrical measurements of the birefringent filter's crystal plates and two-dimensional measurements of Doppler velocity in the solar atmosphere. *Proc. SPIE*. 2002. Vol. 4900. P. 504–512.

Land E.H. Light polarizer and process of manufacturing the same Patent US 2,237,567. Publ. 08.04.1941.

Land E.H. Optical Interference Sight for Gun, Cameras or Like. Patent US 2420252. Publ. 23.03.1945.

Lyot B. Un monochromateur à grand champ utilisant les interférences en lumière polaire (A wide field birefringent



- filter). Académie des Sciences, Paris, Comptes Rendus.1933. Vol. 197 (25). P. 1593–1595.
- Lyot B. The Birefringent Filter and Its Applications in Solar Physics. *Ann. Astrophys.* 1944. Vol. 7. P. 31–79.
- Lyutin V.I., Dronov V.V., Borodin V.L., Khadzi V.E. Hydrothermal growth and morphology of calcite single crystals. *Proc. the Sixth International Conference on Crystal Growth.* Moscow. 1980. Vol. 4. P. 169.
- Ohman Y. A new monochromator. *Nature.* 1938. Vol. 141 (3560). P. 157–158.
- Orrell L. Mining calcite crystals during World War II. *Mining History J.* 1995. P. 47–72.
- Pettit E. The Interference Polarising Monochromator. *Publ. A.S.P.* 1941. Vol. 53. P. 171.
- Pogodin Yu.V., Dronov V.V. Growth of optical calcite from seeds with various orientations. *Growth of Crystals.* 1972 (1969). Vol. 9. Edited by N.N. Sheftal and E.I. Givargizov. Institute of Crystallography Academy of Sciences of the USSR, Moscow, Translated by J. E. S. Bradley. P. 55–61.
- Schou J., Scherrer P., Bush R., et al. Design and Ground calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. Vol. 275. P. 229–259. DOI: [10.1007/s11207-011-9842-2](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9842-2).
- Siedentopf H., Wempe J. Über Interferenzfilter und ihre astronomische Anwendung. *Astronomische Nachrichten.* 1940. Vol. 270. P. 276. (In German).
- Skomorovsky V.I., Kushtal G.I., Sadokhin V.P. Wide-field Solc-type birefringent filter. *Proc. SPIE.* 2012. Vol. 8446. Id. 84466V-84466V-12.
- Steel W., Smartt R., Giovanelli R. A  $1/8 \text{ \AA}$  birefringent filter for solar research. *Australian J. Phys.* 1961. Vol. 14. P. 201–211.
- Sütterlin P., Rutten R.J., Skomorovsky V.I. BaII 4554  $\text{\AA}$  speckle imaging as solar Doppler diagnostic. *Astron. Astrophys.* 2001. Vol. 378. P. 251–256.
- Title A. The Lockheed alternative partial polarizer universal filter. *Lockheed Palo Alto Research Laboratory 3251. Final report.* 1976.
- Title A., Rosenberg W. *Research on Spectroscopic Imaging. Vol. 1: Technical Discussion.* 1979. Lockheed Missiles and Space Co. Inc. P. B-28.
- Tomczyk S., Mathew S., Gallagher D. Development of a tunable filter for coronal polarimetry. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. Vol. 121, iss. 7. P. 6184–6195.
- Ueno S., Nagata S., Kitai R., Kurokawa H. Features of solar telescopes at the Hida Observatory and the possibilities of coordinated observations with Solar B. *ASP Conference Ser. The Solar-B Mission and the Forefront of Solar Physics.* 2004. Vol. 325. P. 319–324.
- Zhang Hong-Oi, Hongqi Zhang, Dongguang Wang, et al. Solar Magnetism and the Activity Telescope at HSOS. *Chinese J. Astron. Astrophys.* 2007. Vol. 7, no. 2. P. 281–288.
- 90 Jahre im Dienste der Optik.* Bernhard Halle Nachf. Berlin-Steglitz. Dionysos-Verlag Publ. 1963. 85 p. (In German).
- URL: <http://forum.web.ru/viewtopic.php?f=24&t=4544&start=0&sid=f100c7021833f2267b7fd7df58057b2326> (дата обращения 28 апреля 2019 г.).
- URL: <http://crystaltechno.com> (дата обращения 20 марта 2020 г.).
- URL: <http://ckp-rf.ru/usu/200615> (дата обращения 20 марта 2021 г.).

*Как цитировать эту статью:*

Скоморовский В.И., Кушталь Г.И., Токарева Л.С. Исландский шпат и разработка интерференционно-поляризационных фильтров (ИПФ). *Солнечно-земная физика.* 2022. Т. 8, № 1. С. 70–86. DOI: [10.12737/szf-81202209](https://doi.org/10.12737/szf-81202209).