

Аппаратура телескопов малых и умеренных размеров

В.Е. Панчук^{1,2}, Э.В. Емельянов², В.Г. Клочкова¹, В.П. Романенко¹

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п.Нижний Архыз, 369167, Россия

² Ставропольский государственный университет, г.Ставрополь, Россия

Аннотация. Кратко изложена история технических решений, направленных на повышение эффективности телескопов малых и умеренных размеров. Перечислены основные типы аппаратуры, используемой на этих телескопах. Обзор может быть полезен как в учебных целях, так и для оценки перспектив развития такой аппаратуры.

Devices of telescopes of small and moderate size

V.E. Panchuk^{1,2}, E.V. Emelianov², V.G. Klochkova¹, V.P. Romanenko¹

¹ Special Astrophysical Observatory RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia

² Stavropol State University, Stavropol, Russia

Abstract. The history of technical decisions for increasing of small and moderate size telescopes effectivity is briefly described. Main types of devices used at such telescopes are enumerated. The review could be useful both in education and for estimation of perspectives of development of such devices.

1 Введение

В эпоху строительства больших телескопов интерес к проблеме аппаратурного оснащения телескопов малых (менее 0.4 м) и умеренных (0.4-1.0 м) диаметров может показаться несвоевременным. Однако даже поверхностная оценка возможностей современных инструментов указанных диаметров свидетельствует о неослабевающем внимании к их аппаратурному оснащению. Эффективность этих инструментов даже возрастает по мере того, как часть инструментов малого диаметра переходит в категорию монопрограммных. В задаче практической подготовки молодых астрономов малые телескопы играют первостепенную роль. Технологический разрыв, который наблюдается в нашей стране между оснащением профессиональных и учебных телескопов, серьезно сказывается на уровне подготовки астрономов и физиков в университетах. В данной публикации поставлена цель перечисления типов аппаратуры телескопов малых и умеренных диаметров с кратким описанием принципов работы этой аппаратуры (или указанием соответствующей литературы). Несмотря на то, что некоторые изложенные ниже приемы и методы выглядят архаичными, следует знать их сильные и слабые стороны, что в эпоху многоканальных высокоэффективных светоприемников может привести ко второму рождению отдельных методов. Поэтому не исключено, что публикуемая информация окажется полезной при переоснащении отечественных телескопов новой астрофизической аппаратурой.

Перечислим некоторые преимущества и особенности эксплуатации телескопов малых и умеренных диаметров. Разделим эти особенности на технические, финансовые, организационные, научные и психологические.

Технические:

- Практически все большие телескопы являются многопрограммными и их трудно оптимизировать для решения отдельных задач. Малые телескопы легче оптимизировать под избранные классы задач. Хорошим примером является оптимизация 48-дюймового рефлектора DAO для задач фотографической кудэ-спектроскопии: спектрограф этого телескопа по проникающей способности превосходил кудэ-спектрограф 5-м телескопа Хэйла (Ричардсон, 1968).
- В спектроскопии высокого разрешения, выполняемой на средних и больших телескопах, из-за потерь на входной щели выигрыш в проникающей способности пропорционален не квадрату, а первой степени диаметра зеркала. У малых телескопов выигрыш пропорционален квадрату диаметра зеркала.
- Малые телескопы легче поддаются автоматизации.

Финансовые:

- Если малый телескоп оснащен только одним видом аппаратуры, то гарантируется более полное использование аппаратуры.
- Если малый телескоп имеет узкую специализацию (один вид аппаратуры на темные ночи и один – на светлые), то расходы на смену аппаратуры невелики.
- Техническая поддержка малого телескопа обходится дешевле.

Организационные:

- На малых телескопах легче получить время для повторения наблюдений, что бывает необходимо при проверке результатов некоторых наблюдений.

- Аппаратура в стадии отладки и подготовки может дольше находиться на малом телескопе, чем на большом.
- Наблюдения на малых телескопах легче организовать, т.к. в большинстве случаев требуется организовать одного наблюдателя.
- Выход оборудования из строя на малом телескопе не расценивается как безвозвратная потеря времени, а выполняемая в таких случаях замена аппаратуры менее формализована.

Научные:

- Облачность может “выключить” сразу группу больших телескопов, сосредоточенных в одном месте, а у малых телескопов, лучше рассредоточенных по земной поверхности, больше шансов зарегистрировать уникальное событие (в данном случае речь не идет о предельно слабых явлениях).
- Ряд научных задач предполагает непрерывный мониторинг объекта при помощи телескопов, рассредоточенных по долготе (на крупных телескопах такой мониторинг организовать практически невозможно).
- На малых телескопах доступно много времени для продолжения исследования, что важно при исследовании спектральной переменности, или при выполнении массовых спектроскопических обзоров.
- Существует точка зрения (Уорнер, 1986), что время выполнения одного наблюдательного проекта на 1-м телескопе превышает таковое для 4-м телескопа всего лишь вчетверо, а по научной эффективности инструмента один крупный телескоп эквивалентен четырем телескопам половинного диаметра.
- На малых телескопах обнаружено несколько новых феноменов, например, межзвездная поляризация не была обнаружена на 82-дюймовом телескопе и обнаружена на 40-дюймовике, круговая поляризация у белых карликов впервые измерена на 24-дюймовом телескопе. Массовые фотоэлектрические измерения лучевых скоростей выполнены на телескопах 1-м класса, фотометрические исследования нерадиальных пульсаций выполнены на телескопах 0.6-0.9 м, исследования оптических эффектов, сопровождающих гамма-вспышки, выполняются на телескопах еще более скромных размеров. Некоторые эффекты, обнаруженные на крупных телескопах, затем успешно исследовались на малых.

Психологические:

- В любой отрасли науки существуют продуктивные специалисты, для которых научное творчество в значительной мере окрашено индивидуализмом. С другой стороны, выполнение технически сложных экспериментов на больших телескопах редко проводится самостоятельно, а для романтизации процесса астрономических наблюдений нет ни времени, ни места. Наличие малых телескопов в известной мере решает психологические проблемы исследователей-одиночек.
- Несмотря на то, что архивы наблюдений на больших телескопах в достаточном числе случаев существуют и частично открыты для анонимного пользователя, малые телескопы лучше подходят для целей образования. Главным фактором здесь является возможность влиять на процесс наблюдения (уже существуют учебные телескопы с удаленным управлением).

Малые телескопы не развиваются независимо от больших, т.к. прогресс в использовании малых телескопов обязан исключительно прогрессу в технике регистрации сигнала, а также появлению принципиально новых оптических методов. Понятно, что большинство новых технологий появилось сначала на больших телескопах, хотя есть и многочисленные исключения. Телескопы, полвека назад считавшиеся большими, сегодня рассматриваются как инструменты умеренного диаметра. Поэтому проблему оснащения малых телескопов рассмотрим и в историческом аспекте. Библиография вопроса огромна. Мы не ставили своей задачей дать полный обзор, ограничившись перечислением тех примеров, которые сочли либо характерными, либо представляющими для нас дополнительный интерес. Виды аппаратуры и методов сгруппированы по типам используемых светоприемников.

2 Фотографические методы регистрации изображений

Фотографическим методам предшествовали визуальные. Один из последних примеров оценки проникающей способности визуальных наблюдений можно найти в работе (Шефер, 1990). При получении зависимостей предельной звездной величины от диаметра объектива и увеличения телескопа использовалась даже зависимость диаметра зрачка от возраста наблюдателя.

2.1 Прямые снимки

Патрулирование неба линзовыми фотографическими камерами начато в конце XIX века (в Гарварде) и практически завершилось в 90-е годы XX века. Первая ахроматическая широкоугольная камера (диаметр 36 см, $F:1.75$, поле 15°), разработанная Бернардом Шмидтом, вступила в строй в 1930 г. в обсерватории Гамбурга. С середины XX века для получения прямых снимков использовались преимущественно системы Шмидта. Фотографической технике, включая методы предварительной подготовки материала, его обработки и оцифровки, посвящены многочисленные обзоры. Здесь только укажем на незаслуженно забытое решение – полностью отражающий телескоп Шмидта (Эпштейн, 1967), который был свободен от центрального экранирования и нечувствителен к ошибкам коллимации. Идея была развита затем Леметром (1983).

2.2 Снимки с редуктором светосилы

Достоинства систем увеличения поля (редукторов светосилы) впервые продемонстрировал Мэйзел (1953, 1956). Используя линзовую камеру $F:3$, на рефракторе Йеркса он получил выигрыш в проникающей способности до 4-х звездных величин. В настоящее время редукторы светосилы являются неотъемлемой принадлежностью нескольких телескопов класса 1-2 м, ориентированных и на фотометрические работы.

2.3 Интерференционные фильтры

Предел фотографической регистрации определяется яркостью фона неба. Если ограничивать ширину полосы пропускания, то продолжительность экспозиции “до фона неба” увеличивается. Для фотоэмульсий середины XX века фон неба не достигался при разумных экспозициях при ширине полосы 80 \AA , при этом можно было “отстроиться” от основных эмиссий ночного неба. Вначале влияние наклонных пучков на форму полосы пропускания интерференционных фильтров не учитывалось. Шайн и Газе (1950), обнаружили, что интерференционный фильтр диаметром 50 мм, установленный в сходящемся пучке 60-см камеры ($F:1.4$), имеет расширенную полосу пропускания, а общее пропускание системы уменьшается. Интерференционный фильтр был заменен стеклянным с полосой 240 \AA . Позже интерференционные фильтры использовались преимущественно с редукторами светосилы.

2.4 Интерферометр Фабри-Перо

Впервые ИФП в астрономии (для измерения длины волны небулярной линии в туманности Ориона) применили Фабри и Бюиссон (1911). Начало систематическим исследованиям излучения межзвездной среды с помощью эталона Фабри-Перо положено работами Куртеса (1958). В частности, он показал, что интерференционные кольца можно эффективно использовать для обнаружения областей НП на фоне звездных облаков. Жакино и Дюфо (1949) разработали установку для фотографирования туманностей в монохроматическом свете. Эталон размещен вблизи (до) фокальной плоскости телескопа, линза поля (после фокальной плоскости) строит изображение колец в своей фокальной плоскости. Диаметр отверстия, установленного в фокальной плоскости линзы, равен диаметру создаваемого линзой изображения главного зеркала телескопа. За разделяющей диафрагмой находится светосильный объектив, строящий изображение туманности. При ширине полосы в 0.6 \AA экспозиция увеличивалась всего в 3 раза по сравнению со снимками без эталона. Подобная схема дает возможность иметь для всего поля одну и ту же длину волны и одинаковое пропускание.

3 Одноканальные фотоэлектрические системы

Одно- и двухканальные фотоэлектрические системы широко использовались с середины XX века до конца 90-х, как в фотометрических, так и в поляриметрических исследованиях.

3.1 Электрофотометры

Применение электрофотометров на телескопах малых диаметров ограничивалось шумами мерцания. Для подавления шумов мерцания Хилтнер и Коуд (1950) предложили метод записи отношения световых потоков. Затем были предложены различные методы модуляции полного светового потока и развиты двухканальные методы. В этом разделе упомянем методы и с небольшим числом каналов. Предельные величины широкополосной фотометрии на 1-м телескопе можно найти у Брегера (1986). Так, в фильтре V точности, ограниченные статистикой фотонов (в %) 0.01, 0.1, и 0.5, достигаются за время накопления 10 минут для звезд 5.8, 10.8 и 14.3 величины соответственно, а за время накопления 60 минут – для звезд 7.7, 12.7, и 16.2 соответственно.

3.1.1 Двухканальные фотометры

Для исследования быстрых малоамплитудных переменных необходимо иметь низкий вклад фотонных шумов, т.е. большой телескоп предпочтителен. Но для изучения осцилляций с характерными временами минута – десятков минут, где роль вариаций атмосферной прозрачности преобладает – необходимость использования больших телескопов неочевидна.

В последние 15 лет формируется новое направление – астеросейсмология, т.е. исследование внутреннего строения пульсирующих звезд посредством анализа фотометрических и спектральных вариаций. Распределение массы по радиусу звезды отражается на характере суперпозиции пульсационных мод, кроме того, блеск звезды модулируется осевым вращением. При астеросейсмологических исследованиях необходимо объединять усилия нескольких обсерваторий, разнесенных по долготе (Whole Earth Telescope). Схема двухканального фотометра для наблюдений в системе WET приведена в работе Клейнмана и др. (1996).

3.1.2 Двухканальные поляриметры

Фотоэлектрическая поляриметрия почти полностью основана на модуляционных одноканальных и (или) двухканальных методах. Типичную схему двухканального поляриметра приводит

Аппенцеллер (1967). По ходу лучей расположены: полуволновая ахроматическая пластинка, диафрагма, светофильтр, призма Волластона, склеенная с линзой поля, отражающая призма, разводящая пучки на два ФЭУ. С целью минимизации инструментальных эффектов для обсерваторий Сайдинг Спринг и Йеркса были разработаны поляриметрические 61-см телескопы, где кассегреновская оптика может поворачиваться вокруг продольной оси (детали см. в работе Хилтнера и Шилда, 1965). Это позволило создать систему высокоточных поляриметрических стандартов.

3.1.3 Фотометры с небольшим числом каналов

Внедрение разделителей спектра в практику электрофотометрии вызвало появление многочисленных систем, где измерение в нескольких фотометрических полосах выполняется одновременно. Приведем два примера. Шестиканальный фотометр 1.5 датского телескопа позволял проводить одновременную фотометрию в полосах системы Стремгрена (Нильсен, 1983). После диафрагмы свет попадает на небольшой автоколлимационный спектрометр ($20 \text{ \AA}/\text{мм}$), в фокальной поверхности которого размещены щели, выделяющие участки, соответствующие полосам $uvby$. Затем при помощи небольших зеркал излучение направляется на соответствующие ФЭУ. Для измерения индекса $H\beta$ используется канал другой конструкции. Схема пятиканального фотометра системы VBLUW Вальравена, использовавшегося на 0.9-м голландском телескопе (Вальравен и Вальравен, 1960), ориентирована на высокую эффективность в УФ-диапазоне (пропускание спектрографа 70%). Вместо фильтров используется кварцевая поляризационная оптика и призмный спектрограф (две 72-градусные кварцевые призмы). Полосы VBUW выделяются четырьмя призмочками и направляются на соответствующие ФЭУ. Полоса L, тесно расположенная между полосами B и U, выделяется фильтром, расположенным до спектрографа, в канале луча с другой поляризацией.

3.2 Спектрометры

Одно- и двухканальные спектрометры являлись основными светоприемными устройствами малых телескопов свыше 30-ти лет.

3.2.1 Узкополосные спектрофотометры

Наиболее простой способ спектрофотометрии линий – переключение системы щелей, центрированных на измеряемую линию (группу линий) и на соседние участки непрерывного спектра. Ниссен (Вестник ЕЮО, 1977) использовал эшелле-спектрограф, обеспечивающий высокую дисперсию ($2 \text{ \AA}/\text{мм}$). Щель шириной 14 \AA центрирована на линию 4026 \AA , две другие щели, шириной 6 \AA каждая, служили для измерения потока в континууме по обе стороны от линии гелия. При числе отсчетов до 100000, за полчаса на 1-м телескопе регистрировалась 10 звездная величина, с точностью 0^m005 в полосе 4026 \AA .

3.2.2 Корреляционные спектрометры

Эффективность кросс-корреляционной техники в задаче измерения лучевых скоростей впервые на практике продемонстрировал Гриффин (1967). Техника измерения лучевых скоростей на малых телескопах изложена в работе Гриффина (1969), выигрыш по сравнению с фотографическим методом составил три порядка.

Описание оснащения 61-см телескопа обсерватории Fick, специализированного для измерения лучевых скоростей, дано в работе Биверса и Иттера (1977). В цилиндрической камере фокуса Кудэ установлено зеркало (диаметр 41 см, фокусное расстояние 305 см), служащее коллиматором и камерой. Дифракционная решетка $1200 \text{ штр}/\text{мм}$, максимум концентрации 5000 \AA ,

размер заштрихованной области 135×110 мм, ориентирована штрихами параллельно направлению север-юг. Обратная линейная дисперсия $2.62 \text{ \AA}/\text{мм}$, маска щелей перекрывает диапазон длиной 400 \AA с центром на 4600 \AA . Входная щель 0.09 мм соответствует изображению 1 угл. сек и разрешению 15 км/с на маске. Воздух из цилиндра, в котором смонтирован спектрометр, может быть откачан. Калибровка шкалы длин волн осуществляется линиями спектра гелий-неонового лазера.

Практически одновременно был создан первый кросс-корреляционный спектрометр с эшелле – CORAVEL (Баранн и др., 1979). Первый экземпляр прибора работал с 1977 г. в Обсерватории Верхнего Прованса (ОНР), второй – с 1981 г. на 1.5-м датском телескопе в ЕЮО. Компактность прибора (фокус камеры 57 см) обеспечивала хорошую жесткость и удобство работы в фокусе Кассегрена. Для звезд $V < 15$ на 1.5-м телескопе реализована точность измерения лучевой скорости 0.5 км/с (Вестник ЕЮО, 1981).

Эффективный фотоэлектрический измеритель лучевых скоростей 1.2-м телескопа DAO (Флетчер и др., 1982) был построен на базе кудэ-спектрографа (Ричардсон, 1968). Коллиматор $F = 7.57 \text{ м}$, $F:30$, мозаичная дифракционная решетка 831 штр/мм, 2-й порядок, камера $F = 2.44 \text{ м}$, обратная линейная дисперсия $2.4 \text{ \AA}/\text{мм}$, ширина проекции щели 80 мкм, маска, перемещаемая шаговым двигателем, перед ФЭУ установлена пластмассовая линза Фабри ($F:1$). От звезды $V = 16$ зв. вел. регистрировалось 10 отсчетов за секунду, что обеспечивало итоговую точность лучше, чем 1 км/с .

Биверс и др. (1980) применили кросс-корреляционный метод для исследования движений пылевых частиц в F-короне. Серийный монохроматор (схема Эберта, $F:3.5$), был оснащен маской щелей, повторяющих положение специально отобранных линий солнечного спектра в интервале $4005\text{--}4352 \text{ \AA}$. Питательной оптикой являлось параболическое зеркало ($F=76 \text{ см}$, $1:5$), в комбинации с плоским целостатным зеркалом.

Небольшой спектрограф, предназначенный для фотографических работ (Ричардсон и Брэли, 1973), был переоборудован в кросс-корреляционный спектрометр 40 -см телескопа DAO. После щели установлена специальная призмочка, а в фокальной плоскости камеры установлена маска (300 линий в области $415\text{--}485 \text{ нм}$), изготовленная по спектру K-гиганта. Точность определения лучевых скоростей (2 км/с) ограничивается гнутями прибора.

3.2.3 Сканирующие монохроматоры

Для изменения спектрального разрешения на фотографическом спектрографе следует изменить фокусное расстояние камеры. Жакино и Дюфо (1948) показали, что спектральное разрешение, достигаемое на монохроматорах, зависит от ширины щели, т.е. по сравнению с фотографическими спектрографами монохроматоры являются более гибкими спектральными приборами. Главный недостаток сканирующих монохроматоров состоит в том, что флуктуации качества изображения и прозрачности на входе отражаются на деталях спектра. Хилтнер и Коуд (1950) предложили метод компенсации флуктуаций регистрируемого сигнала путем сравнения с сигналом опорного канала, где регистрируется доля света, прошедшего через входную щель.

Щелевые призмные монохроматоры

Схема компенсации флуктуаций освещенности на входной щели применена в двухпризменном монохроматоре на 120 -см рефлекторе (Гик и Уилкок, 1956). Достижение максимального разрешения (0.5 \AA) требовало сузить щель до 25 мкм, тогда как изображение звезды и амплитуда дрожания изображения были выше. Использовалась сложная (по тем временам) система компенсации флуктуаций – ФЭУ второго канала регистрировал недиспергированный свет, отраженный от первой грани призмы.

Сканеры с предобъективной призмой

Для спектрофотометрических наблюдений в ближней ИК-области был использован 17 -дюймовый ($F:10$) катадиоптрический телескоп системы П.П.Аргунова с четырехградусной пре-

добъективной призмой и фотоумножителем RCA-7102 (Комаров и Позигун, 1968). Дисперсия призмы была направлена вдоль склонения, сканирование спектра (диапазон 4000-10000 Å за 10 минут) осуществлялось реверсивным двигателем по прямому восхождению.

Сканеры с плоской дифракционной решеткой

Бойс и др. (1973) разработали сканер фокуса кудэ 42-дюймового телескопа Ловелловской обсерватории. Коллиматор с фокусным расстоянием $F = 240$ дюймов, (F:49), диаметр коллимированного пучка 5 дюймов, решетка 1200 штр/мм, фокусное расстояние камеры 120 дюймов, обратная линейная дисперсия 2.67 Å/мм у 5000 Å , шаг сканирования 0.078 Å и больше. Исследовались скорости осевого вращения ярких звезд.

Хороший пример прибора, эффективно использовавшегося для измерения распределений энергии в спектрах звезд разных типов, представляет сканер 61-см телескопа университета Bochum. Телескоп был перенесен в южное полушарие (ЕЮО, 1973 г.) для создания спектрофотометрических стандартов южного неба. В одноканальном инструменте, выполненном по схеме Черни-Тернера, перемещение решетки осуществлялось шаговым двигателем (Вестник ЕЮО, 19766).

Сканеры с вогнутой решеткой

Лиллер (1963) показал, что пропускание монохроматора с вогнутой решеткой увеличивается втрое по сравнению с монохроматором, имеющим плоскую решетку. Из различных схем монохроматоров с вогнутыми решетками оказалась популярной схема (Намиока, 1958), в которой угол между линиями, соединяющими центр решетки и щели, а также расстояние от решетки до щелей постоянны. Наиболее продуктивным оказался спектрофотометр, построенный по этой схеме для 50-см рефлектора (Калининков и Харитонов, 1967); на этом приборе удавалось проводить спектрофотометрию звезд до 7-й величины (Харитонов и Клочкова, 1972).

Биверс и Иттер (1986) для работ на 37-см телескопе применили вогнутую (F:4) голографическую решетку 1200 штр/мм, дающую обратную дисперсию 40 Å/мм .

3.2.4 Системы кодирования спектра

Своеобразным апофеозом одноканальных фотоэлектрических систем явилась разработка устройств кодирования спектров. Метод кодирования спектра состоит в том, что одноканальным приемником регистрируется последовательность сигналов, сформированных в результате прохождения света через последовательно сменяемые маски щелей. Последовательность чередования щелей и непрозрачных участков маски, а также последовательность смены таких масок можно подчинить определенному закону с тем, чтобы цифровая обработка совокупности сигналов была достаточно простой. Например, сменяемые щели маски можно подчинить закону построения строк в матрице Адамара (Слоан и др., 1969). Интерес к экспериментам с адамаровскими спектрометрами объясняется просто – мультиплексный выигрыш здесь такой же, что и в фурье-спектрометре (т.е. отношение сигнал/шум пропорционально корню квадратному из числа измеряемых дискретных элементов спектра), а технология проще (дифракционный спектрограф, снабженный механически сменяемыми масками). Для протяженных объектов можно применить сочетание кодирующих масок на входе и выходе спектрометра (Харвит, 1971). Минг Хи Тай и др. (1975) сконструировали адамаровский спектрометр, позволяющий получать одновременно 15 ИК-спектров по 255 элементов каждый. Это позволило изучить широтное распределение метана по диску Юпитера.

3.2.5 Системы сканирования интерферометром Фабри-Перо

Если необходимо сканировать в узком спектральном интервале (менее 5 Å), то применяется способ изменения давления в камере интерферометра или изменения угла наклона ИФП. При

сканировании в более широком интервале наиболее популярен быстрый пьезоэлектрический метод изменения расстояния между пластинами.

В качестве примера приведем использование на 76-см телескопе интерферометров, сканирующих в центральном пятне (Трефферс, 1981). Использовались два спектрометра с ИФП, диаметр пластин каждого 30 мм, $R = 20000$ (15 км/с). Спектрометр видимого диапазона (5000–8000 Å) имел поле зрения $2'$, приемником служил ФЭУ с GaAs-катодом, общее пропускание 0.16. Спектрометр ИК-диапазона был ориентирован на изучение линии H_2 2.1 мкм, поле $1.5'$, использовался охлаждаемый приемник InSb, пропускание системы 0.10. Пьезоэлектрическое сканирование осуществлялось за 20 секунд.

4 Системы фотоэлектрической регистрации изображений

4.1 Электронно-оптические преобразователи

По сравнению с фотопластинкой, ЭОП с флуоресцирующим экраном не обладает повышенной разрешающей способностью. Отсюда следовал вывод, что в задаче регистрации изображений звезд ЭОПы не конкурентны с прямым фотографированием. Есипов (1960) показал, что применение однокаскадного фотокада ЭОПа на 13-дюймовом телескопе (F:15) для регистрации звездных изображений дает выигрыш в 30-40 раз по сравнению с прямым фотографированием, уступая по размеру поля (размер рабочей области фотокатода 6-10 мм) тоже в десятки раз. Качество изображений при фотокада регистрации оказалось лучше, чем при фотографировании люминофора через оптический переборос. Однако такой выигрыш получен на относительно коротких экспозициях, а предел попрежнему ограничен яркостью фона неба. ЭОПы хорошо конкурировали с прямой фотографией в ИК-диапазоне, где чувствительность фотоматериалов и качество их калибровки невысоки, но свечение неба в полосах гидроксила серьезно уменьшает предел таких наблюдений. Применение ЭОПов становится оправданным при ширине полосы менее 70-50 Å (в таких полосах экспозиции “до фона неба” при прямом фотографировании составляют часы). Щеглов (1960) использовал ЭОП для фотографирования диффузных туманностей через интерференционный фильтр шириной 40 Å, центрированный на линию $H\alpha$. В качестве питающей оптики использовался объектив диаметром 33 мм. Сдерживающим фактором оказалось свечение геокороны. Дальнейшее увеличение контраста над фоном обеспечивалось переходом на интерферометры Фабри-Перо с ЭОПами. Щеглов (1963) одним из первых показал, что сочетание ИФП с ЭОПами открывает возможности регистрации слабых протяженных объектов. В первых наблюдениях использовался фотокада однокаскадный ЭОП с диаметром фотокатода 10 мм.

4.2 Матрицы ПЗС

Применение матриц ПЗС для получения изображений звездного неба распространяется на телескопы с апертурой до 7 мм! (Немиров и Раферт, 1999). Из всего множества отметим только два характерных примера. Герелс (1986) использовал неподвижный 91-см телескоп для поиска астероидов. Скорость переноса заряда по матрице ПЗС согласована со скоростью перемещения звездных изображений на данном склонении. Ньютоновский фокус (F:5) телескопа модифицирован до F:3.85, что обеспечило масштаб 1.73 угл. сек на 30-микронный пиксель. При неподвижном телескопе звезда на экваторе проходит 512 пикселей за 60 секунд, при этом звездная величина 19.5 измеряется с точностью 6σ . Харт и др. (1996) реконструировали старый 50-дюймовый мельбурнский телескоп для выполнения программы MACHO. В главном фокусе (F = 5671.8 мм), установлен редуктор светосилы (с F:4.5 до F:3.8), обеспечивающий плоское поле в 1° . Дихроический светоделитель с границей на 610 нм выделяет две спектральные области, центрированные на 560 и 710 нм. Одновременные наблюдения в двух полосах

необходимы по следующей причине. Гравитационная линза вызывает ахроматические изменения блеска, тогда как физическая переменность связана с изменениями температуры, т.е. цвета. В каждой фокальной поверхности установлена мозаика из 4-х матриц ПЗС $2K \times 2K$, масштаб $0.62''/\text{пиксель}$. Выполнялись 300-секундные экспозиции. При средних изображениях предел составляет $V = 20.5$. Наблюдения можно было проводить даже в нефотометрические ночи.

5 Спектрографы

Занимаясь спектроскопией на малых телескопах, приходится пользоваться узкими щелями. Следует помнить, что при ширине щели меньше 0.03 мм уже влияет дифракция на щели, и большая часть света не попадет на коллиматор.

5.1 Призменные спектрографы

5.1.1 Щелевые призменные спектрографы

Из-за механических и температурных деформаций подвесные призменные спектрографы с высокой дисперсией не приобрели популярности. Для спектральной классификации использовалась низкая дисперсия – от 130 до $40\text{ \AA}/\text{мм}$. Основы классификации МКК заложены на 1-м рефракторе Йеркса, с однопризменным спектрографом (фактор широкощельности 7). Регистрировался диапазон $3920\text{--}4900\text{ \AA}$ с обратной линейной дисперсией $120\text{ \AA}/\text{мм}$ у $H\gamma$. В середине XX века единственными телескопами диаметром меньше 1 м , используемыми с щелевыми спектрографами, являлись Ликский рефрактор, кросслеевский рефлектор и 37-дюймовый рефлектор обсерватории Энн Арбор. Спектрограф Кэртиса 37-дюймового рефлектора эксплуатировался с 1927 г., более 30 лет. Фокусное расстояние коллиматора (F:18) равно 68 см , диспергирующий узел содержал две 60-градусные призмы из флинта. Камеры с фокусным расстоянием 7.5 , 15 , 30 и 60 см обеспечивали обратные линейные дисперсии 140 , 76 , 38 и $19\text{ \AA}/\text{мм}$ соответственно. Спектрограф В.А. Альбицкого, использовавшийся на 1.2-м касегреновском рефлекторе (F:20) с плоским диагональным зеркалом (см. Копылов, 1954), имел фокусное расстояние коллиматора 995 мм при диаметре 50 мм , призму из флинта с углом 66.6° , и три сменных объектива (F:4, F:8, F:12) с фокусным расстоянием 230 , 480 и 720 мм соответственно. Эти объективы обеспечивали дисперсию у $H\gamma$ 72 , 36 и $23\text{ \AA}/\text{мм}$ соответственно. Кварцевый двухпризменный спектрограф, использовавшийся на этом же телескопе КрАО, имел фокусное расстояние коллиматора 800 мм при диаметре 40 мм , фокусное расстояние камеры 200 мм (F:4). Оптика камеры позволяла работать в диапазоне длин волн $3400\text{--}4300\text{ \AA}$ с дисперсией $65\text{--}162\text{ \AA}/\text{мм}$ соответственно.

5.1.2 Бесщелевые призменные спектрографы

Рефракторы с предобъективной призмой

Еще при создании Гарвардской классификации была продемонстрирована роль относительного отверстия объектива спектрографа: на 20-см телескопе (F:5.6) с предобъективной призмой (или системой призм) были получены спектры звезд, недоступных щелевым призменным спектрографам более крупных телескопов с меньшим относительным отверстием. Для регистрации УФ-спектров Шалонж в 30-х годах XX века выполнил наблюдения с кварцевой объективной призмой на высоте 3457 м . Расширение спектров достигалось искусственно вызванным астigmatизмом (объектив был наклонен на 8° к задней плоскости призмы Корню).

Небулярные спектрографы

Изобретение камеры Шмидта, в частности, открыло возможность фотографической регистрации спектров протяженных объектов. Двухпризменный спектрограф с камерой Шмидта

был закреплен в нижней части трубы рефрактора Йеркса, в верхней части была размещена входная щель, т.е. 1-м телескоп служил гидом и несущей конструкцией небулярного спектрографа, поле зрения которого определялось диаметром камеры Шмидта и длиной трубы рефрактора (Струве, 1937). Эта идея была развита в конструкции небулярного спектрографа обсерватории МакДональд, где за счет использования рельефа местности входная “щель” удалена от диспергирующего узла на еще большее расстояние (Струве и др., 1938). Идея использования рельефа местности была повторена в схеме сконструированного Д.Д. Максотовым и Б.К. Иоаннисиани небулярного спектрографа Крымской астрофизической обсерватории в Симеизе (см. Пикельнер, 1954). Основной частью спектрографа служила 15 см менисковая камера (F:1) и две призмы из флинта.

Призма Ференбаха

Основной недостаток призмённых бесщелевых спектров – отсутствие спектра сравнения. Проблему пытался решить еще Пиккеринг (1896), предложивший реверсию предобъективной призмы. Но сравнение двух противоположных спектров не дает чистый доплеровский сдвиг, т.к.: а) при реверсии призмы центры прямой и обратной экспозиции не имеют одно и то же склонение (нужна точность совпадения лучше чем $0.05''$), б) дисторсия призмы дает сдвиг линий, который для двухградусного поля приводит к ошибкам в тысячи км/с. Первая проблема ограничивает метод измерениями относительных лучевых скоростей, вторая была преодолена Ференбахом (1947). Призма Ференбаха представляет собой плоскопараллельную пластину, состоящую из двух склеенных призм из разного сорта стекла, имеющих различные дисперсии, но одинаковые индексы рефракции для определенной длины волны. Между двумя последовательными экспозициями на одну фотопластинку выполняется реверсия призмы на 180° вокруг оси телескопа и небольшой сдвиг по прямому восхождению. Наиболее продуктивным инструментом такой системы оказался 40- см астрограф (F:10, масштаб изображений $51.5''/\text{мм}$) GPO (Grand Prism Objectif), дающий дисперсию $110 \text{ \AA}/\text{мм}$ (Гизекинг, 1979). При экспозиции 2×30 мин ошибки измерения лучевой скорости для звезд ярче 9.7 величины заключены между 4 и 9 км/с. Сравнение с щелевой спектроскопией на 90- см рефлекторе показало, что после учета различия апертур, в пересчете на одну звезду, GPO в 10 раз эффективнее (Вестник ЕЮО, 1979). В поле телескопа оказались 35 звезд с требуемой точностью измерения скорости, т.е. общий выигрыш GPO перед щелевой спектроскопией на телескопе равной апертуры составляет 150–200.

Система Мерсена

25- см афокальный телескоп АСИ-5 использовался для фотоэлектрического сканирования спектров звезд (Мельников и Купревич, 1956). Параллельный пучок, сформированный после отражения от вторичного выпуклого параболического зеркала телескопа, попадал на 30-градусную литтровскую призму, после которой диспергированные пучки перехватывались вогнутым зеркалом, обеспечивающим дисперсию $200 \text{ \AA}/\text{мм}$ у Н γ . Сканирование спектра осуществлялось поворотом призмы, фотометрируемый спектральный участок шириной 14 \AA попадал в щель, за которым находился электрофотометр. Прибор отличался высокой эффективностью в УФ-диапазоне и позволял регистрировать спектры до 7-й зв. вел.

Призмённый спектрофотометр

Габариты фотоумножителей исключали применение многоканальных систем, хорошо зарекомендовавших себя на больших телескопах (Оук, 1969, Роджерс и др., 1973), на телескопах умеренного диаметра. Внедрение миниатюрных ФЭУ и оптоволоконной технологии позволило решить эту задачу (Барвиг и Шоембс, 1986). На три входных 400-микронных оптоволоконных многоканального спектрофотометра одновременно проецируются объект, звезда сравнения и фон неба. Офсетный гид позволяет работать на 1-м телескопе вплоть до 16 зв. вел. Оптоволоконка питает три идентичных призмённых спектрографа. Спектр, построенный в каждом из трех спектрографов, проецируется на торцы 15-ти оптоволокон, выходы которых соединены с

миниатюрными фотоумножителями, охлаждаемыми на эффекте Пельте.

5.2 Спектрографы низких порядков дифракции

Внедрение дифракционных решеток с профилированным штрихом позволило значительно увеличить угловую дисперсию при фиксированных размерах диспергирующего элемента.

5.2.1 Бесщелевые дифракционные спектрографы

Совершенствование технологии делительных машин, изготовления реплик дифракционных решеток, внедрение голографических методов, позволило рассматривать схемы бесщелевых дифракционных систем.

Телескоп-спектрограф системы Шмидта

Эпштейн (1967) предложил сочетать отражающую коррекционную пластину Шмидта с дифракционной решеткой. Эта идея нашла применение только в схемах светосильных спектрографов (Леметр, 1981, 1983).

Решетка в сходящемся пучке

Хоаг и Шредер (1970) использовали прозрачную дифракционную решетку в сходящемся пучке 1-м рефлектора (F:7.5) обсерватории Китт Пик. В этом случае изображения других спектральных порядков располагаются по кругу, радиус которого равен расстоянию решетки от изображения нулевого порядка. Решетка 150 штр/мм, расположенная на расстоянии 51 мм от фокуса, обеспечивала дисперсию 1260 Å/мм, рабочее поле составляло 30 минут дуги. За 30-минутную экспозицию регистрировались объекты $B = 16.8$.

Телескоп на вогнутой решетке

Фуренлид (1984) предложил схему телескопа-спектрографа с единственным оптическим элементом – вогнутой дифракционной решеткой. Оценки показали, что телескоп с эквивалентным диаметром 7.3 дюйма (18.5 см), фокусным расстоянием 3335 мм, плотностью штрихов 210 штр/мм, с дисперсией 14.3 Å/мм за час экспозиции позволит получить на матрице ПЗС спектры звезд 10.6 величины с $S/N = 100$. Для сравнения отмечено, что на 96.5-см телескопе KPNO спектрограф фокуса куда с указанными дисперсией и отношением сигнал/шум имеет предел спектроскопии ярче на одну звездную величину.

Спектрограф Линника

Проблема одновременной регистрации реперного и звездного спектров в бесщелевом спектрографе решена Линником (1963). Небольшая часть коллимированного пучка проходит через пластинку, формирующую интерференционные полосы Тальбота, расположенные в фокальной плоскости объектива рядом со спектром звезды. На дифракционной решетке, работающей при фиксированном угле дифракции, размещена отражающая призма с небольшим углом, выводящая небольшую часть коллимированного пучка (без дифракции) в поле камеры, где это недиспергированное излучение отклоняется на оптику гида. Гидирование осуществляется быстрыми перемещениями первой линзы коллиматора поперек его главной оси, для этого использованы электромагниты.

5.2.2 Щелевые дифракционные спектрографы

Наряду с основным преимуществом – возможностью одновременной регистрации нескольких объектов, бесщелевая спектроскопия имеет ряд недостатков, среди которых главными являются влияние фона неба и зависимость разрешения от качества изображения и качества гидирования. Поэтому основные усилия были направлены на совершенствование щелевых дифракционных спектрографов.

Спектрографы с фотографической регистрацией

Сочетание дифракционной решетки и камеры Шмидта изменило облик целевого спектрографа. Стремление к универсализации возможностей привело к появлению набора фотографических камер и сменных дифракционных решеток. В качестве примера приведем трехкамерный кассегреновский спектрограф 60-дюймового телескопа Маунт Вилсон, оснащенный тремя сменными решетками (Вилсон, 1956). Однако даже при применении фотографических методов не все было очевидно. Например, с использованием формулы Боуэна для случая спектроскопии протяженных объектов, было показано (Бергштраль, 1970), что в задаче измерения лучевых скоростей протяженных объектов спектроскопия нескольких ярких линий в фокусе Кудэ выгодней спектроскопии большого числа линий в первичном фокусе. Для нэсмитовского фокуса 0.9-м рефлектора Ричардсон и Брэли (1973) разработали маленький фотографический спектрограф с внеосевой камерой и коллиматором. Впоследствии этот прибор был оснащен приемником RETICON (Эдвин, 1989). Массовыми инструментами фотографической эпохи оказались кассегреновские спектрографы фирм Boller & Chivens и Karl Zeiss Jena. Спектрограф B&C имеет диаметр коллимированного пучка 90 мм, сменные решетки 102 × 128 мм, полусплошную камеру Боуэн-Шмидт-Кассегрен ($F = 140$ мм) с невиньетированным полем 6 × 25 мм. Спектрограф UAGS имеет близкие параметры камеры с внешним фокусом ($F = 150$ мм), две камеры Шмидта с внутренним фокусом ($F = 110$ мм и $F = 170$ мм), но меньший диаметр коллимированного пучка (75 мм) и большее число оптических элементов. Эти приборы послужили основой для перевода спектроскопии с умеренным разрешением на фотоэлектронные светоприемники.

Спектрографы с электроннооптическими преобразователями

Большинство спектрографов с фотографической регистрацией, конструкция которых позволяла использовать линзовые камеры или камеры Шмидт-Кассегрен, послужили базой для отработки методов наблюдений с электроннооптическими усилителями яркости (ЭОП) с последующей фотографической регистрацией. Применение ЭОПов с оптическим перебросом на фотопластинку не давало резкого выигрыша в сочетании “проницающая способность при заданном сигнал/шум”, поэтому вначале основной резон использования ЭОПов состоял в освоении ближнего ИК-диапазона, недоступного для прямых фотографических наблюдений. Например, Вуд (1968) использовал кассегреновский спектрограф 32-дюймового рефлектора для получения зеемановских спектров ярких звезд в ИК-диапазоне. Для поиска линий, асимметричных вследствие эффекта Зеемана или других эффектов, был разработан автокорреляционный метод. Удачный прибор сконструировал Есипов (1963). В комплект спектрографа входили линзовые камеры, исправленные для работы в ИК-области, обеспечивающие дисперсии 90 и 200 Å/мм с решеткой 600 штр/мм в 1-м порядке. Прибор был испытан на 13-дюймовом рефлекторе.

Спектрографы с диссекторами

С начала 70-х на 1-м телескопе Ликской обсерватории использовался IDS (image dissector scanner), состоящий из трехкаскадного ЭОПа (40 мм фотокатод S-20), за третьим каскадом которого размещался диссектор, сканирующий спектр за время послесвечения фосфора. Фосфоресцирующий экран использовался как промежуточное запоминающее устройство. Спектрограф имел две апертуры, вторая служила для регистрации фона неба. Для более точного учета фона выполнялось переключение апертур. Пиковая квантовая эффективность диссектора, имеющего 350 элементов разрешения, составляла 20 %. Недостатком диссектора является длительное послесвечение люминофора при пересвечивании. Ключевые наблюдения пекулярного объекта SS 433 были выполнены с IDS на 0.6-м телескопе Ликской обсерватории (Маргон и др., 1979). Но диссектор еще не являлся счетчиком фотонов.

Спектрографы с диодными линейками

Удачный пример IRS – интенсифицированного ретиконного сканера – представлял спектрограф 90-см телескопа обсерватории Китт Пик, эксплуатируемый с начала 80-х. После ЭОПов вместо диссектора были установлены две ретиконные 820-элементные линейки. Считывание

осуществлялось каждые 10 секунд, причем каждое изображение содержало шумы, составляющие 4 фотона на элемент. Точность определения лучевых скоростей на таком приборе составляла 3-5 км/с.

Спектрографы со счетчиками фотонов

Многоканальный спектрометр со счетчиком фотонов описан в работе Шектмана и Хилтнера (1976). Система включает два трехкаскадных ЭОПа, сопряженных оптоволоконной шайбой, затем оптический переборос на диодную линейку. На 1.3-м телескопе от объекта 13 зв. вел. получен 1 отсчет в секунду на ангстрем. Развитием метода "шектографии" явилась система 2D-Frutti (Шектман, 1984). Прибор был построен на 4-м телескопа СТЮ, а затем конструкция была повторена для 1-м телескопа (F:10) со спектрографом Boller & Chivens. Двухкаскадный ЭОП с 40-мм катодом S-20, соединяемый оптическим переборосом с 40-мм катодом ЭОПа на электростатической фокусировке, который, в свою очередь, посредством оптоволоконной шайбы соединен с усилителем изображения на микроканальных пластинах. Затем через оптоволоконный трансформатор масштаба (фокон) изображение переносится на матрицу ПЗС. На формате ПЗС 11.3×8.8 мм строится входное поле спектрографа 35×28 мм. Продолжительность полного считывания с ПЗС составляет 7 мс, но можно считывать часть формата ПЗС. Полная длина щели, составляющая 6.8 минут дуги, занимает на ПЗС только 32 строки. Борьба с повторным счетом событий выполняется на этапе сравнения с предыдущим кадром. Определение координат событий выполняется с точностью до $1/8$ размера пикселя. Таким образом, на выходе системы получается формат 3040×256 пикселей. Для прибора характерна нелинейность на больших потоках (выше 9 отсчетов на элемент разрешения за секунду). На 1-м телескопе это соответствует регистрации 12 зв. вел. с разрешением 4 \AA . По стоимости система была дороже матриц ПЗС, производимых в первой половине 80-х. Мохнацки и др. (1986) разработали счетчик фотонов для 1.9-м телескопа DDO. С обратной линейной дисперсией $16 \text{ \AA}/\text{мм}$ у звезд до 15-й величины обеспечивалась точность измерения лучевой скорости 1 км/с.

Спектрографы с линейками и матрицами ПЗС

Совершенствование технологии приборов зарядовой связи существенно облегчило задачу конструирования подвесных спектрографов, опуская нижнюю границу диаметров спектроскопических телескопов. МакДэвид (1986) разработал миниатюрный (габариты конструкции $12 \times 7 \times 5$ дюймов) касегреновский (F:12) спектрометр 40-см телескопа. Светоприемником является ПЗС-линейка из 128-ти элементов (13×13 мкм), сферическое зеркало диаметром 60 мм (фокусное расстояние 200 мм) служит камерой и коллиматором, обеспечивая в литтровском сочетании с решеткой 600 штр/мм (максимум концентрации на 6500 \AA , размер заштрихованной области 30×30 мм), обратную линейную дисперсию $80 \text{ \AA}/\text{мм}$. Входная однопиксельная щель шириной 13 мкм соответствует $0.5''$. Прибор ориентирован на спектроскопию в области H α , основной проблемой являлось точное центрирование звезды по высоте щели. Денби и др. (1986) разработали компактный спектрограф 60-см телескопа. Ломаный линзовый коллиматор (F:9), F=485 мм, решетка 300 штр/мм, камера (F:2), F=85 мм, дисперсия 4 \AA на 13-микронный пиксель. Подсмотр осуществлялся 75-мм объективом (F:3.5). Стоимость системы без персонального компьютера и ТВ-трубки составила 3000 у.е. В первые годы работы с линейками и матрицами ПЗС основные неудобства представляла неэффективность переноса, вызывающая остаточные эффекты при вычитании линий ночного неба. Боролись с этим и путем предварительной подсветки поверхности приемника, что увеличивало шум считывания. При низком относительном вкладе от шумов считывания работает пропорциональность отношения сигнал/шум (S/N) квадратному корню из числа отсчетов \sqrt{n} . При низких S/N основной характеристикой приемника являются шумы считывания, при высоких – квантовая эффективность. Для измерения интегральных цветов галактик Ракош и др. (1990) разработали спектрофотометр с ультрашироким разрешением (140 \AA в диапазоне 3200-7600 \AA). На входе прибора установлены два линзовых редуктора светосилы (F:15 в F:2), питающие оптоволоконные жгуты. Выходы оптоволокон на-

ходятся в фокусе вогнутой голографической решетки диаметром 108 мм, (F:2), 225 штр/мм, обеспечивающей дисперсию $200 \text{ \AA}/\text{мм}$. Спектр регистрируется матрицей ПЗС, прибор оснащен офсетным гидом. Массовое измерение красных смещений, распространившееся на телескопы умеренных диаметров с внедрением счетчиков фотонов, поддержано созданием высокоэффективного кассегреновского спектрографа 1.5-м телескопа (Фабрикант и др., 1998). При диаметре коллимированного пучка 100 мм, 1.5-секундной ширине щели, с решеткой 300 штр/мм спектральное разрешение равно 3 \AA , причем длина одновременно регистрируемого диапазона составляет 4000 \AA . Длина щели составляет 3 угл. минуты, эффективность 26%, количество регистрируемых за год спектров превосходит 10000, т.е. спектрограф заменил знаменитую Z-машину, выигрывая при этом в проникающей способности 1 зв. величину. Основным недостатком подвесных кассегреновских спектрографов является механическая нежесткость, что в каждом отдельном случае затрудняет построение системы лучевых скоростей, измеряемых на данном приборе. Мунари и Латтанци (1992) исследовали гнутия двух кассегреновских спектрографов обсерватории Асыяго, были обнаружены сдвиги, соответствующие ошибке 10-40 км/с, при ошибке кросс-корреляционной методики 0.8 км/с. Построена численная модель, позволяющая увеличить точность измерения лучевых скоростей, ошибки от ночи к ночи снижены на порядок, т.е. до 1-3 км/с.

Спектрополяриметры

Примеры спектрополяриметрических методов, применяющихся в т.ч. и на телескопах умеренных размеров, даны в обзоре Ключковой и др. (2001). Тонкие спектрополяриметрические эффекты, проявляющиеся на форме профилей спектральных линий, видны лишь при высоких S/N, т.е. доступны исследованиям на крупных телескопах. Для малых телескопов остается спектрополяриметрия с низким разрешением, когда можно исследовать эффекты в непрерывном спектре, например исследовать особенности межзвездной и околозвездной поляризации. Поэтому здесь упомянем только прибор, занимающий “нишу” между узкополосными фотополяриметрами и спектрополяриметрами умеренного разрешения – спектрополяриметр HBS (Кавабата и др., 1999), разработанный для 0.9-м телескопа. Перед линзовым дифракционным спектрографом установлен классический поляриметр, содержащий фазосдвигающие пластинки и призму Волластона, работающие в коллимированном пучке. Спектральное разрешение составляет 40–200, укажем некоторые задачи, которые можно при этом решать. Зависимости межзвездной поляризации от длины волны (Серковски и др., 1975) и околозвездной поляризации различаются. Задача их разделения основана на связи длины волны максимума поляризации с отношением общего поглощения к селективному ($R = 5.5\lambda_{\max}$). Если вблизи звезд дополнительно проявляются локальные эффекты, то $R > 3$, т.е. $\lambda_{\max} > 0.55$. Следовательно, массовая спектрополяриметрия звезд в избранном направлении, выполняемая с низким разрешением, позволяет находить околозвездные оболочки. Другим типом задач является мониторинг околозвездной поляризации. Известно, что переменная во времени широкополосная поляризация у звезд типа Т Тельца доходит до 10 %, а у Ве-звезд – до 1 %. При наблюдениях с низким спектральным разрешением поляризационные эффекты удастся отнести к отдельным спектральным участкам или деталям, например у Ве-звезд степень поляризации эмиссионного спектра ниже. С низким спектральным разрешением желателен исследовать и собственную переменную поляризацию М-сверхгигантов (до 2 %), вызванную гигантскими конвективными ячейками.

5.2.3 Оптоволоконные спектрографы

Из оптоволоконных спектрографов низких порядков дифракции отметим схему Эберта-Фасти и ее ньютоновскую модификацию (Фуренлид и Кардона, 1988; Барри и др., 2002), разработанную в рамках перспективной концепции “мультителескопного телескопа” – МТТ. Первичный фокус каждого из девяти 33- см зеркал такого телескопа соединяется со спектрографом оптоволоконном

(Багнуоло и др., 1990). Эффективная апертура МТТ эквивалентна телескопу с диаметром зеркала 1.3 м.

5.3 Спектрографы высоких порядков дифракции

Прошло уже 30 лет, как спектрографы с эшелле прочно закрепились на небольших телескопах. Причиной тому является выигрыш в спектральном разрешении, пропорциональный тангенсу угла блеска, что позволяет реализовать умеренное спектральное разрешение на достаточно компактных подвесных конструкциях.

5.3.1 Эшелле-спектрографы с фотографической регистрацией

В 60-е годы были рассмотрены двухзеркальные схемы с компенсацией комы по достаточно большому полю камеры (Копылов и Стешенко, 1965, Шредер, 1967). При этом параметры коллиматора и камеры не должны были сильно отличаться, т.е. данные решения были специфичны именно для небольших телескопов, где можно обойтись небольшим значением фактора широкощельности. В работе Панчука и др. (2003) в табл. 3 приведена сводка параметров таких спектрографов. Развитие этих систем сдерживалось трудностями оцифровки эшелле-спектров на фотографических микроденситометрах и низкой проникающей способностью (регистрировались звезды ярче 5-й величины).

5.3.2 Эшелле-спектрографы с ЭОП

Уже первый кассегреновский эшелле-спектрограф использовался на 36-дюймовом телескопе и с электроннооптическим преобразователем (Шредер и Андерсон, 1971).

5.3.3 Эшелле-спектрографы с диссектором

МакНалл и др. (1972) оснастили эшелле-спектрограф ЭОПом с диссектором. Регистрировалось 256 элементов разрешения в одном из порядков эшелле-спектра.

5.3.4 Спектрографы с электроннографическими камерами

Из-за сложности эксплуатации электронных камер в фокусе Кассегрена наибольшую эффективность в спектроскопии на средних телескопах получила камера, установленная в фокусе Кудэ 1.52-м телескопа ЕЮО. В первой половине 70-х там был смонтирован “ЕСHEL.E.C.” (эшелле-спектрограф с электронной камерой), являющийся первым универсальным спектрографом белого зрачка (Баранн и Дюше, 1972; Вестник ЕЮО, 1976а). Светоприемником служила электронная камера Лаллемана-Дюше с электростатической фокусировкой, фотокатод типа S-11, диаметром 30 мм. В моде “эшелле” дисперсия в синей области составляет $4.5 \text{ \AA}/\text{мм}$. Спектр, уширенный до 0.2 мм, получен от звезды $V=10$ за 2.5 часа. В однопорядковой моде с дисперсией $74 \text{ \AA}/\text{мм}$ за час экспозиции достигалась $V=14$. На спектрографе применялась также фотографическая регистрация, в т.ч. и через ЭОП.

5.3.5 Эшелле-спектрографы с линейками и матрицами ПЗС

Линейки типа Reticon имели шумы на порядок выше, чем у матриц ПЗС середины 80-х, поэтому успешное применение линеек связывалось с возможностью выполнения длительных экспозиций. Эффективное применение ретикона на спектрографе фокуса Кудэ 1.2-м телескопа университета Западного Онтарио (UWO) позволило развивать методы выделения составляющих уширения (вращение, макро- и микротурбуленция) профилей абсорбционных линий (Грей, 1978, 1986). Использовалась R2-эшелле 316 штр/мм, выделение одного из поряд-

ков ($m = 6 - 15$) осуществлялось интерференционными фильтрами (пропускание 85%). Камера Шмидта ($F = 559$ мм), снабженная изламывающим зеркалом, обеспечивала дисперсию $0.038 \text{ \AA}/\text{диод}$ (6250 \AA , 9-й порядок). С этими параметрами от звезды 6-й величины за час экспозиции получалось $S/N = 100$. Для удвоения числа точек на профиле спектральной линии применялось микросканирование (сдвиг положения модуля светоприемника на половину ширины 15-микронного диода перед повторной экспозицией). Удвоение числа точек на профиле линии формально облегчало разделение компонент уширения в фурье-области. В таких исследованиях необходимо учитывать уширение линии из-за нежесткости спектрографа. Кудэ-спектрограф 1.2-м телескопа UWO отличался высокой стабильностью (изменение температуры помещения не превышало градус в неделю). При длительных экспозициях линия уширяется и из-за суточного вращения Земли. Например, при наблюдениях с экватора звезды с нулевым склонением суточное вращение Земли за трехчасовую экспозицию (вблизи меридиана) уширяет линию на 0.35 км/с (на других часовых углах эффект выражен сильнее), тогда как параметры уширения линий иногда надо знать с точностью 0.1 км/с (Грей, 1986).

5.3.6 Оптоволоконные эшелле-спектрографы

Увеличение точности определения лучевых скоростей ограничено принципиальным свойством целевых спектрографов. Из-за атмосферной дисперсии положения центров монохроматических изображений звезды различаются, а вследствие остаточных недоустрировок и механических гнутостей характер заполнения оптики коллиматора зависит от ориентации телескопа. Если первая проблема решается установкой компенсатора атмосферной дисперсии, то для решения второй необходимо подать на вход спектрографа поток с постоянной угловой апертурой, с неизменным законом распределения интенсивности вдоль угла, не зависящими от качества изображений и точности сопровождения объекта. Поэтому прогресс оптоволоконной технологии быстро нашел применение в астрономической спектроскопии. Для малых телескопов немаловажным обстоятельством является возможность размещения спектрографа вне телескопа (размеры касегреновских эшелле-спектрографов сравнимы с размерами 0.5-м телескопов). В Гейдельбергском оптоволоконном спектрографе эшелле работает в главной плоскости, что уменьшает проекцию диаметра ядра волокна на матрице ПЗС (Мандель, 1988). С целью мониторинга горячих сверхгигантов южного неба спектрограф был перенесен на 0.5-м телескоп ЕЮО (Вольф и др., 1993). Оптоволоконный спектрограф, предназначенный для наблюдений в системе MUSEOS, разработали Бодра и Бем (1992). Этот прибор пригоден для наблюдений и на малых телескопах. Оптоволоконный эшелле-спектрограф CORALIE, являющийся южным усовершенствованным близнецом спектрографа ELODIE (Баранн и др., 1996), установлен на 1.2-м швейцарском телескопе и служит для поиска внесолнечных планет методом доплеровских измерений смещений центральной звезды. Большинство оптоволоконных эшелле-спектрографов используются с телескопами 1.5-3.6 м, но не следует забывать, что разработаны методы измерения лучевых скоростей по эшелле-спектрам с минимальным $S/N < 1$ (Келоз, 1995). Таким образом, измерения лучевых скоростей с оптоволоконными эшелле-спектрографами станут возможными на 0.5–0.9-м телескопах.

6 Интерференционные спектрометры

Применение интерференционных спектрометров в астрономии основано на двух моментах. В-первых, Фелжетт (1951) отметил, что если шум самого приемника преобладает, двухлучевой интерферометр более эффективен, чем монохроматор. Во-вторых, Жакино (1957) рассмотрел многолучевой интерферометр – эталон Фабри-Перо – в качестве монохроматора с высоким пропусканием. На этапе применения одноканальных приемников основной задачей являлось

выделение одного из порядков эталона.

6.1 Сканирующий ИФП с ФЭУ

Метод исследования линий в звездных спектрах путем наклона интерферометра Фабри-Перо реализовали Гик и Уилкок (1958). Использовался двухпризмный монохроматор ($25 \text{ \AA}/\text{мм}$ у $H\gamma$), установленный в ньютоновском фокусе 120-см телескопа обсерватории Асьяго. Выходящий из монохроматора пучок коллимировался ($F_{\text{coll}} = 90 \text{ мм}$) и пропускался через эталон. Роль монохроматора сводится к подавлению всех полос пропускания эталона, кроме одной. Длина волны, пропускаемая эталоном, должна меняться с постоянной скоростью, для этого эталон наклонялся при помощи кулачкового механизма (косинус угла наклона меняется со временем линейно). Одновременно на выходе монохроматора длина волны изменялась таким образом, что полоса пропускания эталона оставалась в середине полосы пропускания монохроматора. Разделитель пластин эталона толщиной 0.09 мм обеспечивал на длине волны 4471 \AA расстояние между порядками эталона 11 \AA , пропускание эталона составляло 60% . В этом первом эксперименте был получен трехкратный выигрыш (относительно монохроматора без эталона).

6.2 Многоканальные спектрографы с ИФП

Использование многоканальных систем в интерферометрических приборах высокого разрешения проиллюстрируем на двух примерах. Серковски (1978) установил ИФП на входе эшелле-спектрометра касегреновского фокуса ($F:13.5$) 1.54-м телескопа. Излучение в области $4100\text{--}4400 \text{ \AA}$ выделялось гризменным узлом предварительной дисперсии ($70 \text{ \AA}/\text{мм}$), после чего попадало в спектрометр, где регистрация восьми порядков эшелле производилась усилителем яркости и диодным массивом из 342×42 элементов (Digicon). После входной диафрагмы эшелле-спектрометра расположена кварцевая пластинка, занимающая два положения по углу наклона. Эти наклоны обеспечивают перемещение порядка ИФП на диодном массиве на место соседнего порядка. Для компенсации зависимости свободного спектрального интервала ИФП от длины волны толщина кварцевой пластинки сделана переменной вдоль направления дисперсии гризмы. Ширина полос пропускания ИФП составляет 0.06 \AA , разделение соседних порядков 0.62 \AA на 4250 \AA (что при обратной линейной дисперсии $3.4 \text{ \AA}/\text{мм}$ соответствует 5-пиксельному разделению соседних порядков ИФП, при двухпиксельном диаметре изображения последних). Вакуумная камера с ИФП наклоняется при помощи прецизионного устройства в диапазоне $\pm 1.2^\circ$, полный цикл наблюдений составляет 20 экспозиций, при этом регистрируются точки спектра, отстоящие друг от друга на 0.03 \AA . Калибровка шкалы длин волн и угла наклона интерферометра осуществляется регистрацией спектра сравнения лампы с полым катодом, а также фотодиодной регистрацией пары разведенных на 6° пучков стабилизированного He-Ne лазера. Метод наблюдений исключает влияние вариаций прозрачности атмосферы, изменений чувствительности фотокатода, качества изображений. Точность, достигнутая при 20 наклонах ИФП от звезды 6-й величины, соответствует ошибке лучевой скорости 10 м/сек .

Второе обращение к интерферометрической технике в задаче измерения доплеровских сдвигов также принадлежит сотрудникам обсерватории Аризонского университета. МакМиллан и др. (1993) разработали оптоволоконный эшелле-спектрограф с матрицей ПЗС, где ИФП работал на внутренней установке, т.е. размещался в коллимированном пучке. В спектральных порядках, перекрывающих диапазон $4250\text{--}4600 \text{ \AA}$, одновременно регистрировалось 350 порядков ИФП. На длине волны 4300 \AA ширина порядка ИФП составляет 47 м\AA при расстоянии между порядками 0.64 \AA . Доплеровские сдвиги в спектре звезды изменяют соотношение интенсивности порядков. Для простоты регистрировались только изменения скорости, т.е. прибор работал как акселерометр. Калибровка аргоновой лампой обеспечивала точность до двух стомиллионных долей (что соответствует ошибке $\pm 6 \text{ м/сек}$). Выявлены инструментальные вариации $\pm 27 \text{ м/сек}$

на шкале несколько месяцев. Прибор использовался на 90- см телескопе.

6.3 Поляризационные интерферометры

Применение интерференционных спектрометров для изучения точечных объектов на малых телескопах не ограничивается методами скрещивания с призменными или дифракционными приборами. Идея поляризационного интерферометра, содержащего два встречно движущихся кристаллических клина, расположенных между двумя поляризаторами, впервые реализована Бахшиевым в 1956 г. (см. Тарасов, 1968). Затем Мерц (1958) испытал аналогичную схему многоканального звездного спектрометра с одноканальным приемником, также основанную на интерференции лучей разной поляризации. Сначала основным элементом схемы был только компенсатор Солейля, размещенный между двумя поляризаторами. Первый поляризатор состоит из призмы Волластона и полуволновой пластинки, закрывающей только одно изображение и поворачивающей его плоскость поляризации. Это позволяет использовать обе поляризации. Измеряется разность между смещенными на полволны системами полос. Основным источником шума оказалось мерцание. Тогда в схему была добавлена пластинка из дигидрофосфата калия, которая при наложении продольного электрического поля изменяет разность хода вследствие двойного преломления. Синхронное детектирование сигнала производилось с частотой 3 кГц. Поляризационный интерферометр испытывался в касегреновском (F:18) фокусе 24-дюйм. телескопа. При малом разрешении для классификации спектров планировалось использовать непосредственно интерферограммы (наблюдения выполнялись в докомпьютерную эпоху). Серковский (1972) предложил метод изучения распределения лучевых скоростей в протяженных объектах с эмиссионными спектрами. Исследуемая спектральная линия выделяется интерференционным фильтром, затем излучение проходит поляризационный интерферометр и регистрируется панорамным светоприемником. Экспозиции выполняются для разных значений угла поворота фазосдвигающей пластинки интерферометра. Позиционный угол поляризации в каждой точке туманности может быть прокалиброван в лучевых скоростях. По сравнению с ИФП метод имеет более высокое угловое разрешение.

6.4 Спектрографы с внешним интерферометром

Для анализа спектров протяженных объектов Панчук (2000) предложил метод дважды скрещенной дисперсии, суть которого состоит в измерении односторонней системы полос ИФП, установленного перед эшелле-спектрографом. Однако интерферометр Фабри-Перо с высокой добротностью не производит синусоидальных волн, как интерферометр Майкельсона и, следовательно, преимущества фурье-анализа не могут быть использованы для точного определения сдвига фаз. Кроме того, ИФП пропускает меньше света, чем интерферометр Майкельсона. Эрскин (2003) предложил схему скрещивания интерферометра Майкельсона с дифракционным спектрографом и показал ее эффективность в задаче измерения лучевых скоростей с точностью, позволяющей фиксировать смещение барицентра Земля-Луна (амплитуда изменений 12 м/сек). По сравнению с гетеродинным голографическим спектрографом (Франдсен и др., 1993) рабочий диапазон прибора шире в десятки раз.

7 Дополнительные телескопы

Проекты создания телескопов умеренных диаметров, расположенных к экватору от башен больших телескопов (Лик 3 м – 0.6 м, ААТ 3.9 м – 0.9 м, ЕЮО 3.6 м – 1.4 м) были связаны с высокой стоимостью спектрографов фокуса Кудэ, которыми оснащались большие телескопы. В безлунные ночи, когда большой телескоп использовался с другим оборудованием, дорогостоящий кудэ-спектрограф работал с дополнительным телескопом (САТ – Coude Auxiliary Telescope).

В случае с CAT ESO ситуация даже стала противоположной – кудэ-эшелле-спектрограф 3.6-м телескопа работал только с 1.4-м зеркалом почти 18 лет (исключение составили эпизодические эксперименты с оптоволоконным сочетанием 3.6 м+CAT). Другим примером использования оборудования большого телескопа является оптоволоконное сочетание кассегреновского эшелле-спектрографа, находящегося в безлунные ночи на полу башни 4-м телескопа СТЮ, с фокусом Кассегрена 1.5 м СТЮ, башня которого находится неподалеку. Эти примеры относятся к проблеме аппаратного оснащения малых телескопов косвенно, через технические особенности сочетания приборов с телескопами и создания систем удаленных наблюдений (значительную часть времени CAT ESO работал в режиме удаленного доступа, когда наблюдатель находился в Мюнхене или в Триесте).

8 Автоматические телескопы

В эпоху создания первых автоматических фотометрических телескопов (АРТ) основной проблемой являлось позиционирование изображения звезды на диафрагму электрофотометра (Бойд и др., 1985). Из-за этого каждую ночь малые АРТ выполняли около 25 тыс. движений. Небольшая масса телескопа здесь являлась преимуществом, т.к. маленькая инерционность позволяла экономить время позиционирования. Верхним пределом в задаче создания телескопа-робота считался 1-м телескоп.

Современная проблема создания телескопов-роботов в большинстве случаев сводится к разработке систем управления и контроля телескопа, созданию сетевого доступа, развитию инфраструктуры автоматической обсерватории, включающей системы контроля состояния атмосферы, дозаправки криостатов, систем безопасности телескопа и т.д. (см., например Хонейкат и др. (1994). Немиров и Раферт (1999) рассмотрели задачу регистрации всего неба с пределом около 15-й звездной величины каждую ясную ночь. Используя различные модели плотности источников данной звездной величины в функции галактической широты, авторы определили минимальное количество наведений телескопа при расходе 25 пикселей на изображение каждой звезды. Затем был оценен минимальный суточный объем данных. Расчеты сделаны для разных предположений об апертурах и числе телескопов, собирающих ежесуточно несколько гигабайт информации. Используя закон Мура об 1.7-кратном ежегодном увеличении технических возможностей хранения данных, авторы оценивают, что к 2010 г. такие наблюдения станут возможными до уровня 20-й звездной величины. Подчеркнем, что минимальная апертура телескопа в данной работе оценивалась формально, из условия выделения изображения каждой звезды, а не из предельной проникающей способности.

Иначе обстоит дело с задачей автоматических спектроскопических наблюдений. Понятно, что малые телескопы пригодны только для бесцелевых многообъектных спектроскопических обзоров (эффективное применение оптоволоконных многообъектных методов начинается с диаметра телескопа 2.5 м). При увеличении спектрального разрешения проникающая способность бесцелевой спектроскопии ограничивается фоном неба. Для относительно ярких объектов (12–13 зв. вел.) здесь перспективными остаются оптические схемы Эпштейна (1967) и Фуренлида (1984). Отвлекаясь от идеи тотальной спектроскопии, задачу можно принципиально упростить, рассматривая возможность сочетания широкоугольного фотометрического телескопа-робота с телескопом, оснащенным автоматическим целевым спектрографом. Такой спектроскопический телескоп метрового класса может служить в качестве промежуточного звена между фотометрическими обзорами и спектроскопией интересных объектов на крупных телескопах. Соответствующие технические решения известны (Фабрикант и др., 1998).

Третьим направлением в создании небольших автоматических телескопов можно считать учебные инструменты. В отличие от специализированных телескопов-роботов, такие телескопы должны иметь несколько вариантов наблюдений. Удачным примером является 75-см альтази-

мутальный телескоп (Изобе и др., 1986). В первичном фокусе механизм “флип/флоп” переключает камеру прямого зрения и гиперболу. Один из фокусов Нэсмита оставлен для визуальных наблюдений, во втором размещены три прибора: SIT-камера прямого зрения (отслеживающая вращение поля), фотометр и спектрограф (обеспечивающий дисперсии 20 и 200 Å/мм).

9 Перспективы

Оценку перспектив оснащения малых телескопов новой светоприемной аппаратурой следует проводить с учетом технологического прогресса, с учетом появления задач, методически оптимально адаптированных для малых телескопов, с учетом влияния эффектов урбанизации на условия работы пригородных университетских обсерваторий, с учетом эволюции условий научной работы астронома-наблюдателя.

9.1 Влияние технологии

Внедрение матриц ПЗС с низким шумом считывания может повлиять как на конструкции спектральных приборов малых телескопов, так и на конструкции собственно телескопов. Низкий шум считывания означает, что в ряде задач изображения, полученные одновременно на идентичных приборах, можно суммировать. Представим, например, многозеркальный телескоп с оптоволоконной передачей из прямых фокусов каждого зеркала в общий спектрограф. Относительные отверстия этих зеркал могут быть высокими, что: а) облегчит относительную настройку зеркал и позиционирование звезды на оптические волокна, б) обеспечит условие меньшей деградации апертуры в оптоволокне, в) сделает телескоп компактным (длина может оказаться меньше диаметра). Применение высокоэффективных покрытий на малых телескопах может распространиться и на основную оптику, что эквивалентно увеличению площади зеркала на 10-30%. Внедрение матриц ПЗС с быстрым считыванием расширит возможности фотометрии и спектроскопии быстропеременных объектов. Развитие микрооптики может оказать влияние на конструкции спектральной и фотометрической аппаратуры телескопов с малым масштабом изображения. Использование голографических решеток с объемным фазированием (VRH), во-первых, позволит улучшить параметры уже существующих спектрографов (концентрация энергии в максимуме VRH превышает 90%), во-вторых, создать светофильтры с заданной концентрацией энергии. С мультиплексными VRH-решетками можно создавать эффективные спектральные системы, в которых различные спектральные области дифрагированы в одном направлении. Оценки астрономических применений VRH-решеток можно найти в обзоре Барден и др., (1998). Важное значение при создании телескопов-роботов имеет внедрение новых высокоточных датчиков координат, развитие программного и сетевого обеспечения.

9.2 Методы наблюдений

Укажем некоторые методы, представляющиеся нам достаточно перспективными.

1. “Тотальная” фотометрия. Обнаружение новых или редко повторяющихся астрономических явлений.

2. Скоростная широкополосная фотометрия. Например, исследование спектра нерадиальных звездных пульсаций в сети WET как способ проверки и совершенствования теории внутреннего строения звезд.

3. Фотометрия “быстрого реагирования” – развитие системы телескопов, реагирующих на редкие астрономические явления (вспышки рентгеновских и гамма-источников, вспышки Новых и Сверхновых).

4. Инфракрасные телескопы-роботы. Опыт эксплуатации и совершенствование систем автоматических телескопов оптического диапазона позволит обратиться к задаче создания автома-

тических телескопов для фотометрии в среднем ИК-диапазоне, устанавливаемых на высотах более 4 км, где работа наблюдателя физиологически затруднена.

5. Среднеполосные фотометрические обзоры. Необходимость продолжения таких обзоров сохраняется, хотя бы из-за существования переменных звезд. Новые технические возможности позволяют конструировать многоканальные системы сверхнизкого разрешения, позволяющие затем методами численного моделирования подбирать фотометрическую систему, оптимизированную для решения конкретной задачи.

6. Спектрополяриметрия с низким и средним разрешением. Низкое разрешение необходимо для разделения составляющих поляризации, формирующихся в межзвездной среде и в околозвездных оболочках. Спектрополяриметрия со средним разрешением является единственным средством, позволяющим на малом телескопе “заглянуть” под дифракционный предел. Такие спектрополяриметрические наблюдения околозвездных оболочек должны поддерживаться численным моделированием эффектов переноса излучения через газопылевую среду низкой симметрии. Здесь важным является и длительный спектрополяриметрический мониторинг избранных объектов.

7. Измерение лучевых скоростей. Достигнутые и ожидаемые успехи орбитальной астрометрии в области определения собственных движений звезд, заставляют заботиться о повышении точности измерения движений по другой координате – определения лучевой скорости. Темп накопления информации здесь значительно более низкий, чем в современной астрометрии. Более того, лучевые скорости переменных звезд следует определять многократно. Перспективным может оказаться сочетание измерений лучевой скорости М-сверхгигантов с поляризационными наблюдениями гигантских конвективных элементов. Дальнейшее совершенствование методов акселерометрии сделает телескопы метрового класса основными рабочими инструментами в задаче накопления статистики по параметрам внесолнечных планетных систем. Заметим, что требования к оптике телескопа, работающего с оптоволоконным входом на главной оси, понижены (поле хороших изображений может быть минимальным).

В задачах с пониженными требованиями к точности определения лучевых скоростей (десятки м/сек), продуктивной может оказаться концепция МГТ, т.е. один спектрограф, соединенный оптическими волокнами (без скрамблеров – перемешивателей апертур) с несколькими зеркалами, сопровождающими объект на общей монтировке.

9.3 Эффекты урбанизации

Хорошо известно, что рост как площади городов, так и их освещенности, привел к прекращению фотометрических программ на близко расположенных обсерваториях. Бесцелевая спектроскопия также оказалась в затруднительном положении. Щелевая (или оптоволоконная) спектроскопия является одной из немногих возможных задач, выполнимых в черте города. С другой стороны, обсерватории, расположенные вблизи крупных городов, находятся в лучших условиях по привлечению высококвалифицированных инженеров и молодежи со “свежим” образованием, т.е. могут стать центрами разработки новых астрофизических методов, в т.ч. и для телескопов, расположенных в удаленных местах с хорошим астроклиматом.

9.4 Изменение характера труда

“Если вы желаете стать бессмертным – наблюдайте минимум и опубликуйте момент”. Эта ирония одного из астрономов-наблюдателей уже устаревает – все меньше желающих коротать ночь на малом телескопе с электрофотометром. С другой стороны, в практике спектроскопии с высоким разрешением на 6-м телескопе БТА встречаются случаи, когда об объекте, для которого получен спектр, литературный поиск дает ноль публикаций, т.е. для объекта нет даже приличной широкополосной фотометрии.

В эпоху фотографической спектроскопии основные трудозатраты астронома сводились к наблюдениям с низкой квантовой эффективностью и длительной кропотливой ручной обработке спектрограмм. Это, в свою очередь, завершалось относительно небольшим числом спектроскопических публикаций. Каждый ведущий спектроскопист знал всю литературу по своему направлению исследований. На протяжении жизни современного астронома количество литературы, публикуемой по любому из направлений, проэволюционировало от досконально известного до необозримого. Однако такой рост объясняется не повышением производительности труда каждого спектроскописта, а увеличением числа работающих телескопов и астрономов. Рост числа публикаций означает, что доля времени, затрачиваемого астрономом на изучение литературы, должна возрасти (хотя далеко не все публикации свидетельствуют об анализе основной литературы по вопросу). Такой рост возможен только за счет сокращения времени на подготовку аппаратуры, выполнение наблюдений, последующую обработку и анализ. Известное развитие технологии увеличило информативность наблюдений в целом на два-четыре порядка, но не сократило трудозатраты на “сервисные функции”, сохранившиеся за наблюдателем. На малых телескопах количество новой информации, которое астроном может “высидеть” за ночь наблюдений, еще сильнее контрастирует с тем объемом информации, которую можно за это время изучить по публикациям. В этом, как нам кажется, основные корни низкой престижности наблюдений вообще и наблюдений на малых телескопах в особенности. Кроме того, при относительно небольшом количестве зарегистрированных фотонов, исследуемые эффекты проявляются на малых телескопах слабее, и в среднем требуют более детальной аргументации (имеешь меньше света – затрачивай больше логики). Режим удаленных наблюдений, как и наблюдения на телескопах-роботах, пока являются экзотическими исключениями, к которым можно стремиться, и сегодня удаленные наблюдения не определяют характер труда большинства астрономов. На больших зарубежных телескопах выход из положения найден – наблюдения выполняются небольшим числом профессионалов, для которых этот вид деятельности официально признан основным (знания литературы по наблюдаемому объекту от них не требуют). На малых телескопах такой роскоши нет, и здесь есть два способа сокращения технологических трудозатрат астронома-наблюдателя – не наблюдать лично, доверяя этот процесс коллегам, или совершенствовать технику наблюдений, уделяя основное внимание повышению эффективности аппаратуры. Кто-то должен идти по второму пути, и для него подготовлен этот обзор.

Выводы

Перечислены основные типы аппаратуры телескопов малых и умеренных диаметров, избранные конструктивные решения рассмотрены чуть детальней. Считаем, что аппаратурное оснащение таких телескопов имеет большие резервы, состоящие в т.ч. и в сочетании давно известных решений с новыми технологическими возможностями. Оцениваются некоторые перспективы развития данного аппаратурно-методического направления. Приведен список литературы, позволяющей глубже познакомиться с проблемой.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федеральной программой “Астрономия”, программой Отделения физических наук РАН “Протяженные объекты во Вселенной”. Работа В. Панчука поддержана РФФИ (проект 03-07-90045). Авторы признательны Н.С.Таволжанской за обработку текста.

Список литературы

- Аппенцеллер (Appenzeller I.), 1967, Publ. Astr. Soc. Pacific, **79**, № 467, 136
- Багнуоло и др. (Bagnuolo W.G., Furenlid I.K., Gies D.R., Barry D.J.), 1990, Publ. Astr. Soc. Pacific, **102**, 604
- Баранн и Дюше (Baranne A., Duchesne M.), 1972, In “Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes”, Proc. ESO/CERN Conf. Geneva, May 2-5, 1972. Eds. S. Lautsen, A. Reiz. p.241
- Баранн и др. (Baranne A., Mayor M., Poncet J.L.), 1979, Vistas in Astronomy, **23**, 279
- Баранн и др. (Baranne A., Queloz D., Mayor M., Adrianzyk G., Knispel G., Kohler D., Lacroix D., Meunier J.-P., Rimbaud G., Vin A.), 1996, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **119**, 373
- Барвиг и Шоембс (Barwig H, Schoembs R), 1986, In “Instrumentation and research programmes for small telescopes”, ed. by J.B.Hearnshaw and P.L.Cottrell, IAU Symp. № 118, p.61 D.Reidel, Dordrecht.
- Барден и др. (Barden S.C., Arns J.A., Colburn W.S.), 1998, Proc. SPIE, **3355**, 866
- Барри и др. (Barry D.J, Bagnuolo W.G.Jr., Riddle R.L.), 2002, Publ. Astr. Soc. Pacific, **114**, 198
- Бергштраль (Bergstrahl J.T.), 1970, Publ. Astr. Soc. Pacific, v.82, № 487, 666
- Биверс и Иттер (Beavers W.I., Eitter J.J.), 1977, Publ. Astr. Soc. Pacific, **89**, 733
- Биверс и Иттер (Beavers W.I., Eitter J.J.), 1986, In “Instrumentation and research programmes for small telescopes”, ed. by J.B.Hearnshaw and P.L.Cottrell, IAU Symp. № 118, p.75, D.Reidel, Dordrecht.
- Биверс и др. (Beavers W.I., Eitter J.J., Carr P.H., Cook B.C.), 1980, Astrophys. J., **238**, 349
- Бодра и Бем (Baudrand J., Böhm T.), 1992, Astron. Astrophys., **259**, 711
- Бойд и др. (Boyd L.J., Genet R.M., Hall D.S.), 1985, Sky & Telescope, p.16
- Бойс и др. (Boyce P.B., White N.M., Albrecht R., Slettebak A.), 1973, Publ. Astr. Soc. Pacific, **85**, 91
- Бреггер (Breger M.), 1986, In “Instrumentation and research programmes for small telescopes”, ed. by J.B.Hearnshaw and P.L.Cottrell, IAU Symp. № 118, p.149. D.Reidel, Dordrecht.
- Вальравен и Вальравен (Walraven Th., Walraven J.H.), 1960, BAN, **15**, 60
- Вестник ЕЮО (ESO Messenger), 1976a, № 5, June 1976, 3
- Вестник ЕЮО (ESO Messenger), 1976b, № 7, 10
- Вестник ЕЮО (ESO Messenger), 1977, № 9, 12
- Вестник ЕЮО (ESO Messenger), 1979, № 17, 29
- Вестник ЕЮО (ESO Messenger), 1981, № 25, 6
- Вилсон (Wilson O.C.), 1956, Publ. Astr. Soc. Pacific, v.68, № 403, 346
- Вольф и др. (Wolf B., Mandel H., Stahl O., Kaufer A., Szeifert Th., Gäng Th., Gummersbach C.A., Kovacs J.), 1993, ESO Messenger, № 74, 19
- Вуд (Wood H.J.), 1968, Publ. Astr. Soc. Pacific, v.80, № 477, 647
- Герелс (Gehrels T.), 1986, In “Instrumentation and research programmes for small telescopes”, ed. by J.B.Hearnshaw and P.L.Cottrell, IAU Symp. № 118, p.285. D.Reidel, Dordrecht
- Гизекинг (Giesekeing F.), 1979, Sky & Telescope, **57**, 142
- Гик и Уилкок (Geake J.E., Wilcock W.L.), 1956, Mon. Not. R. Astron. Soc., **116**, 561
- Гик и Уилкок (Geake J.E., Wilcock W.L.), 1958, Journal de Physique et le Radium, v.19, № 3, 346
- Грей (Gray D.F.), 1978, In “High Resolution Spectrometry” (Proc. of the 4-th Colloq. on Astrophys. held in Trieste, July 3-7, 1978), ed. by M.Hack, p.268. Osservatorio Astronomico di Trieste.
- Грей (Gray D.F.), 1986, In “Instrumentation and research programmes for small telescopes”, ed. by J.B.Hearnshaw and P.L.Cottrell, IAU Symp. № 118, p.401. D.Reidel, Dordrecht.
- Гриффин (Griffin R.F.), 1967, Astrophys. J., **148**, 465
- Гриффин (Griffin R.F.), 1969, Mon. Not. R. Astron. Soc., **145**, 163
- Денби и др. (Denby B., Dalglish R., Meadows V., Taylor K.N.R.), 1986, In “Instrumentation and research programmes for small telescopes”, ed. by J.B.Hearnshaw and P.L.Cottrell, IAU Symp. № 118, p.439. D.Reidel, Dordrecht.
- Есипов В.Ф., 1960, Астрон. ж., **37**, 588
- Есипов В.Ф., 1963, В сб. “Новая техника в астрономии”, вып.1, с.165
- Жакино (Jacquinot P.), 1957, J. Opt. Soc. Amer., **44**, 761
- Жакино и Дюфо (Jacquinot P., Dufour C.), 1948, J. Rech. Cent. Nat. Rech. Sci., Labs. Bellevue (Paris), **6**, 91
- Изобе и др. (Isobe S., Shinohara N., Agata H.), 1986, In “Instrumentation and research programmes for small telescopes”, ed. by J.B.Hearnshaw and P.L.Cottrell, IAU Symp. № 118, p.93. D.Reidel, Dordrecht
- Кавабата и др. (Kawabata K.S., Okasaki A., Akitava H., Hirakata N., Hirata R., Ikeda Y., Kondon M.,

- Masuda S., Seki M.), 1999, Publ. Astr. Soc. Pacific, **111**, 898
- Калининков Н.Д., Харитонов А.В., 1967, Труды АФИ АН КазССР, **8**, 128
- Келоз (Queloz D.), 1995, in "New Developments in Array Technology and Applications", A. G. D. Davis Philip et al. (eds.), p.221. IAU, Netherlands.
- Клейнман и др. (Kleinman S.J., Nather R.E., Phillips T.), 1996, Publ. Astr. Soc. Pacific, **108**, 356
- Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Романенко В.П., 2001, Препринт Спец. Астрофиз. Обсерв., № 156.
- Комаров Н.С., Позигун Н.С., 1968, Астрон. ж., **45**, 133
- Копылов И.М., 1954, Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв., **11**, 44
- Копылов И.М., Стещенко Н.В. 1965, Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв., **33**, 308
- Куртес (Courtes G.), 1958, Journal de Physique et le Radium, **19**, № 3, 342
- Леметр (Lemaitre G.), 1981, in "Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes", Proc. of the IAU Coll. № 67, Zelenchukskaya, 8-10 Sept. 1981, p.137
- Леметр (Lemaitre G.), 1983, in "Astronomy with Schmidt-type Telescopes", Proc. of the IAU Coll. № 78, Asiago, Aug.30-Sept.2, 1983, p.533
- Лиллер (Liller W.), 1963, Appl. Opt., **2**, 187
- Линник В.П., 1963, В сб. "Новая техника в астрономии", вып.1, с.176.
- МакДэвид (McDavid D.A.), 1986, In "Instrumentation and research programmes for small telescopes", ed. by J.V.Hearnshaw and P.L.Cottrell, IAU Symp. № 118, p.457. D.Reidel, Dordrecht.
- МакМиллан и др. (McMillan R.S., Moore T., Perry M.L., Smith P.H.), 1993, Astrophys. J., **403**, 801
- МакНалл и др. (McNall J.F., Michalski D.E, Miedaner T.L.), 1972, Publ. Astr. Soc. Pacific, **84**, № 497, 145
- Мандель (Mandel H.), 1988, in "The Impact of Very High S/N Spectroscopy on Stellar Physics. G.Caurel de Strobel and. M.Spite (eds.), p.9.
- Маргон и др. (Margon B., Ford H.C., Katz J.I, Kwitter K.B., Ulrich R.G., Stone R.P.S., Klemola A.), 1979, Astrophys. J., **230**, L41
- Мельников О.А., Купревич Н.Ф., 1956, Астрон. ж., **33**, 845
- Мерц (L.Mertz), 1958, Journal de Physique et le Radium, **19**, № 3, 233
- Минг Хи Тай и др. (Ming Hing Tai, Briotta D.A., Jr., Kamath N.S., Harwit M., 1975, Appl. Opt., **14**, 2533
- Мохнацки и др. (Mochnacki S.W., Chew S., Kunowski W., Hawker F., Kamper K., Blyth D., Zerafa L., Platzner A.), 1986, In "Instrumentation and research programmes for small telescopes", ed. by J.V.Hearnshaw and P.L.Cottrell, IAU Symp. № 118, p.461. D.Reidel, Dordrecht.
- Мунари и Латтанци (Munari U., Lattanzi M.G.), 1992, Publ. Astr. Soc. Pacific, **104**, 121
- Мэйсел (Meinel A.B.), 1953, Astrophys. J., **118**, 335
- Мэйсел (Meinel A.B.), 1956, Astrophys. J., **124**, 652
- Намиока (Namioka T.), 1958, JOSA, **49**, 951
- Немиров и Раферт (Nemiroff R.J., Rafert B.), 1999, Publ. Astr. Soc. Pacific, **111**, 886
- Нильсен (Nielsen R.F.), 1983, Rep. Inst. Theor. Astrophyz. Oslo,
- Нильсен (Nielsen R.F.), 1983, Rep. Inst. Theor. Astrophyz. Oslo, № 59
- Оук (Оке J.B.), 1969, Publ. Astr. Soc. Pacific, **81**, 11
- Панчук В.Е., 2000, Препринт Спец. Астрофиз. Обсерв., № 144
- Панчук В.Е., Алиев А.Н., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., 2003, Препринт Спец. Астрофиз. Обсерв., № 192
- Пикельнер С.Б., 1954, Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв., **11**, 8
- Пиккеринг (Pickering E.C.), 1896, Astr. Nachr., **142**, 105
- Ракош и др. (Rakos K.D., Weiss W.W., Muller S., Pressberger R., Wachtler P., Schombert J.M., Kreidl T.J.), 1990, Publ. Astr. Soc. Pacific, **102**, 674
- Ричардсон (Richardson E.H.), 1968, JRAS Canada, **62**, 313
- Ричардсон и Брэли (Richardson E.H., Brealey G.A.), 1973, J. Roy. Astron. Soc. Canada, **67**, 165
- Роджерс и др. (Rodgers A.W., Roberts R., Rudge P.T., Stapinski T.), 1973, Publ. Astr. Soc. Pacific, **85**, 268
- Серковски (Serkowski K.), 1972, Publ. Astr. Soc. Pacific, **84**, 649
- Серковски (Serkowski K.), 1978, In "High Resolution Spectrometry" (Proc. of the 4-th Colloq. on Astrophys. held in Trieste, July 3-7, 1978), ed. by M.Hack, p.245. Osservatorio Astronomico di Trieste
- Серковски и др. (Serkowski K., Mathewson D.S., Ford V.), 1975, Astrophys. J., **196**, 261
- Слоан и др. (Sloane N.J.A., Fine T., Phillips P.G., Harvit M.O.), 1969, Appl. Opt., **8**, 2103
- Струве (Struve O.), 1937, Astrophys. J., **86**, 613
- Струве и др. (Struve O., Van Biesbroeck G., Elvey C.T.), 1938, Astrophys. J., **87**, 559
- Тарасов К.Н., 1968, Спектральные приборы. "Машиностроение", Л.

- Трефферс (Treffers R.), 1981, Publ. Astr. Soc. Pacific, **93**, 247
- Уорнер (Warner B.), 1986, In "Instrumentation and research programmes for small telescopes", ed. by J.V.Hearnshaw and P.L.Cottrell, IAU Symp. № 118, p.3. D.Reidel, Dordrecht.
- Фабри и Бюиссон (Fabry C., Buisson H.), 1911, Astrophys. J., **33**, 406
- Фабрикант и др. (Fabricant D., Cheimets P., Caldwell N., Geary J.), 1998, Publ. Astr. Soc. Pacific, **110**, 79
- Фелжетт (Fellgett P.), 1951, These de l'Universite de Cambridge.
- Ференбах (Fehrenbach Ch.), 1947, Ann. d'Astrophys., **10**, 257
- Флетчер и др. (Fletcher J.M., Harris H.C, McClure R.), 1982, Publ. Astr. Soc. Pacific, **94**, 1017
- Франсен и др. (Frandsen S., Douglas N., Butcher H.), 1993, Astron. Astrophys., **279**, 310
- Фуренлид (Furenlid I.), 1984, Publ. Astr. Soc. Pacific, **96**, 325
- Фуренлид и Кардона (Furenlid I., Cardona O.), 1988, Publ. Astr. Soc. Pacific, **100**, 1001
- Харвит (Harwit M.), 1971, Appl. Opt., **10**, 1415
- Харитонов А.В., Ключкова В.Г., 1972, Изв. Спец. Астрофиз. Обсерв., **3**, 91
- Харт и др. (Hart J., van Harmelen J., Hovey G. et al.), 1996, Publ. Astr. Soc. Pacific, **108**, 220
- Хилтнер и Коуд (Hiltner W.A., Code A.D.), 1950, J Opt. Soc. Amer., **40**, 149
- Хилтнер и Шилд (Hiltner W.A., Schild R.), 1965, Sky & Telescope, **30**, 144
- Хоаг и Шредер (Hoag A.A., Schroeder D.J.), 1970, Publ. Astr. Soc. Pacific, **82**, 1141
- Хонейкат и др. (Honeycutt R.K., Adams B.R., Swearingen D.J., Kopp W.R.), 1994, Publ. Astr. Soc. Pacific, **106**, 670
- Шайн Г.А., Газе В.Ф., 1950, Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв., **6**, 3
- Шектман (Schechtman S.), 1984, SPIE Proc., **445**, 128
- Шектман и Хилтнер (Schechtman S.A., Hiltner W.A.), 1976, Publ. Astr. Soc. Pacific, **88**, 960
- Шефер (Schaefer B.), 1990, Publ. Astr. Soc. Pacific, **102**, 212
- Шредер и Андерсон (Schroeder D.J., Anderson C.M.), 1971, Publ. Astr. Soc. Pacific, **83**, № 494, 438
- Щеглов П.В., 1960, Астрон. ж., **37**, 586
- Щеглов П.В., 1963, В сб. "Новая техника в астрономии", вып. 1, с.156
- Эдвин (Edvin R.P.), 1989, The Observatory, **109**, № 1092, 173
- Эпштейн (Epstein L.), 1967, Publ. Astr. Soc. Pacific, **79**, № 467, p.132.
- Эрскин (Erskine D.J.), 2003, Publ. Astr. Soc. Pacific, **115**, 255