

УДК 520.84; 520.2

ТЕХНИКА СПЕКТРОСКОПИИ ЗВЕЗД НА ТЕЛЕСКОПАХ МАЛЫХ И УМЕРЕННЫХ ДИАМЕТРОВ

© 2021 В. Е. Панчук^{1,2*}, В. Г. Ключкова¹, Э. В. Емельянов¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017 Россия

Поступила в редакцию 22 января 2021 года; после доработки 29 января 2021 года; принята к публикации 29 января 2021 года

Кратко изложена история технических решений, направленных на повышение эффективности спектроскопии на телескопах малых и умеренных диаметров. Оцениваются современное состояние методов спектроскопии звезд и некоторые перспективы.

Ключевые слова: *методика: спектроскопическая — телескопы*

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к телескопам малых и умеренных диаметров связан с появлением методов использования светоприемников новых типов. Так, результаты первой революции в технике регистрации слабых сигналов (середина XX века) послужили основанием для тематики симпозиума 1956 года (Wood 1958) (русское издание, дополненное работами, представлявшимися перспективными, см. в Scheglov (1960)). Следующее обращение к теме, на уровне симпозиума IAU, состоялось в 1986 году (Hearnshaw et al. 1987), когда подводились итоги применения одноканальных приемников и уже ощущались перспективы применения многоканальных твердотельных приемников. Если в середине века инструменты диаметром от 0.3 до 1 м определялись как телескопы умеренного размера, то 30 лет спустя телескопы диаметром до 1 м включительно уже классифицировались как малые. Краткий обзор типов аппаратуры телескопов малых и умеренных размеров был сделан Panchuk et al. (2004), а в 2015 году в САО РАН была проведена международная конференция «Настоящее и будущее малых и средних телескопов»¹.

Рассматривая ниже технику спектроскопии звезд на телескопах малых и умеренных диаметров, ограничимся интервалом диаметров $D \sim [0.25; 1.22]$ м. В исключительных случаях, когда речь идет о новых методических достижениях, мы упоминаем работы, выполненные на телескопах $D \sim 1.5$ м. В отличие от работы Panchuk et al.

(2004), здесь мы не упоминаем о технике фотометрии на телескопах малого диаметра. Эти работы давно сформировались в отдельное направление.

Вначале приведем общие соображения относительно телескопов малых и умеренных размеров, частично отмеченные ранее Panchuk et al. (2004). Преимущества и особенности эксплуатации телескопов малых и умеренных размеров можно условно разделить на технические, финансовые, организационные, научные и психологические.

1. Технические:

- Практически все большие телескопы являются многопрограммными и их трудно оптимизировать для решения отдельных задач, в отличие от малых телескопов. Классическим примером является рефлектор DAO ($D = 1.22$ м), используемый для задач фотографической спектроскопии в фокусе кудэ (coudé): спектрограф этого телескопа (Richardson 1968) по проникающей способности превосходил кудэ-спектрограф телескопа Хэйла ($D = 5$ м) (Bowen 1952).
- В спектроскопии высокого разрешения, выполняемой на средних и больших телескопах, из-за потерь на входной щели выигрыш в проникающей способности пропорционален не квадрату, как у малых телескопов, а первой степени диаметра зеркала.

- Малые телескопы легче поддаются автоматизации.

2. Финансовые:

- Если малый телескоп оснащен только одним видом аппаратуры, то гарантируется более полное ее использование. Стоимость одного на-

*E-mail: panchuk@ya.ru

¹<https://www.sao.ru/hq/lon/ConfSite/program-ru.html>

блюдения, определяемая не только стоимостью эксплуатации, но и стоимостью используемой навесной аппаратуры, снижается.

- Если малый телескоп имеет узкую специализацию (один вид аппаратуры на темные ночи и один — на светлые), то расходы на смену аппаратуры невелики.
- Общая техническая поддержка малого телескопа обходится дешевле.
- Современная зависимость стоимости телескопа от диаметра главного зеркала показывает резкий скачок на диаметре 1.2 м (Swift et al. 2015). Если стоимость телескопов «любительского» класса пропорциональна диаметру, то стоимость профессиональных телескопов (начиная с $D \sim 1.2$ м) пропорциональна площади зеркала.

3. Организационные:

- На малых телескопах легче получить время для повторения наблюдений, что бывает необходимо при проверке некоторых результатов.
- Аппаратура в стадии отладки и подготовки может дольше находиться на малом телескопе, чем на телескопе большого диаметра.
- Наблюдения на малых телескопах легче организовать, так как в большинстве случаев достаточно одного наблюдателя.
- Выход оборудования из строя на малом телескопе не расценивается как безвозвратная потеря времени, а выполняемая в таких случаях замена аппаратуры в большинстве случаев менее формализована.

4. Научные:

- Облачность может «выключить» сразу группу больших телескопов, расположенных 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 и кратковременных явлениях).
- Ряд научных задач предполагает непрерывный мониторинг объекта при помощи телескопов, рассредоточенных по долготе (на крупных многопрограммных телескопах такой мониторинг организовать практически невозможно).
- На малых телескопах доступно больше времени для продолжения исследования, что важно при исследовании спектральной переменности или при выполнении массовых спектроскопических обзоров. Эффективность этих инструментов даже возрастает по мере того, как часть

упомянутых телескопов переходит в категорию монопрограммных.

- Существует точка зрения (Wagner 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. Известны и другие наукометрические оценки (Abt 2012).
- Несколько новых феноменов было обнаружено именно на малых телескопах. Расширение Крабовидной туманности измерено на телескопе $D = 0.91$ м (Mayall 1937). На этом же инструменте открыто вращение туманности M 31 (Babcock 1939). Круговая поляризация у белых карликов, впервые измеренная на телескопе $D = 0.61$ м (Kemp et al. 1970), впоследствии изучалась на более крупных инструментах (Angel and Landstreet 1971). Массовые фотоэлектрические измерения лучевых скоростей, послужившие, в частности, основой для составления программ доплеровского поиска маломассивных спутников, были выполнены на телескопах метрового класса (Fletcher et al. 1982, Griffin 1967, Mayor 1986). Первые фотометрические исследования нерадиальных пульсаций выполнены на телескопах $D = [0.6; 0.9]$ м (Kurtz 1982). Исследования оптических эффектов, сопровождающих вспышки в коротковолновых диапазонах, выполняются на телескопах еще более скромных размеров. Некоторые эффекты, обнаруженные на крупных телескопах, затем детально исследовались на малых. Линейная поляризация, обнаруженная на телескопе $D = 2.08$ м у четырех звезд (Hiltner 1949), детально исследована на телескопе $D = 1.02$ м для 175 звезд (Hall 1949). Затем, в течение 1.5 лет, был выполнен высокоточный фотополяриметрический обзор для 841 звезды (Hiltner 1951).
- Отдельный аргумент касается собственно спектроскопии на малых телескопах. Из-за возрастающего фона ночного неба в обсерваториях, основанных в XIX–XX вв., доля спектроскопических работ с высоким и средним спектральным разрешением будет возрастать. Транспортировать малые (как правило, фотометрические) телескопы в места, удаленные от мегаполисов, и затем эксплуатировать их сейчас нецелесообразно. Если в 1960–1970-х годах инструментальный парк Европейской южной обсерватории (ЕЮО) в значительной степени состоял из таких телескопов, то к концу века эти инструменты, перешедшие в разряд средних и малых, были сняты с бюджета

международной организации и снова эксплуатируются за счет национальных владельцев. Такие телескопы могут оказаться пригодными для спектроскопических работ.

5. Психологические:

- В любой отрасли науки существуют продуктивные специалисты, для которых научное творчество в значительной мере окрашено индивидуализмом. Однако выполнение технически сложных экспериментов на больших телескопах является коллективным. Наличие малых телескопов в известной мере решает психологические проблемы тех исследователей, для которых индивидуализм процесса астрономических наблюдений не является второстепенным аргументом.
- Для многих астрономов-наблюдателей существенным фактором является приоритет выполнения самостоятельного (иногда первого) наблюдения данного объекта (явления), по сравнению с исследованием по архивным данным.
- Малые телескопы лучше подходят для целей образования. Здесь главным обучающим фактором является возможность влиять на процесс наблюдения (существует множество учебных телескопов с удаленным управлением). Малые телескопы не развиваются независимо от больших, так как прогресс в использовании малых телескопов обязан исключительно прогрессу в технике регистрации сигнала, а также появлению принципиально новых оптических методов. Новые технологии появлялись 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, а в пределах типа — по особенностям конструктивных решений.

2. СПЕКТРОГРАФЫ С ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ

Большинство технических решений по конструкции звездных спектрографов было реализовано еще в эпоху фотографической регистрации спектров. Некоторые спектрографы затем

переоснащались приемниками нового типа. Более того, увеличение формата матриц ПЗС позволяет вновь обратиться к некоторым оправдавшим себя классическим схемам.

2.1. Призмные спектрографы

К достоинствам призмных схем относится концентрация спектра в единственной полоске, к недостаткам — зависимость параметров спектра от температуры (причем более высокая, чем у дифракционного спектрографа). Ограничивающим фактором является также размер блока стекла, в объеме которого соблюдаются высокие требования по однородности.

2.1.1. Бесщелевые призмные спектрографы

Еще при создании Гарвардской классификации была продемонстрирована роль относительного отверстия объектива спектрографа: на телескопе Vache ($D = 0.2$ м, 1 : 5.6) (Pickering 1891) с предобъективной призмой (или системой призм) были получены спектры звезд, недоступных щелевым призмным спектрографам более крупных телескопов с меньшим относительным отверстием.

Для классификации спектров по участкам вблизи предела бальмеровской серии водорода в обсерватории Юнгфрауях (Jungfrauoch), Швейцария, расположенной на высоте 3457 м, выполнялись наблюдения горячих звезд (Arnulf et al. 1936). Использовалась камера ($D = 0.4$ м, 1 : 1.5) с кварцевой предобъективной призмой, расширение спектров достигалось искусственно вызванным астигматизмом (объектив был наклонен на 8° к задней плоскости призмы Корню).

Изобретение камеры Шмидта открыло, в частности, возможность фотографической регистрации спектров протяженных объектов. Двухпризмный небулярный спектрограф с камерой Шмидта был закреплен в нижней части трубы рефрактора Йеркса, в верхней части была размещена входная щель, то есть телескоп ($D = 1.03$ м) служил гидом и несущей конструкцией небулярного спектрографа, поле зрения которого определялось диаметром камеры Шмидта и длиной трубы рефрактора (Struve 1937). Этот эксперимент был развит в конструкции небулярного спектрографа обсерватории МакДональд (Struve et al. 1938), где за счет использования рельефа местности входная «щель» была удалена от призмного диспергирующего узла на расстояние, намного превышающее длину рефрактора Йеркса. Идея использования рельефа местности была реализована и в схеме сконструированного Д. Д. Максудовым и Б. К. Иоаннисиани небулярного спектрографа Крымской астрофизической обсерватории, установленного на горном склоне

над Симеизом (см. Pikelner (1954)). Основной частью спектрографа служили менисковая камера ($D = 0.15$ м, 1 : 1) и две призмы из флинта. Отметим, что в перечисленных конструкциях спектры звезд, находящихся в поле зрения небулярного спектрографа, оказывались ниже порога фотографической регистрации.

Бесщелевой кварцевый спектрограф использовался при спектрофотометрии горячих звезд вблизи бальмеровского скачка (Mirzoyan 1955). Чтобы исключить дорогостоящую кварцевую предобъективную призму, применялся афокальный телескоп $D = 0.25$ м. Кварцевый спектрограф обеспечивал обратную линейную дисперсию $P = 150 \text{ \AA/мм}$ у линии $H\gamma$, за час экспозиции регистрировался спектр звезды $m_V = 7^m$. Исследовались ОВ-звезды в ассоциации Сер II.

Основным недостатком призмных бесщелевых спектров является отсутствие спектра сравнения. Проблему пытался решить еще Pickering (1896), предложивший реверсию предобъективной призмы. Но сравнение двух противоположных спектров не дает чистый доплеровский сдвиг, так как: а) при реверсии призмы центры прямой и обратной экспозиции не имеют одно и то же склонение (нужна точность совпадения центров лучше, чем $0''.05$), б) дисторсия призмы дает сдвиг линий, который для двухградусного поля приводит к ошибкам в тысячи км с^{-1} . Первая проблема ограничивает метод измерениями относительных лучевых скоростей, вторая была преодолена Fehrenbach (1947). Призма Ференбаха представляет собой плоскопараллельную пластину, сформированную двумя призмами из разного сорта стекла. Призмы имеют 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 продуктивными инструментами такой системы оказались астрограф GPO (Grand Prism Objectif) ($D = 0.4$ м, 1 : 10, масштаб изображений $51''.5 \text{ мм}^{-1}$), дающий обратную линейную дисперсию $P = 110 \text{ \AA/мм}$ (Giesekeing 1979a; b), и телескоп Шмидта Обсерватории Верхнего Прованса (Observatoire de Haute-Provence, ОНР) ($D = 0.62$ м, $F = 2.23$ м, $P = 200 \text{ \AA/мм}$ на $\lambda = 4220 \text{ \AA}$). На астрографе GPO при экспозиции 2×30 мин ошибки измерения лучевой скорости V_r для звезд ярче 9^m заключены между 4 и 9 км с^{-1} . Сравнение со щелевой спектроскопией на рефлекторе $D = 0.9$ м показало, что после учета различия апертур, в пересчете на одну звезду GPO был впятеро эффективнее. В поле телескопа

оказалось 35 звезд программы, то есть общий выигрыш GPO перед щелевой спектроскопией на телескопе равной апертуры составлял 150–200 при одинаковых, но достаточно низких требованиях к точности V_r . Средняя ошибка каталога Fehrenbach and Burnage (1981), построенного по наблюдениям в ОНР, составляет 4.2 км с^{-1} .

2.1.2. Щелевые призмные спектрографы

Из-за механических и температурных деформаций подвесные призмные спектрографы с высокой обратной линейной дисперсией P не приобрели популярности в задачах доплеровских измерений. Для спектральной классификации использовалась низкая P от 130 до 40 \AA/мм . Основы двумерной спектральной классификации МКК (Morgan et al. 1943) были созданы по наблюдениям на рефракторе Йеркса ($D = 1.03$ м), с однопризмным спектрографом (фактор широкощельности равен 7) конструкции G. Van Biesbroeck. Регистрировался диапазон $3920\text{--}4900 \text{ \AA}$, $P = 120 \text{ \AA/мм}$ у $H\gamma$.

К середине XX века щелевые призмные спектрографы на телескопах диаметром $D < 1$ м использовались только в трех случаях. На рефракторе Ликской обсерватории ($D = 0.91$ м) применялся трехпризмный спектрограф (Campbell 1898), на кросслеевском рефлекторе ($D = 0.91$ м) — двухпризмный спектрограф (Mayall 1936). На рефлекторе ($D = 0.94$ м) обсерватории Энн Арбор (окрестности Детройта) использовался сначала однопризмный, а с 1927 г. — спектрограф Кэртиса (фокусное расстояние коллиматора 1 : 18, $F_{\text{coll}} = 68$ см, две 60° -градусные призмы из флинта, сменные камеры с фокусным расстоянием $F_{\text{cam}} = 7.5, 15, 30$ и 60 см с набором значений обратной линейной дисперсии $P = 140, 76, 38$ и 19 \AA/мм соответственно. Спектрограф эксплуатировался более 30 лет. Эти спектрографы также использовались в основном для задач двумерной спектральной классификации (Morgan et al. 1943, Titus and Morgan 1940).

Симеизский рефлектор ($D = 1.0$ м) был оснащен однопризмным спектрографом с камерой $F_{\text{cam}} = 55$ см (диапазон от 3600 \AA до $H\alpha$, $P = 36 \text{ \AA/мм}$ у $H\gamma$), установленный в схеме с плоским диагональным зеркалом «ломаный Кассегрен» (1 : 18.6) (Albitzky and Shajn 1932). Призмный спектрограф конструкции В. А. Альбицкого, использовавшийся на рефлекторе $D = 1.22$ м (Корюлов 1954), имел фокусное расстояние коллиматора $F_{\text{coll}} = 99.5$ см при диаметре коллимированного пучка $d = 5$ см, призму из флинта с углом $66^\circ 6'$ и три сменных объектива (1 : 4, 1 : 8, 1 : 12) с фокусными расстояниями $F_{\text{cam}} = 23, 48$

и 72 см соответственно. Эти объективы обес- печивали дисперсию (у линии $H\gamma$) $P = 72, 36$ и $23 \text{ \AA}/\text{мм}$ соответственно. Кварцевый двухприз- менный спектрограф, также использовавшийся на телескопе $D = 1.22$ м КрАО, имел фокус- ное расстояние коллиматора $F_{\text{coll}} = 80$ см при диаметре $d = 4$ см, фокусное расстояние камеры $F_{\text{cam}} = 20$ см (1 : 4). Оптика камеры позволяла работать в диапазоне длин волн $3400\text{--}4300 \text{ \AA}$ с дисперсией $P = [65; 162] \text{ \AA}/\text{мм}$ соответственно.

В фокусе Ньютона телескопа ($D = 1.2$ м) обсерватории Сен-Мишель применялись одно- призмный и четырехпризмный спектрографы. На однопризмном спектрографе ($F_{\text{coll}} = 400$ мм, $d_{\text{coll}} = 70$ мм, $F_{\text{cam}} = 215$ мм) с 1944 г. в течение 30 лет было получено более 4500 спектрограмм, в том числе для 148 Ве-звезд (Hubert-Delplace and Hubert 1979).

В дополнение к спектрам, полученным на приз- менной камере (Agnulf et al. 1936), основу спек- тральной классификации горячих звезд по участку вблизи бальмеровского скачка составили спектры, полученные на щелевом кварцевом двухпризмен- ном спектрографе Шалонжа (Bailet et al. 1952), $F_{\text{coll}} = 330$ мм, две призмы Корню, $F_{\text{cam}} = 118$ мм. На телескопах $D = 0.25$ и 0.8 м регистрировался диапазон от 3100 \AA до $H\alpha$. Оригинальным дви- жением кассеты спектры уширялись от 0.35 мм на 3100 \AA до 1.5 мм вблизи $H\alpha$.

2.2. Дифракционные спектрографы

Дифракционные спектрографы стали конкурен- тоспособными после разработки нарезных решеток с профилированным штрихом (Wood 1935). Даль- нейшее совершенствование технологии делитель- ных машин (Gerasimov et al. 1957a; b, Harrison 1949a) и изготовления реплик дифракционных ре- шеток (Kosova et al. 1958), а также внедрение голографических методов позволило эффективно использовать схемы бесщелевых и щелевых ди- фракционных систем. Благодаря профилированию штриха дифракционных решеток угловая диспер- сия спектрографов значительно увеличилась при сохранении размеров диспергирующего элемента.

2.2.1. Бесщелевые дифракционные спектрографы

Epstein (1967) предложил сочетать отражаю- щую коррекционную пластину Шмидта с ди- фракционной решеткой ($D = 0.15$ м, $F = 61$ см, $P = 150 \text{ \AA}/\text{мм}$). Эта идея нашла развитие в схемах светосильных анастигматов (Lemaitre 1976) и щелевых спектрографов (Lemaitre 1981; 1983), устанавливаемых на телескопах разного диаметра,

в том числе и на телескопах $D = 1.0$ и 1.2 м (Fehrenbach and Chun 1981).

Noag and Schroeder (1970) на рефлекторе об- серватории Китт Пик ($D = 1.0$ м, 1 : 7.5) исполь- зовали прозрачную дифракционную решетку в схо- дящемся пучке. 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 5.1 см от фокуса, обеспечивала дисперсию $1260 \text{ \AA}/\text{мм}$, рабочее поле составляло $30'$. За получасовую экс- позицию регистрировались объекты $m_B = 16^{\text{m}8}$.

Решение проблемы одновременной регистра- ции реперного и звездного спектров в бесщеле- вом спектрографе было предложено Linnik (1963). Небольшая часть коллимированного пучка прохо- дит через пластинку, формирующую интерферен- ционные полосы Тальбота, расположенные в фо- кальной плоскости объектива рядом со спектром звезды. На дифракционной решетке, работающей при фиксированном угле дифракции, размещена отражающая призма с небольшим углом, выво- дящая небольшую часть коллимированного пучка (без дифракции) в поле камеры, где это недис- пергированное излучение отклоняется на оптику гида. Гидирование осуществляется быстрыми пере- мещениями первой линзы коллиматора поперек его главной оси.

2.2.2. Щелевые дифракционные спектрографы

Наряду с основным преимуществом — возможно- стью одновременной регистрации нескольких объ- ектов — 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 со- вершенствование щелевых дифракционных спек- трографов.

Для задач спектральной классификации (Abt 1963) использовался спектрограф первого теле- скопа ($D = 0.91$ м) обсерватории KPNO. Для те- лескопа $D = 0.91$ м обсерватории Steward был сконструирован спектрограф с камерой «ломаный Шмидт» (1 : 2) (Meinel 1963). Оснащенный на- бором сменных решеток, спектрограф обеспечи- вал набор значений обратной линейной дисперсии $P = [22; 800] \text{ \AA}/\text{мм}$.

Сочетание дифракционной решетки и камеры Шмидта изменило облик щелевого спектрографа. Стремление к универсализации возможностей при- вело к появлению набора встроенных в единую конструкцию фотографических камер, оснащаемых зачастую сменными дифракционными решетками.

В результате габариты и масса оборудования увеличиваются, из-за чего такие конструкции применялись на телескопах с $D \geq 1.5$ м. В качестве примера приведем трехкамерный кассегреновский спектрограф телескопа Маунт Вилсон ($D = 1.5$ м), оснащенный тремя сменными решетками (Wilson 1956).

Фокус Ньютона телескопа $D = 1.2$ м обсерватории Сен-Мишель имел три отдельных адаптера, что позволяло одновременно проводить наблюдения на телескопе тремя методами. Одним из методов являлся дифракционный спектрограф «E»² со сменными решетками 300 и 600 штр./мм и диоптрической камерой $f/2.4$ ($P = 275 \text{ \AA}/\text{мм}$). Спектрограф использовался также с электронно-оптическим преобразователем (ЭОП). С 1959 г. телескоп был оснащен спектрографом «E'»³ компании REOSC, ориентированным на работу в ближнем ИК-диапазоне ($P = 230 \text{ \AA}/\text{мм}$, эмульсия I-N). Спектрограф «E'» дооснащался решетками и камерами («полуплоской Шмидт», $f/0.47$, $P = 290 \text{ \AA}/\text{мм}$ и $f/2.5$, $P = 64 \text{ \AA}/\text{мм}$).

Большой «стеклянный» призмный спектрограф рефлектора $D = 1.22$ м Крымской астрофизической обсерватории в 1961 г. был заменен первым отечественным дифракционным спектрографом АСП-11. Спектрограф был оснащен двумя сменными дифракционными решетками, в результате чего появилась возможность получать спектры в двух порядках: в первом порядке — в диапазоне длин волн 4800–6700 \AA с дисперсией 37 $\text{\AA}/\text{мм}$ и во втором порядке — в диапазоне 3600–4800 \AA с дисперсией 15 $\text{\AA}/\text{мм}$ (Rachkovskaya 2013). В результате такой замены точность измерения лучевых скоростей понизилась (Chentzov 2013). В ближнем ИК-диапазоне спектрограф использовался с решеткой 300 штр./мм и ЭОП ФКТ-1А (Vitrichenko et al. 1975).

Массовыми инструментами фотографической эпохи оказались спектрографы фирм Boller & Chivens (B&C) и Karl Zeiss Jena, используемые в фокусе Кассегрена. Спектрограф B&C имеет диаметр коллимированного пучка $d = 9$ см, сменные решетки 102×128 мм, полуплоскую камеру схемы Боуэн–Шмидт–Кассегрен ($F = 14$ см) с невиньетированным полем 6×25 мм. Спектрограф UAGS имеет близкие параметры камеры с внешним фокусом ($F = 15$ см), две камеры Шмидта с внутренним фокусом ($F = 11$ см и $F = 17$ см), но

меньший диаметр коллимированного пучка ($d = 7.5$ см) и большее число оптических элементов. Эти приборы послужили основой для перевода спектроскопии с умеренным разрешением на фотоэлектронные светоприемники. Отечественные спектроскописты использовали универсальный целевой спектрограф UAGS, серийно выпускавшийся народным предприятием Карл Цейсс Йена. В частности, на телескопе $D = 0.6$ м САО АН СССР была отработана технология спектроскопии с ЭОП, применявшаяся затем на БТА в качестве основного метода исследования галактик (Afanasiev and Pimonov 1981). В варианте фотографической регистрации UAGS на этом телескопе использовался для мониторинга эмиссионных и абсорбционных спектров мирид (Vyshkov et al. 1978, Morozova and Panchuk 1978). В работе Gulyaev et al. (1986) по результатам наблюдений на телескопе $D = 0.6$ м со спектрографом UAGS ($P = 28 \text{ \AA}/\text{мм}$) была разработана система бальмеровских индексов, привязанная к моделям звездных атмосфер.

Для нэсмитовского фокуса рефлектора $D = 0.9$ м Richardson and Brealey (1973) разработали малогабаритный фотографический спектрограф с внеосевой камерой и коллиматором. Впоследствии этот прибор был оснащен приемником Reticon (Edwin 1989).

2.2.3. Дифракционные спектрографы фокуса кудэ

До появления эшелле спектрографов, работающих в высоких порядках дифракции, основной возможностью увеличения спектрального разрешения являлось увеличение фокусного расстояния камеры спектрографа. Поэтому неподвижный фокус кудэ (coudé), разработанный еще в XIX веке для визуальных наблюдений (Парижская обсерватория, 1882 г., рефрактор $D = 0.27$ м), в XX веке использовался для спектроскопических работ и на телескопах малого и среднего диаметра (таблица 1). Параметры спектрографов можно найти в обзоре Panchuk and Klochkova (2013).

2.2.4. Целевые дифракционные спектрографы со скрещенной дисперсией

Разработка технологии решеток со ступенчатым профилем штриха (Gerasimov et al. 1958, Harrison 1949b) позволила концентрировать излучение в узком интервале углов дифракции. Для работы в высоких порядках дифракции в 1960-е годы были разработаны двухзеркальные схемы с компенсацией комы по достаточно большому полю камеры (Kopylov and Steshenko 1965, Schroeder 1967). Поскольку параметры коллиматора и камеры не должны были сильно отличаться, данные решения были оптимальны именно для малых телескопов,

²http://www.obs-hp.fr/histoire/120/spectro_E.shtml

³http://www.obs-hp.fr/histoire/120/spectro_Eprime.shtml

Таблица 1. Некоторые телескопы малого и среднего диаметра, на которых проводилась спектроскопия и спектрофотометрия в фокусе кудэ

Год	D , м	$D : F$	Обсерватория
1922	0.91	1:36	Steward
1955	0.91	1:30	Cambridge
1963	0.91	1:37	KPNO coudé feed
1969	0.6	1:36	Lick CAT
1970	1.0		Canopus Hill
1970	0.61	1:28	Fick, Iowa
1971	0.4	1:33	Canopus Hill
1971	1.06	1:49	Lowell
1981	1.4	1:120	ESO CAT
1982	0.5	1:13	Crimean AO
1990	1.0	1:36	SAO RAS*

*Вследствие конструктивных ошибок в оптике тракта кудэ эффективный диаметр телескопа $D < 1.0$ м.

где можно обойтись небольшим значением фактора широкощельности. В последующие 10 лет на телескопах диаметром до 1.22 м были введены в работу спектрографы, перечисленные в таблице 2.

Более 20 лет, вплоть до наступления «оптоволоконной эры», спектрографы с эшелле использовались для спектроскопии звезд на небольших телескопах. Причиной тому является выигрыш в спектральном разрешении, пропорциональный тангенсу угла блеска, что позволяло реализовать высокое и умеренное спектральное разрешение на достаточно компактных подвесных конструкциях. Развитие этих систем сдерживалось трудностями оцифровки фотографических эшелле-спектров на микроденситометрах (применение призмы в качестве элемента скрещенной дисперсии создавало кривизну спектральных порядков) и низкой проникающей способностью (регистрировались спектры звезд ярче шестой величины). Часть эшелле-спектрографов впоследствии использовалась с электронно-оптическими преобразователями (ЭОП).

3. СПЕКТРОМЕТРЫ С ОДНОКАНАЛЬНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ

Одно- и двухканальные спектрометры являлись основными светоприемными устройствами малых телескопов около тридцати лет.

3.1. Бесщелевой сканер с предобъективной призмой

Для спектрофотометрических наблюдений в ближней ИК-области был использован катадиоптрический телескоп системы П. П. Аргунова ($D = 0.43$ м, $1 : 10$) (Argunov et al. 1967) с четырехградусной предобъективной призмой и фотоумножителем RCA-7102. Дисперсия призмы была направлена вдоль склонения, сканирование спектра (диапазон $4000 - 10\,000 \text{ \AA}$ за 10 минут) осуществлялось реверсивным двигателем (Komarov and Pozigun 1968).

3.2. Призменный сканер на афокальном телескопе

Афокальный телескоп АСИ-5 ($D = 0.25$ м, система Мерсена) использовался для фотоэлектрического сканирования спектров звезд (Mel'nikov and Kuprevich 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 \AA/мм у $H\gamma$. Сканирование спектра осуществлялось поворотом призмы, фотометрируемый спектральный участок шириной 14 \AA попадал в щель, за которой находился электрофотометр. Система регистрации сигнала и управления сканером насчитывала 17 радиоламп. Прибор отличался высокой эффективностью в УФ-диапазоне и позволял регистрировать спектры до седьмой звездной величины (Mel'nikov et al. 1959).

3.3. Сканирующие монохроматоры

Для изменения спектрального разрешения на фотографическом спектрографе следует изменить фокусное расстояние камеры. Jacquinot and Dufour (1948) показали, что спектральное разрешение, достигаемое на монохроматорах, зависит от ширины щели, то есть 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 спектрометра отражаются на деталях спектра. Hiltner and Code (1950) предложили метод компенсации флуктуаций регистрируемого сигнала путем сравнения с сигналом опорного канала, где регистрируется доля света, прошедшего через входную щель.

Таблица 2. Спектрографы скрещенной дисперсии в фокусе Кассегрена

Год	D , м	d , см	$\text{tg } \theta_b$	disp	R	Обсерватория
1971	0.9	5.5	2	ech/gr	16 000	Pine Bluff Obs. (Schroeder and Anderson 1971)
1976	0.91	5	2	pr/ech	40 000	Goddard SFC (McClintock 1979)
1977	0.61	9	2	ech/gr	43 000	Mt. John Obs. (Hearnshaw 1977)
1978	0.9		2	pr/ech/pr	40 000	Royal Greenwich (McKeith et al. 1978)
1978	1.0	*	2	ech/gr	52 000	Ritter Obs. (Latham 1977)
1980	1.0	*	2	ech/gr	52 000	Lowell Obs. (Latham 1977)
1980	1.0		2	ech/gr	30 000	Siding Spring Obs.
1981	1.0	7.7	2	ech/gr	54 000	Vienna Obs. (Weiss et al. 1981)
1982	0.61	*	2	ech/gr		Las Campanas (Latham 1977)
1982	0.61	5	3.2	filt/ech	150 000	Whipple Obs. (Hunten et al. 1991)
1986	1.22		2	ech/gr	50 000	Rangapur Obs.

Обозначения: disp — последовательность диспергирующих элементов по ходу лучей, ech — эшелле, gr — решетка, pr — призма, filt — фильтр; R — спектральное разрешение, D — диаметр зеркала, d — диаметр коллимированного пучка. * — копии спектрографа Harvard College Observatory, использовавшегося на телескопе $D = 1.52$ м

3.3.1. Щелевые призмные монохроматоры

Схема компенсации флуктуаций освещенности входной щели применена в двухпризменном монохроматоре на рефлекторе $D = 1.2$ м (Geake and Wilcock 1956). Достижение максимального разрешения (0.5 \AA) требовало сузить щель до 25 мкм, тогда как изображение звезды и амплитуда дрожания изображения были намного выше. По тем временам использовалась сложная система компенсации флуктуаций: фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) второго канала регистрировал недиспергированный свет, отраженный от первой грани призмы.

3.3.2. Сканеры с плоской дифракционной решеткой

Воусе et al. (1973) разработали сканер фокуса кудэ телескопа $D = 1.06$ м Ловелловской обсерватории. Коллиматор с фокусным расстоянием $F_{\text{coll}} = 610$ см, диаметр коллимированного пучка $d = 12.7$ см, решетка 1200 штр./мм, фокусное расстояние камеры $F_{\text{cam}} = 305$ см, обратная линейная дисперсия $2.67 \text{ \AA}/\text{мм}$ на 5000 \AA , шаг сканирования 0.078 \AA и больше. Исследовались скорости осевого вращения ярких звезд.

Хороший пример прибора, эффективно использовавшегося для измерения распределений энергии в спектрах звезд разных типов, представляет сканер телескопа $D = 0.61$ м университета Вочуп. В

1968 г. телескоп был перенесен в ЕЮО для создания спектрофотометрических стандартов южного неба. Одноканальный инструмент был выполнен по схеме Черни–Тёрнера, сканирование спектра осуществлялось перемещением решетки (Dachs and Schmidt-Kaler 1976).

3.3.3. Сканеры с вогнутой решеткой

Liller (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 Namioka (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 рефлектора $D = 0.5$ м (Kalinenkov and Kharitonov 1967); на этом приборе удавалось проводить спектрофотометрию звезд до седьмой величины (Kharitonov and Klochkova 1972). Beavers and Eitter (1986) для работ на телескопе $D = 0.37$ м применили вогнутую (1 : 4) голографическую решетку 1200 штр./мм, дающую обратную дисперсию $40 \text{ \AA}/\text{мм}$.

3.4. Узкополосные спектрофотометры

Наиболее простой способ спектрофотометрии линий — переключение системы щелей, центрированных на измеряемую линию (группу линий)

и на соседние участки непрерывного спектра. В работе Gustafsson and Nissen (1972) использовался эшелле-спектрограф, обеспечивающий высокую дисперсию ($P = 2 \text{ \AA}/\text{мм}$). В программе исследования содержания гелия (Nissen 1974) 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 100 000 за полчаса на 1-м телескопе ЕЮО регистрировалась 10-я звездная величина (Nissen 1977). В северном полушарии спектрофотометр работал на телескопе ОНР ($D = 1.93 \text{ м}$).

Габариты фотоумножителей исключали применение многоканальных систем, хорошо зарекомендовавших себя на больших телескопах (Оке (1969), Rodgers et al. (1973) и др.) и на телескопах умеренного диаметра. Внедрение миниатюрных ФЭУ и оптоволоконной технологии позволило решить эту задачу (Barwig and Schoembs 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^{m} . Оптоволоконка питает три идентичных призматических спектрографа. Спектр, построенный в каждом из трех спектрографов, проецируется на торцы пятнадцати оптоволокон, выходы которых соединены с миниатюрными фотоумножителями, охлаждаемыми на эффекте Пельтье.

3.5. Корреляционные спектрометры

Эффективность кросс-корреляционной техники в задаче измерения лучевых скоростей впервые на практике продемонстрировал Griffin (1967), используя фокус кудэ телескопа $D = 0.91 \text{ м}$. Его техника измерения лучевых скоростей на малых телескопах позволила получить выигрыш на три порядка по сравнению с фотографическим методом (Griffin 1969). Описание оснащения телескопа $D = 0.61 \text{ м}$ обсерватории Fick, специализированного для измерения лучевых скоростей, дано в работе Beavers and Eitter (1977). В цилиндрической камере фокуса кудэ установлено зеркало (диаметр $d = 41 \text{ см}$, фокусное расстояние $F = 305 \text{ см}$), служащее коллиматором и камерой. Дифракционная решетка 1200 штр./мм (максимум концентрации на 5000 \AA , размер заштрихованной области $135 \times 110 \text{ мм}$) 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 $1''$ и разрешению 15 км с^{-1} 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 (Baranne et al. 1979). Первый экземпляр прибора работал с 1977 г. в Обсерватории Верхнего Прованса (ОНП), на швейцарском телескопе $D = 1.0 \text{ м}$ (Baranne et al. 1977). За 10 независимых измерений, продолжительностью 0.5 минуты каждое, для К-звезды $m_B = 11^{\text{m}}$ среднеквадратичное отклонение лучевой скорости составляло 0.7 км с^{-1} . Второй экземпляр CORAVEL использовался в ЕЮО с 1981 г. на датском телескопе $D = 1.54 \text{ м}$. Компактность прибора ($F_{\text{cam}} = 57 \text{ см}$) обеспечивала хорошую жесткость и удобство работы в фокусе Кассегрена. Для звезд $m_B < 15^{\text{m}}$ была реализована точность измерений лучевой скорости 0.5 км с^{-1} (Imbert and Prévot 1981).

Эффективный фотоэлектрический измеритель лучевых скоростей телескопа DAO ($D = 1.2 \text{ м}$) (Fletcher et al. 1982) был построен на базе кудэ-спектрографа (Richardson 1968). Его параметры: коллиматор $F_{\text{coll}} = 757 \text{ см}$ ($1 : 30$), мозаичная дифракционная решетка 831 штр./мм , второй порядок, камера $F_{\text{cam}} = 244 \text{ см}$, обратная линейная дисперсия $P = 2.4 \text{ \AA}/\text{мм}$, ширина проекции щели 0.08 мм , маска, перемещаемая шаговым двигателем, перед ФЭУ установлена пластмассовая линза Фабри ($1 : 1$). От звезды $m_B = 16^{\text{m}}$ регистрировались 10 отсчетов за секунду, что обеспечивало итоговую точность лучше, чем 1 км с^{-1} .

Интересно, что кросс-корреляционный метод использовался и для исследования движений пылевых частиц в F-короне (Beavers et al. 1980). Серийный монохроматор (схема Эберта, $1 : 3.5$) был оснащен маской щелей, повторяющих положение специально отобранных линий солнечного спектра в интервале $4005\text{--}4352 \text{ \AA}$. Питающей оптикой являлось параболическое зеркало $D = 0.15 \text{ м}$ ($1 : 5$) в комбинации с плоским целостатным зеркалом.

Вышеупомянутый небольшой спектрограф, предназначенный для фотографических работ (Richardson and Brealey 1973), был переоборудован в кросс-корреляционный спектрометр телескопа DAO $D = 0.4 \text{ м}$. После щели была установлена специальная призма, а в фокальной плоскости камеры располагалась маска (300 линий в области $415\text{--}485 \text{ нм}$), изготовленная по спектру К-гиганта. Точность определения лучевых скоростей (2 км с^{-1}) ограничивалась нежесткостью малогабаритного прибора.

Долгожителем метода является отечественный корреляционный измеритель лучевых скоростей (Tokovinin 1987), использовавшийся на телескопах $D = 0.6, 0.7, 1.0, 1.25$ м с 1984 г. по настоящее время.

3.6. 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 (Sloane et al. 1969). Интерес к экспериментам с адамаровскими спектрометрами объясняется просто: мультиплексный выигрыш здесь такой же, что и в фурье-спектрометре (то есть отношение S/N пропорционально корню квадратному из числа измеряемых дискретных элементов спектра), а технология проще: используется дифракционный спектрограф, снабженный механически сменяемыми масками. Для протяженных объектов можно применить сочетание кодирующих масок на входе и выходе спектрометра (Harwit 1971). На адамаровском спектрометре, позволяющем получать одновременно 15 ИК-спектров по 255 элементов каждый (Ming Hing Tai et al. 1975), было изучено широтное распределение метана по диску Юпитера.

4. СПЕКТРОГРАФЫ С МНОГОКАНАЛЬНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ

Внедрение многоканальных приемников в практику астроспектроскопии позволило: а) расширить наблюдаемый диапазон длин волн, б) увеличить спектральное разрешение, в) постепенно увеличить фотометрическую точность. Практически все типы многоканальной регистрации нашли применение на телескопах рассматриваемых диаметров.

4.1. Спектрографы с электроннооптическими преобразователями

Большинство спектрографов с фотографической регистрацией, конструкция которых позволяла использовать линзовые камеры или камеры Шмидт–Кассегрен, послужили базой для от-

работки методов наблюдений с электроннооптическими усилителями яркости (ЭОП) с последующей фотографической регистрацией. Например, спектрограф UAGS с ЭОП (Afanasiev and Rimov 1981), разработанный для 6-м телескопа, был предварительно испытан на телескопе $D = 0.6$ м. Применение ЭОП с оптическим перебросом на фотопластинку не давало резкого выигрыша в сочетании «проницающая способность при заданном уровне S/N », поэтому вначале основной резон использования ЭОП состоял в освоении близкого ИК-диапазона, недоступного для прямых фотографических наблюдений. Например, Wood (1968) использовал кассегреновский спектрограф рефлектора $D = 0.81$ м для получения зеемановских спектров ярких звезд в ИК-диапазоне. Для поиска линий, асимметричных вследствие эффекта Зеемана или других эффектов, был адаптирован автокорреляционный метод. Удачный прибор сконструировал Esipov (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 первом порядке. Прибор был испытан на рефлекторе $D = 0.33$ м. Уже первый кассегреновский эшелле-спектрограф (Schroeder and Anderson 1971) использовался на телескопе $D = 0.91$ м и с электроннооптическим преобразователем.

4.2. Спектрографы с электронографическими камерами

Первые эксперименты с электронографической камерой (Lallemant and Duchesne 1956) проводились на спектрографе «Е» фокуса Ньютона телескопа $D = 1.2$ м обсерватории Сен-Мишель. Из-за сложности эксплуатации электронографических камер в подвесных вариантах (фокусы Ньютона и Кассегрена) наибольшую эффективность в спектроскопии на телескопах среднего диаметра получила камера, установленная в фокусе кудэ телескопа $D = 1.52$ м ЕЮО. В первой половине 1970-х годов там был смонтирован «EHEL.E.C.» (эшелле-спектрограф с электронной камерой), являющийся первым универсальным спектрографом белого зрачка (Baranne and Duchesne 1972). 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 Å/мм. Спектр, уширенный до 0.2 мм, был получен от звезды $m_B = 10^m$ за 2.5 часа. В однопорядковой моде с дисперсией 74 Å/мм за час экспозиции достигалась $m_B = 14^m$ (Breysacher 1976). Техника электронографической

спектроскопии была сложна, поэтому на спектрографе применялась также фотографическая регистрация, в том числе и через ЭОП. По схеме белого зрачка был разработан и небулярный спектрограф с ЭОП (Baranne et al. 1974).

4.3. Спектрографы с диссекторами

В начале 1970-х годов на телескопе $D = 1.0$ м Ликской обсерватории работал сканер-диссектор изображений (image dissector scanner, IDS), состоящий из трехкаскадного ЭОП (фотокатод S-20 диаметром 40 мм), за третьим каскадом которого размещался диссектор, сканирующий спектр за время послесвечения фосфора. Таким образом, 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. В наблюдениях пекулярного объекта SS 433 использовался IDS, устанавливаемый на телескопах различного диаметра, в том числе и на рефлекторе $D = 0.6$ м Ликской обсерватории (Margon et al. 1979). McNall et al. (1972) оснастили эшелле-спектрограф (Schroeder and Anderson 1971) телескопа $D = 0.91$ м ЭОП с диссектором. Регистрировалось 256 элементов разрешения в одном из порядков эшелле-спектра. Но диссектор еще не являлся счетчиком фотонов.

4.4. Спектрографы с диодными линейками

Удачный пример интенсифицированного ретиконного сканера (intensified Reticon scanner, IRS) представлял спектрограф представлял спектрограф телескопа $D = 0.9$ м обсерватории Китт Пик, эксплуатировавшийся с начала 1980-х годов. После ЭОП вместо диссектора были установлены две ретиконные 820-элементные линейки. Считывание осуществлялось каждые 10 секунд, каждое изображение содержало шумы, составляющие четыре события на элемент. Точность определения лучевых скоростей на таком приборе составляла 3–5 км с⁻¹.

Для телескопа $D = 0.91$ м, 1 : 10 обсерватории MIRA ($h = 1520$ м над уровнем моря) был сконструирован спектрограф, применявшийся для спектральной классификации в ближнем ИК-диапазоне (Togges-Dodgen and Weaver 1993). Спектрограф фокуса Кассегрена ($F_{\text{coll}} = 380$ мм, решетка 600 штр./мм, $\lambda_{\text{max}} = 8400$ Å, сменные

камеры F_{cam} от 55 до 600 мм) использовался с линейкой Reticon, высокий шум считывания которой (не более $1000 e^-$) не критичен для режима спектрофотометрии ($2 \times 10^7 e^-$ на диод).

4.5. Спектрографы со счетчиками фотонов

Многоканальный спектрометр со счетчиком фотонов описан в работе Schectman and Hiltner (1976). Система включает два трехкаскадных ЭОП, сопряженных оптоволоконной шайбой, с оптическим перебросом на диодную линейку. На телескопе $D = 1.3$ м от объекта $m_V = 13^m$ был получен 1 отсчет в секунду на ангстрем. Развитием метода «шектографии» явилась система 2D-Frutti (Schectman 1984). Прибор был разработан для телескопа $D = 4.0$ м СТЮ, а затем конструкция была повторена для телескопа $D = 1.0$ м, 1 : 10 со спектрографом Boller & Chivens. Двухкаскадный ЭОП с 40-мм катодом S-20, соединяемый оптическим перебросом с 40-мм катодом ЭОП 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 было считывать часть формата ПЗС. Полная длина щели, составляющая $6'8$, 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 телескопе $D = 1.0$ м это соответствует регистрации $m_V = 12^m$ с разрешением 4 \AA . По стоимости система была дороже матриц ПЗС, производимых в первой половине 1980-х годов. Счетчик фотонов, разработанный Mochnacki et al. (1986) для телескопа $D = 1.9$ м DDO, был испытан на телескопе $D = 1.0$ м. С обратной линейной дисперсией 16 \AA/мм у звезд до $m_V = 15^m$ обеспечивалась точность измерения лучевой скорости 1 км с^{-1} . Таким образом, наиболее сложные системы регистрации спектра успешно работали на телескопах метрового класса.

4.6. Спектрографы с линейками и матрицами ПЗС

Линейки типа Reticon имели шумы на порядок выше, чем у матриц ПЗС середины 1980-х годов, 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 (Gray 1976; 1978). Использовалась R2-эшелле 316 штр./мм, выделение одного из порядков ($m = [6; 15]$) осуществлялось интерференционными фильтрами (пропускание 85%). Камера типа «ломаный Шмидт» ($F = 559$ мм) обеспечивала дисперсию $0.038 \text{ \AA}/\text{диод}$ (6250 \AA , девятый порядок). С этими параметрами от звезды шестой величины за час экспозиции получалось $S/N = 100$. Для удвоения числа точек на профиле спектральной линии применялось микросканирование путем сдвига 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. Спектрограф фокуса кудэ телескопа UWO ($D = 1.2$ м) отличался высокой стабильностью (изменение температуры помещения не превышало градус в неделю). При длительных экспозициях линия уширяется и вследствие 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^{-1} (на других часовых углах эффект выражен сильнее), тогда как параметры уширения линий иногда надо знать с точностью 0.1 км с^{-1} (Gray 1986).

Здесь следует упомянуть и кудэ-эшелле-спектрограф ЕЮО CES (Enard 1979) — прибор, использовавшийся в основном со вспомогательным телескопом $D = 1.4$ м (Andersen 1977; 1979) фокуса кудэ большого телескопа $D = 3.6$ м. На этом спектрографе выполнено множество программ, требующих высокого спектрального разрешения в сочетании с низким уровнем рассеянного света (за счет предщелевой фильтрации и схемы двойного хода). Популярность прибора определялась и возможностью дистанционного управления наблюдениями с территории Европы.

Fugenlid (1984) предложил схему телескопа-спектрографа с единственным оптическим элементом — вогнутой дифракционной решеткой. Оцен-

ки показали, что такой телескоп с эквивалентным диаметром $D = 0.18$ м, фокусным расстоянием $F = 3.3$ м, плотностью штрихов 210 штр./мм, с дисперсией $P = 14.3 \text{ \AA}/\text{мм}$ за час экспозиции позволит получить на матрице ПЗС спектры звезд $10^{\text{m}6}$ с отношением $S/N = 100$. Для сравнения отмечено, что на телескопе KPNO ($D = 0.97$ м) спектрограф фокуса кудэ с указанными значениями дисперсии и отношения S/N имеет проникающую способность ярче на одну звездную величину. Понятно, что одноэлементный телескоп-спектрограф сохраняет все принципиальные недостатки бесщелевой спектроскопии.

Совершенствование технологии приборов с зарядовой связью (ПЗС) существенно облегчило задачу конструирования подвесных спектрографов, опуская нижнюю границу диаметров спектроскопических телескопов. McDavid (1986) разработал миниатюрный (габариты конструкции $0.3 \times 0.18 \times 0.13$ м) кассегреновский спектрометр телескопа $D = 0.4$ м (1 : 12). Светоприемником является ПЗС-линейка из 128 элементов (13×13 мкм каждый). 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. Denby et al. (1986) разработали компактный спектрограф телескопа $D = 0.6$ м с параметрами: ломаный линзовый коллиматор $F = 485$ мм (1 : 9), решетка 300 штр./мм, камера $F = 85$ мм (1 : 2), дисперсия 4 \AA на 13-микронный пиксель. Подсмотр осуществлялся объективом $F = 75$ мм (1 : 3.5).

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 S/N квадратному корню из числа отсчетов, \sqrt{n} . Упрощенно: при низких значениях S/N основной характеристикой приемника являются шумы считывания, при высоких S/N — квантовая эффективность. Для измерения интегральных цветов галактик Rakos et al. (1990) разработали спектрофотометр с ультрамикронным разрешением

(140 Å в диапазоне 3200–7600 Å). На входе прибора установлены два (на «объект» и «фон») линзовых редуктора светосилы (1 : 15 в 1 : 2), питающие оптоволоконные жгуты. Выходы жгутов находятся в фокусе вогнутой голографической решетки диаметром 108 мм (1 : 2), 225 штр./мм, обеспечивающей дисперсию 200 Å/мм. Спектр регистрируется матрицей ПЗС, прибор оснащен офсетным гидом. На телескопах $D = 1.1$ и 1.3 м за четыре десятиминутные экспозиции в полнолуние регистрировался спектр яркой галактики ($m_V = 12^m$) до $S/N = 10$.

Массовое измерение красных смещений, с внедрением счетчиков фотонов распространившееся на телескопы умеренных диаметров, было поддержано созданием высокоэффективного кассегреновского спектрографа 1.5-м телескопа (Fabricant et al. 1998). При диаметре коллимированного пучка 100 мм, ширине щели $1''5$, с решеткой 300 штр./мм спектральное разрешение равно 3 Å , причем длина одновременно регистрируемого диапазона составляет 4000 Å . Длина щели составляет $3'$, эффективность 26%, количество регистрируемых за год спектров превосходило 10 000, то есть спектрограф заменил знаменитую Z-машину (Latham 1982), выигрывая при этом в проникающей способности 1^m . Основным недостатком подвесных кассегреновских спектрографов является механическая жесткость, что в каждом отдельном случае затрудняет построение системы лучевых скоростей, измеряемых на данном приборе. Munari and Lattanzi (1992) исследовали гнутия двух кассегреновских спектрографов обсерватории Асьяго. Обнаружены сдвиги, соответствующие ошибке $10\text{--}40 \text{ км с}^{-1}$, при ошибке кросс-корреляционной методики 0.8 км с^{-1} . Была построена численная модель, позволяющая увеличить точность измерения лучевых скоростей, ошибки от ночи к ночи снижены на порядок, то есть до $1\text{--}3 \text{ км с}^{-1}$.

В консорциуме ANS разработаны три модели подвесных спектрографов для телескопов $D = 0.61$ м, 0.70 м и 0.84 м (Munari and Valisa 2014). Две из этих моделей (Mark II и Mark III) могут трансформироваться в схему скрещенной дисперсии без демонтажа спектрографа из фокуса Кассегрена.

В работе Panchuk et al. (2015b) сообщалось о разработке спектрографа скрещенной дисперсии, предназначенного для телескопов диаметром $0.6\text{--}1.0$ м. Двухпиксельное спектральное разрешение составляет $R \sim 40\,000$. Одновременно регистрируемый диапазон ($350\text{--}800$ нм) определяется не форматом кадра, а кривой спектральной чувствительности приемника. Перекрытие соседних спектральных порядков полное. Колли-

матор зеркальный ($d_{\text{coll}} = 50$ мм), камера линзовая ($F_{\text{cam}} = 300$ мм, 1 : 3.5). Широкощельность спектрографа равна 2.2, увеличение на эшелле отсутствует ($\alpha = \beta$). Угловая ширина нормальной щели, согласованной с элементом разрешения, составляет $1''6$ и $1''$ на телескопах 0.6 м и 1.0 м соответственно. Математический аппарат экстракции одномерных векторов из двумерных эшелле-изображений, используемый на НЭС БТА (Panchuk et al. 2017a), доработан с учетом того обстоятельства, что элементом скрещенной дисперсии является призма.

Разработанный для телескопа АЗТ-ЗЗИК ($D = 1.6$ м) спектрограф низкого разрешения АДАМ (Afanasiev et al. 2016) прошел первоначальные испытания на телескопе САО РАН Zeiss-1000 ($D = 1$ м). Для согласования с 1-м зеркалом использовался линзовый конвертер. При ширине щели $1''5$ за 30 минут экспозиции спектр объекта $m_R = 20^m$ имел $S/N = [6; 7]$. На 1.6-м телескопе были получены спектры подобного объекта уже с $S/N = [10; 15]$. Спектрограф работает в диапазоне $3600\text{--}10\,000 \text{ Å}$ со спектральным разрешением $6\text{--}15 \text{ Å}$ ($R = [1320; 270]$). В качестве диспергирующего элемента используются три объемные голографические фазовые решетки (VRHG), установленные на турели: 300 штр./мм (на весь рабочий диапазон) и две решетки 600 штр./мм ($3588\text{--}7251 \text{ Å}$ и $6430\text{--}10\,031 \text{ Å}$).

4.6.1. Однопорядковые спектрографы с оптоволоконным сочетанием

Первый удачный эксперимент оптоволоконного сочетания спектрографа с телескопом $D = 0.91$ м (Angel and Gresham 1979) был осуществлен в рамках проекта FLOAT (массив телескопов, связанный оптическими волокнами (Angel et al. 1977)). С целью оценки эффективности оптоволоконного сочетания на телескопе $D = 0.91$ м использовался тот же спектрограф с ЭОП, что и в фокусе Кассегрена телескопа $D = 2.28$ м. Для оптического волокна отмечены заметные потери света в наземном ультрафиолете. Кроме того, было показано, что оптоволоконное сочетание имеет преимущества перед фокусом кудэ, в котором необходимо поддерживать высокую отражательную способность зеркал оптического тракта.

Из оптоволоконных спектрографов низких порядков дифракции отметим еще схему Эберта–Фасти и ее ньютоновскую модификацию (Barry et al. 2002, Furenlid and Cardona 1988), разработанную в рамках перспективной концепции «мультителескопного телескопа» — Multi-Telescope Telescope (МТТ). Первичный фокус каждого из девяти зеркал ($D = 0.33$ м) такого телескопа

(Vagnuolo et al. 1990) соединяется со спектрографом оптоволоконном. Эффективная апертура МТТ эквивалентна телескопу с диаметром зеркала $D = 1.3$ м.

4.6.2. Оптоволоконные эшелле-спектрографы

Увеличение точности определения лучевых скоростей ограничено принципиальным свойством щелевых спектрографов. Из-за атмосферной дисперсии положения центров монохроматических изображений звезды различаются, а вследствие остаточных недоюстировок и механических гнутий 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 зависящим 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 телескопов, $D \sim [0.5; 0.9]$ м).

Одной из первых попыток получения высокой позиционной точности на оптоволоконном эшелле-спектрографе является работа Kershaw and Hearnshaw (1989), в которой подвесной эшелле спектрограф (Hearnshaw 1977) получил оптоволоконное сочетание с телескопом МакЛеллан (McLellan, $D = 1.0$ м) обсерватории Маунт Джон (Mt John). В качестве приемника использовалась линейка диодов Reticon, охлаждаемая жидким азотом, затем — матрица ПЗС. Для звезд $m_V \leq 7^m$ с применением кросс-корреляционных методов была достигнута точность 50 м с^{-1} (при $R \sim 35\,000$) (Murdoch et al. 1993). Многолетние усилия новозеландских спектроскопистов увенчались созданием большого спектрографа HERCULES (Hearnshaw et al. 2002). В нем за счет увеличения диаметра коллимированного пучка с 54 мм до 210 мм, стабилизации условий в объеме спектрографа и применения высокоэффективных оптических покрытий на телескопе $D = 1$ м удалось достичь точности $\sigma_{V_r} = [4; 14] \text{ м с}^{-1}$ с эффективностью в пике 18% при качестве изображений $1''$. Коллимированный пучок перезаполняет эшелле (R2, 400×200 мм), используется камера «ломаный Шмидт» ($F_{\text{cam}} = 973$ мм, $D_{\text{cam}} = 525$ мм). Спектральное разрешение определяется комбинацией оптического волокна и щели ($R = 41\,000, 70\,000, 82\,000$).

В оптоволоконном спектрографе Flash ($d_{\text{coll}} = 80$ мм), испытанном на Гейдельбергском

телескопе $D = 0.75$ м, эшелле (R2, 31.6 штр./мм) работает в главной плоскости, что уменьшает проекцию диаметра ядра волокна на матрице ПЗС (Mandel 1988). С целью мониторинга горячих сверхгигантов южного неба спектрограф был перенесен на телескоп $D = 0.5$ м ЕЮО (Wolf et al. 1993). Затем был построен Гейдельбергский спектрограф расширенного оптического диапазона HEROS⁴, содержащий «синюю» и «красную» ветви. Разделение диспергированного пучка на две ветви ($3450\text{--}5600 \text{ \AA}$ и $5800\text{--}8650 \text{ \AA}$) позволило оптимизировать плотность упаковки эшелльных порядков в каждой ветви (используя дифракционные решетки скрещенной дисперсии с различной плотностью штрихов). В каждой ветви применялись матрицы ПЗС, оптимизированные по формату и квантовой эффективности. Спектрограф был установлен в ЕЮО, где также использовался в программе мониторинга горячих сверхгигантов в течение 120 ночей за полгода. Наблюдения со спектрографом HEROS проводились также на голландском телескопе $D = 0.9$ м, перенесенном в ЕЮО из Южной Африки (Lub 1979). Точность измерения лучевых скоростей составляла $\sigma_{V_r} < 1 \text{ км с}^{-1}$, что для программы мониторинга горячих звезд представлялось достаточным. Позже HEROS перекочевал на телескоп $D = 2$ м обсерватории Ондражейов (Ondřejov) (Slechts and Skoda 2002). В 2005 г. телескоп ЕЮО $D = 0.5$ м был перемещен в университетскую обсерваторию вблизи Сантьяго (Чили), где работает с оптоволоконным спектрографом PUCHEROS (Vanzi et al. 2012). Параметры спектрографа: ядро оптоволоконна 0.05 мм, $d_{\text{coll}} = 33$ мм, эшелле 44.4 штр./мм, угол блеска 70° , узел скрещенной дисперсии из двух призм 48° , камера — линзовый дублет ($F = 355$ мм) с менисковым корректором поля, $R = 17\,800$.

Оптоволоконный спектрограф, предназначенный для наблюдений по программе MUSICOS, разработали Baudrand and Bohm (1992). Этот недорогой прибор для телескопов $D \sim 2$ м, распределенных по долготе, был пригоден и для наблюдений на малых телескопах.

Некоторые из подвесных эшелле-спектрографов, отмеченных в таблице 2, впоследствии были оснащены современными приемниками и оптоволоконным сочетанием. Так, например, одна из копий удачной конструкции спектрографа обсерватории Гарвардского колледжа (Latham 1977) была установлена на телескопе $D = 1.0$ м обсерватории университета Толедо и десятилетиями

⁴<http://www.lsw.uni-heidelberg.de/projects/instrumentation/Heros/>

используется в оптоволоконной моде с матрицей ПЗС (см., например, Morrison (1995)).

Известны эшелле-спектрографы, изготовленные не в обсерваториях. Фирма REOSC разработала универсальный спектрограф, используемый как в однопорядковом варианте ($R = 1000$), так и в схеме скрещенной дисперсии ($R = 21\,000$, диапазон $3800\text{--}8000\text{ \AA}$). Один из таких спектрографов, применявшийся ранее в касегреновском фокусе $F/15$ телескопа $D = 0.91$ м, установленного на склоне вулкана Этна, с 1993 г. используется в моде оптоволоконного сочетания⁵ (Marino et al. 1998). При этом обеспечивается точность измерения лучевых скоростей $\sigma_{V_r} < 0.3\text{ км с}^{-1}$, что достаточно для большинства задач спектроскопического мониторинга переменных звезд. Вместо камеры Шмидта установлен коммерческий объектив CANON EF300, что позволяет использовать в оптоволоконной моде весь коллимированный пучок.

Оптоволоконный эшелле-спектрограф CORALIE (Queloz et al. 2000), являющийся усовершенствованным близнецом спектрографа ELODIE (Baranne et al. 1996), установлен в ЕЮО в фокусе Нэсмита швейцарского телескопа Euler ($D = 1.2$ м) и предназначен для поиска внесолнечных планет методом доплеровских измерений смещений спектра центральной звезды. Комплекс телескопа Euler со спектрографом CORALIE полностью автоматизирован (Weber et al. 2000).

Кроме телескопов, специализированных под определенный класс задач, создаются роботизированные комплексы телескопов, например, STELLA (Strassmeier et al. 2001; 2004). Параметры этого спектрально-фотометрического комплекса оптимизированы для изучения структуры и динамики активности, проявляющейся на поверхности звездных фотосфер. В состав комплекса входит телескоп STELLA-I ($D = 1.2$ м), первый полностью роботизированный телескоп, оснащенный эшелле-спектрографом высокого разрешения SES ($d = 130$ мм, $390\text{--}860$ нм, R2, 31 штр./мм). С двумя оптоволоконными входами обеспечивается разрешение $R = 50\,000$ и $R = 25\,000$ при входной апертуре $1''7$ и $3''4$ соответственно.

Для телескопа Mercator ($D = 1.2$ м) разработан спектрограф HERMES (Raskin and Winkel 2008), отличающийся рекордным сочетанием квантовой эффективности (25% в пике) и спектрального разрешения ($R = 85\,000$).

Большинство оптоволоконных эшелле-спектрографов 1990-х годов используются с телескопами $1.5\text{--}3.6$ м (Panchuk et al. 2011), но не следует

забывать, что разработаны методы измерения лучевых скоростей по эшелле-спектрам с минимальным $S/N < 1$ (Queloz 1995). Таким образом, измерения лучевых скоростей с оптоволоконными эшелле-спектрографами возможны и на телескопах $D = [0.5; 0.9]$ м.

Для отечественных телескопов метрового класса разработан спектрограф EFES (Panchuk et al. 2015d), прототип которого (Panchuk et al. 2011) с 2010 г. используется на телескопе $D = 1.2$ м Ковуровской обсерватории Уральского Федерального университета (Punanova and Krushinsky 2013).

Массив из четырех телескопов $D = 0.7$ м (Swift et al. 2015) предназначен для спектроскопии звезд-кандидатов в экзопланетные системы. Так как предусмотрены и фотометрические наблюдения, центральное экранирование составляет почти половину диаметра главного зеркала. Спектрографом служит перспективная модель KiwiSpec (Barnes et al. 2012, Gibson et al. 2012), построенная по схеме асимметричного белого зрачка ($R = 80\,000$, $5000\text{--}6300\text{ \AA}$). Столь ограниченный диапазон определяется необходимостью изображать (на матрице $2K \times 2K$) каждый из 26 порядков шесть раз (четыре «научных» спектра и два калибровочных). Кроме классической калибровки (лампа с полым катодом) предусмотрена калибровка через стабилизированный эталон Фабри–Перо.

Кроме ошибок, перечисленных в Panchuk et al. (2015a), основным фактором, ограничивающим позиционную и фотометрическую точность оптоволоконных спектрографов высокого разрешения, является модальный шум, приводящий к неидентичной коррекции сигнала на этапе калибровки. Выражаясь популярно, вариации освещенности оптоволоконного входа и изгибы многомодового оптического волокна в процессе накопления сигнала исключают достижение высоких значений S/N при любом способе калибровки. Например, в лабораторных экспериментах при $R \sim 150\,000$ (Baudrand and Walker 2001) показано, что значение $S/N \sim 500$ достижимо только в упрощенных арифметических оценках. Кардинальным решением является переход к одномодовому волокну, где апертура выходящего пучка неизменно гауссова. Габариты соответствующего (дифракционно ограниченного) спектрографа также будут меньше. Например, в работе Schwab et al. (2014) спектрограф с эшелле R4 и $d_{\text{coll}} = 25$ мм обеспечит спектральное разрешение $R \sim 100\,000$. Однако диаметр ядра одномодового волокна в разы (или на порядок) меньше многомодового, и решение проблемы согласования на входе в оптическое волокно зависит от применяемых средств адаптивной оптики.

⁵<http://w3c.ct.astro.it/sln/strumenti.html>

4.7. Спектрополяриметры

Примеры спектрополяриметрических методов, применяющихся в том числе и на телескопах умеренных размеров, были даны в обзоре Klochko et al. (2005). Тонкие спектрополяриметрические эффекты, проявляющиеся на форме профилей спектральных линий, видны лишь при высоких значениях S/N , то есть доступны исследованиям на крупных телескопах. Для малых телескопов доступной является спектрополяриметрия с низким разрешением, когда можно исследовать эффекты в непрерывном спектре, например, особенности межзвездной и околозвездной поляризации. Поэтому здесь упомянем один из приборов, занимающих «нишу» между узкополосными фотополяриметрами и спектрополяриметрами умеренного разрешения, — спектрополяриметр HBS (Kawabata et al. 1999), разработанный для телескопа $D = 0.9$ м. 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 от длины волны у межзвездной и околозвездной поляризации различаются (Serkowski et al. 1975). Задача их разделения основана на связи длины волны максимума поляризации с отношением общего поглощения к селективному ($R = 5.5\lambda$). Если вблизи звезд дополнительно проявляются локальные эффекты, то $R > 3$, то есть $\lambda_{\max} > 0.55$. Следовательно, массовая спектрополяриметрия звезд, 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 Тельца доходит до 10%, а у Ве-звезд до 1%. При наблюдениях со средним спектральным разрешением поляризационные эффекты удается отнести к отдельным спектральным участкам или деталям. Например, у Ве-звезд степень поляризации эмиссионного спектра ниже (Panchuk et al. 2017b). С низким спектральным разрешением желательнее исследовать и собственную переменную поляризацию М-сверхгигантов (до 2%), вызванную гигантскими конвективными ячейками.

Знаменитый спектрополяриметр университета штата Висконсин, основанный на схеме спектрографа Boller and Chivens ($R \sim 800$), использовался на телескопах $D = 0.91$ и 1.0 м обсерваторий Pine Bluff и Ritter соответственно (Davidson et al. 2014).

4.8. Интерференционные спектральные приборы

Применение интерференционных спектрометров в астрономии основано на двух моментах. Во-первых, Fellgett (1958) отметил, что, если шум самого приемника преобладает, двухлучевой интерферометр более эффективен, чем монохроматор. Во-вторых, Jacquinet (1957) рассмотрел многолучевой интерферометр с эталоном Фабри–Перо в качестве монохроматора с высоким пропусканием. На этапе применения одноканальных приемников основной задачей являлось выделение одного из порядков эталона.

4.8.1. Сканирующий ИФП с ФЭУ

Метод исследования линий в звездных спектрах путем наклона интерферометра Фабри–Перо (ИФП) реализовали Geake and Wilcock (1957). Использовался двухпризменный 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 изменялся со временем сканирования 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.

4.8.2. 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. Tarasov (1968)). Затем Mertz (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 (1 : 18) фокусе телескопа $D = 0.6$ м. При малом разрешении для классификации спектров планировалось использовать непосредственно интерферограммы (наблюдения выполнялись в докомпьютерную эпоху). Серковский (Serkowski 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.

4.8.3. Многоканальные спектрографы с ИФП

Использование многоканальных систем в интерферометрических приборах высокого разрешения проиллюстрируем на двух примерах. Serkowski (1978) установил ИФП на входе эшелле-спектрометра касегреновского фокуса (1 : 13.5) 1.54-м телескопа. Излучение в области 4100–4400 Å выделялось гризменным узлом предварительной дисперсии (70 Å/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 Å, деление соседних порядков 0.62 Å на 4250 Å, что при обратной линейной дисперсии 3.4 Å/мм

соответствует пятипиксельному разделению соседних порядков ИФП при двухпиксельном диаметре изображения последних. Вакуумная камера с ИФП наклоняется при помощи прецизионного устройства в диапазоне $\pm 1^\circ$, полный цикл наблюдений составляет 20 экспозиций, при этом регистрируются точки спектра, отстоящие друг от друга на 0.03 Å. 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 шестой величины, соответствует ошибке лучевой скорости 10 м с^{-1} .

Второе обращение к интерферометрической технике в задаче измерения доплеровских сдвигов также принадлежит сотрудникам обсерватории Аризонского университета. McMillan et al. (1993) разработали оптоволоконный эшелле-спектрограф с матрицей ПЗС, где ИФП работал на внутренней установке, то есть размещался в коллимированном пучке. В спектральных порядках эшелле-спектра, перекрывающих диапазон 4250–4600 Å, одновременно регистрировались 350 порядков ИФП. На длине волны 4300 Å ширина порядка ИФП составляет 47 мÅ при расстоянии между порядками 0.64 Å. Доплеровские сдвиги в спектре звезды изменяют соотношение интенсивности порядков. Для простоты регистрировались только изменения скорости, то есть прибор работал как акселерометр. Калибровка аргоновой лампой обеспечивала точность до двух стомиллионных долей, что соответствует ошибке $\pm 6 \text{ м с}^{-1}$. Выявлены инструментальные вариации $\pm 27 \text{ м с}^{-1}$ на шкале несколько месяцев. Прибор использовался на телескопе $D = 0.9$ м.

4.8.4. Спектрографы с внешним интерферометром

Для анализа спектров протяженных объектов RANCHUK (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, в пиках аппаратной функции ИФП пропускает меньше света, чем интерферометр Майкельсона. Erskine (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 с^{-1}). По сравнению с гетеродинным голографическим спектрографом (Frandsen et al. 1993) рабочий диапазон прибора шире в десятки раз.

Как перспективное направление интерферометрия с внешней постдисперсией (externally dispersed interferometry, EDI) заслуживает отдельного рассмотрения. Здесь только отметим, что первое доплеровское обнаружение экзопланеты этим методом было выполнено на телескопе $D = 0.9 \text{ м}$ и затем подтверждено на больших телескопах (Ge et al. 2006). Полуамплитуда лучевой скорости звезды $m_V = 8^{\text{m}}05$ составила $63.4 \pm 2.0 \text{ м с}^{-1}$ с периодом 4.11 суток. Таким образом, обнаружен спутник с минимальной массой $m \sin i$, равной 0.49 массы Юпитера.

4.9. Спектрографы малых телескопов

В этом разделе упоминаются спектрографы, предназначенные для использования на малых телескопах ($D = [0.25; 0.4] \text{ м}$) с различными типами приемников и в различных сочетаниях с телескопом.

В обсерватории Канопус Хилл (университет Тасмания) в 1971 г. вступил в строй рефлектор $D = 0.4 \text{ м}$, оснащенный фокусом кудэ (1 : 33) (Castley 1972). Параметры спектрографа: $F_{\text{coll}} = 330 \text{ см}$, $d = 100 \text{ мм}$, две дифракционные решетки с размером заштрихованной области $152 \times 102 \text{ мм}$, 600 штр./мм (использовалась в первом порядке) и 1200 штр./мм (во втором порядке), две камеры, $F_{\text{cam}} = 122$ и 182 см , диаметр зеркал камер 76 см. Значения обратной линейной дисперсии составили $P = 2.4, 3.6, 9$ и 14 \AA/мм . Обращаем внимание, что диаметр зеркал камер превосходит диаметр главного зеркала телескопа, так что в целом стоимость спектрографа сравнима со стоимостью телескопа. Результаты фотографической спектроскопии ярких F-сверхгигантов южного неба можно найти в работе Castley and Watson (1980). В связи с возрастающей засветкой неба научные работы в обсерватории Канопус Хилл прекращены в 2013 году.

Для поиска полос воды (область 8200 \AA) в атмосфере Венеры (Gull et al. 1974) использовали стигматический эшелле-спектрограф ($R = 40\,000$) с ЭОП (электростатическая фокусировка, катод S-25). Для снижения вклада от спектра тропосферного водяного пара наблюдения проведены

с борта самолета на высоте 14.6 км в период элонгации Венеры (апрель 1972 г.), когда разность лучевой скорости атмосферы Венеры и теллурических абсорбций была максимальной. В качестве питающей оптики использовался телескоп $D = 0.25 \text{ м}$. Характеристики спектрографа: ньютоновский коллиматор, $d_{\text{coll}} = 150 \text{ мм}$; эшелле 79 штр./мм, $\text{tg } \theta_b = 2$, размер заштрихованной области $150 \times 300 \text{ мм}$, работает в главной плоскости ($2\theta = 12^\circ$); решетка скрещенной дисперсии 300 штр./мм, заштрихованная область $200 \times 250 \text{ мм}$. В этом примере стоимость спектрографа также превышает расходы на оптику телескопа.

Сегодня на рынке доступны спектрографы, ориентированные как на астрономов-профессионалов, так и на любителей. Эти приборы, устанавливаемые на телескопах $D = [0.2; 0.4] \text{ м}$, используются и в программах спектроскопического мониторинга ярких звезд (см., например, Miroschnichenko et al. (2013)).

Кассегреновский эшелле-спектрограф VACHES с матрицей ПЗС (Avila et al. 2007) представляет, по-видимому, коммерческий интерес, и характеристики прибора раскрыты не полностью: коллиматор 1 : 10, эшелле 79 штр./мм, $\text{tg } \theta_b = 2$, решетка скрещенной дисперсии, линзовая камера. На матрице ПЗС форматом 1530×1020 элементов (размер пикселя $9 \times 9 \text{ мкм}$) одновременно регистрируется 29 порядков спектра в диапазоне $3900\text{--}7500 \text{ \AA}$. Проекция входной щели на приемнике составляет 2.4 пикселя, спектральное разрешение $R = 19\,000$. На телескопе $D = 0.25 \text{ м}$ за 900 секунд накопления при качестве изображений $1''7$ регистрируется спектр звезды пятой величины с отношением $S/N = 50$. Пропускание спектрографа составляет 27% на 5040 \AA . Квантовая эффективность системы (атмосфера, телескоп, спектрограф, приемник) составляет 11%. Напомним, что спектрограф UVES VLT в тех же условиях дает 17%. Перед запуском в серию спектрограф был испытан в полевых условиях на телескопе $D = 0.5 \text{ м}$ (Kozłowski et al. 2014), где было показано, что ошибки лучевой скорости на короткой шкале ($\sigma_{V_r} = [1.5; 1.7] \text{ км с}^{-1}$) определяются нежесткостью стандартного адаптера и могут быть уменьшены. Спектрограф VACHES оснащен двумя щелями и оптимизирован для телескопа $D = 0.25 \text{ м}$ (1 : 10).

Для телескопа такого же диаметра разработан эшелле-спектрограф, ориентированный на исследование звезд $m_V < 6^{\text{m}}$ (Panchuk et al. 2015c). Линзовый коллиматор 1 : 4 формирует пучок $d = 30 \text{ мм}$, эшелле 75 штр./мм, $\text{tg } \theta_b = 2$, линзовая камера 1 : 2. Двухпиксельное спектральное

разрешение составляет $R = 16\,000$ при ширине нормальной щели $s = 4''$. Эшелле работает в автоколлимации ($\alpha = \beta = \theta_b$, вне главной плоскости, то есть $\gamma \neq 0$). В этом случае зависимость концентрации энергии вдоль порядка изменяется более резко, достигая в максимуме величины на 20–30% большей, чем в случае $\alpha > \theta_b > \beta$ и $\gamma = 0$, то есть в главной плоскости. Узлом скрещенной дисперсии является решетка 300 штр./мм, работающая в первом порядке. Последнее позволило конструктивно предусмотреть изменение γ (половина угла 2γ , измеряемого между осью коллиматора и линией «центр эшелле–центр решетки скрещенной дисперсии») с целью выведения избранной линии в максимум кривой концентрации энергии в эшелльном порядке. Например, при изменении угла γ от 6° до 8° , центральная длина волны в порядке с номером $m = 36$ изменяется от $\lambda_c = 6593 \text{ \AA}$ до $\lambda_c = 6564 \text{ \AA}$. Для такой конструкции оптимальной является эшелле R2 с плотностью 37.5 штр./мм, где длина порядка вдвое короче, и диапазон изменения γ будет вдвое меньшим. В качестве питающей оптики задействован телескоп Meade LXД55 ($D = 254 \text{ мм}$, $F = 1016 \text{ мм}$). Спектрограф, используемый в фокусе Ньютона, закреплен параллельно трубе телескопа.

Компанией Eaglewloptics (Switzerland) разработан компактный эшелле спектрограф SQUES ($R = 20\,000$).

Подвесной однопорядковый спектрограф DADOS не предназначен для достижения максимально высокого спектрального разрешения (решетка работает под прямым углом между падающим и дифрагированным пучками). Используются решетки 200 и 900 штр./мм, $F_{\text{coll}} = 80 \text{ мм}$ (1 : 10), $F_{\text{cam}} = 96 \text{ мм}$. С решеткой 900 штр./мм $P = 106 \text{ \AA/мм}$, щель 0.025 мм. С телескопом $D = 0.3 \text{ м}$ за 20 минут $S/N = 50$ для $m_V = 6^m$.

Подвесной однопорядковый спектрограф высокого разрешения LHIRES III построен по автоколлимационной схеме: один и тот же дублет служит коллиматором и камерой, $F = 200 \text{ мм}$. Предусмотрено использование сменных дифракционных решеток от 150 до 2400 штр./мм. Спектрограф оптимизирован для телескопа $D = 0.2 \text{ м}$ (1 : 10). С решеткой 2400 штр./мм и приемником с 9-микронным пикселем обеспечивается $R = 17\,000$. За час экспозиции для звезды пятой величины $S/N = 100$. Спектрограф активно использовался в программах мониторинга горячих звезд с эмиссией в H α .

Компания SBIG в 1990-х годах выпустила модель SGS, в которой две сменные решетки работают в схеме Эберта с небольшим сферическим зеркалом. В модели DSS7 оптика камеры и

коллиматора линзовая, $P = 600 \text{ \AA/мм}$. Компания оснащает спектрографы приемниками собственного производства, что позволило использовать метод цифровой стабилизации изображения.

Для телескопов 1 : 5 и 1 : 10 компанией Astro Spectroscopy Instruments EU (Потсдам) разработан миниатюрный спектрограф MiniSpec. Предусмотрены опции (комбинация ширины щели и плотности штрихов решетки), позволяющие работать на приемнике с 9-микронным пикселем с обратной линейной дисперсией $P = [0.2; 3.3] \text{ \AA/пиксель}$.

Для телескопа Celestron CPC 1100 ($D = 279 \text{ мм}$, $F = 2800 \text{ мм}$, Шмидт–Кассегрен) разработан автоколлимационный спектрограф (Panchuk and Verich 2015). Зеркальный объектив коллиматора/камеры $D = 45 \text{ мм}$, $F = 275 \text{ мм}$. Решетка 1800 штр./мм, (размер заштрихованной области $50 \times 50 \text{ мм}$) работает в первом порядке дифракции. Обратная линейная дисперсия в области желтого дублета ртути $P \sim 10 \text{ \AA/мм}$. Максимальное (теоретическое) двухпиксельное (20 мкм) спектральное разрешение $R = 28\,900$, что соответствует ширине щели $1''$. Спектрограф предназначен для мониторинга избранных линий в спектрах ярких ($m_V < 6^m$) переменных звезд разных типов с разрешением, типичным для Основного звездного спектрографа БТА (Panchuk et al. 2014), $R = 14\,000$.

В классе телескопов малого диаметра пока преобладают подвесные спектрографы в силу их малых габаритов и массы. Однако встречаются случаи и оптоволоконного сочетания, как правило, из финансовых соображений. Во-первых, при наличии лабораторного спектрографа его можно использовать и с телескопом. Например, в обсерватории университета Иллинойса (Спрингфилд⁶) телескоп $D = 0.51 \text{ м}$ оснащен спектрографом SE200 Echelette ($R \sim 20\,000$), выпускаемым Catalina Scientific Instruments для лабораторных работ (с оптоволоконным входом). Диспергирующий узел (эшелле и призма) работает в схеме Эберта ($F = 200 \text{ мм}$, 1 : 10). Используется также спектрограф Optomechanics 10C (разработка Optomechanics Research of Vail, AZ.), схема которого включает: сферический зеркальный коллиматор $F = 225 \text{ мм}$ (1 : 9), сменные решетки (от 300 до 1200 штр./мм), камеру $F = 135 \text{ мм}$ (1 : 2.8). Во-вторых, коммерческий оптоволоконный спектрограф проще адаптировать к малым телескопам, с известным разнообразием последних по типу монтажных и габаритным ограничениям. Оптоволоконный спектрограф eShel (Thizy and Cochard

⁶<https://www.uis.edu/>

2011) построен по схеме скрещенной дисперсии. Зеркальный коллиматор $F_{\text{coll}} = 125$ мм (1 : 5) питается через оптическое волокно (0.05 мм). Коллимированный пучок $d_{\text{coll}} = 25$ мм направляется на эшелле R2, элементом скрещенной дисперсии служит призма. В качестве камеры используется линзовый объектив $F_{\text{cam}} = 85$ мм (1 : 1.8). На приемнике размерами 13×9 мм регистрируется только видимый диапазон (4500–7000 Å), $R = 10\,000$. При качестве изображений $3''$ на телескопе $D = 0.2$ м (1 : 5.9) за час накопления сигнала достигается $S/N = 100$ для $m_V = 7^{\text{m}}1$.

Оптоволоконный однопорядковый спектрограф (схема Черни–Тёрнера) использовался на телескопе $D = 0.4$ м для исследования системы τ Boötis (Kaue et al. 2006). Параметры схемы: $F_{\text{coll}} = 762$ мм, $F_{\text{cam}} = 240$ мм, решетка 1800 штр./мм, $0.17 \text{ \AA}/\text{pix}$, одновременно регистрируется участок длиной 88 \AA . Проекция ядра оптоволокна составляет 4 пикселя (0.68 \AA), $R = 7500$. С такой неоптимальной для обнаружения экзопланет величиной спектрального разрешения удалось подтвердить параметры системы, выделяющейся большой амплитудой изменения лучевой скорости ($K = 471 \pm 10 \text{ м с}^{-1}$). Положение изображения звезды корректировалось 8 раз в секунду стандартными средствами компании SBIG.

5. ПЕРСПЕКТИВЫ

Анализ разнообразных технических решений и личный практический опыт позволяют выделить некоторые перспективные решения в технике и организации спектроскопии на телескопах средних и малых диаметров.

Прежде всего, это дальнейшая специализация инструментов. Очевидно, что оснащение среднего или малого телескопа одним прибором существенно экономит средства на обслуживание комплекса «телескоп–спектрограф» и облегчит переход на режим удаленного контроля. В обзоре Panchuk et al. (2020) обосновано предложение о разработке специализированного спектроскопического телескопа $D \sim 1.2$ м.

В технике оптоволоконной спектроскопии предпочтение отдается линзовым камерам, а системы Шмидта недооценены из-за потерь на центральном экранировании. Однако камеры эффективных спектрографов SOPHIE (Perruchot et al. 2008) — STELLA и HERCULES — выполнены по схеме «ломаный Шмидт», а потери на центральном экранировании компенсируются другими преимуществами (перезаполнение эшелле, ахроматичность камеры, снижение виньетирования, снижение стоимости при заданном d_{coll}). Напомним, что при замене спектрографа с линзовой камерой ELODIE

на SOPHIE, квантовая эффективность системы увеличилась в десять раз.

Необходимо развивать сочетание различных функций на одном оптическом элементе. Например, асферичность отражательных решеток позволяет построить зеркальные схемы, диапазон которых будет ограничиваться только параметрами приемника и оптических покрытий. В системах с эшелле асферическая отражательная решетка может функционировать как элемент скрещенной дисперсии. В оптоволоконном эшелле-спектрографе EMILIE (Bouchy et al. 1999) одна из поверхностей призмы двойного хода сделана асферической.

Для специализированного спектроскопического телескопа необязательно обеспечивать большое поле хороших изображений. Здесь достаточно использовать телескоп-светосборник (аналогично голландскому Light Collector (Lub 1979)). Для коррекции aberrаций в спектроскопическом телескопе САО РАН планируется использовать сегментированное зеркало.

Для средних и малых телескопов с высоким качеством оптики представляется перспективным использование дифракционно ограниченного спектрографа с одномодовым оптическим волокном. Однако следует оценить, в каких задачах, решаемых на таких телескопах, модальный шум является ограничивающим фактором.

Схемы спектрографа среднего разрешения с внешней постдисперсией (EDI) используются как с оптоволоконным сочетанием, так и в подвесном варианте.

В классе подвесных систем:

1. Незаслуженно забыты зеркальные схемы с низкой широкощельностью и компенсацией астигматизма (Schroeder 1967). По мере роста формата ПЗС-приемника, к этим схемам на телескопах $D \sim 1$ м состоится возврат. Для работ в наземном ультрафиолете можно построить чисто зеркальную систему с резателем изображения.
2. Не привлекла внимание астрономов схема спектрографа, где используется эшелле с переменной плотностью нарезки (Gerasimov et al. 1970, Nagulin et al. 1980). На основе такого решения для телескопа среднего диаметра может быть построен компактный подвесной спектрограф высокого разрешения с максимальной эффективностью.
3. Удачным решением оказались конструкции подвесных щелевых спектрографов серии Mark (Munari and Valisa 2014).

Общей проблемой является необходимость снижать вклад рассеянного света и бликов. Для двухволоконной схемы спектрографа предложено дополнительное спектральное устройство, выполняющее подготовку спектра сравнения (Panchuk et al. 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечислены основные типы спектральной аппаратуры телескопов малых и умеренных диаметров, указаны основные параметры избранных конструктивных решений. Приведен список литературы, позволяющей глубже познакомиться с проблемой.

Оцениваются некоторые перспективы развития данного аппаратно-методического направления.

В эпоху строительства больших телескопов интерес к проблеме аппаратного оснащения телескопов малых (менее 0.4 м) и умеренных (0.4–1.2 м) диаметров может показаться неактуальным. Однако даже поверхностная оценка возможностей современных инструментов указанных диаметров свидетельствует о неослабевающем внимании к их приборной базе. 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 спектральной аппаратуры телескопов малых и умеренных диаметров с кратким описанием особенностей работы этой аппаратуры или указанием соответствующей литературы. Несмотря на то, что некоторые изложенные 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.

Считаем, что аппаратное оснащение таких телескопов имеет большие резервы, состоящие в том числе в сочетании давно известных решений с новыми технологическими возможностями.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

В. Е. Панчук признателен правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 (№. 13.1902.21.0039). Работа В. Г. Ключковой выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект №. 20-19-00597. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение №. 05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. A. Abt, *Astrophys. J. Suppl.* **8**, 99 (1963).
2. H. A. Abt, *Astrophys. J.* **144** (4), 91 (2012).
3. V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, V. R. Amirkhanyan, and A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **71** (4), 479 (2016).
4. V. L. Afanasiev and A. A. Pimonov, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **13**, 76 (1981).
5. V. A. Albitzky and G. A. Shajn, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **92**, 771 (1932).
6. T. Andersen, *Messenger* **10**, 21 (1977).
7. T. Andersen, *Messenger* **16**, 37 (1979).
8. J. R. P. Angel, M. T. Adams, T. A. Boroson, and R. L. Moore, *Astrophys. J.* **218**, 776 (1977).
9. J. R. P. Angel and M. S. Gresham, *Astrophys. J.* **229**, 1074 (1979).
10. J. R. P. Angel and J. Landstreet, *Astrophys. J.* **165**, 171 (1971).
11. P. P. Argunov, N. S. Komarov, and V. A. Pozigun, *Solar System Research* **1**, 93 (1967).
12. A. Arnulf, D. Barbier, D. Chalonge, and R. Canavaggia, *J. des Observateurs* **19** (9), 149 (1936).
13. G. Avila, V. Burwitz, C. Guirao, et al., *Messenger* **129**, 62 (2007).
14. H. W. Babcock, *Lick Obs. Bull.* **19** (498), 41 (1939).
15. W. G. Bagnuolo, I. Furenlid, D. R. Gies, and D. J. Barry, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **102**, 604 (1990).
16. A. Baillet, D. Chalonge, and J. Cojan, *Annales d'Astrophysique* **15**, 144 (1952).
17. A. Baranne, N. Carozzi, G. Comte, et al., in *Proc. of the ESO/SRC/CERN on Conference on Research Programmes for the New Large Telescopes, Geneva, Switzerland, 1974*, Ed. by A. Reiz (1974), p. 231.
18. A. Baranne and M. Duchesne, in *Proc. of ESO/CERN conference on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes, Geneva, Switzerland, 1972*, Ed. by S. Lautsen and A. Reiz (1972), pp. 241–245.

19. A. Baranne, M. Mayor, and J. L. Poncet, *Comptes Rendus, Ser. B – Sci. Physiq.* **285** (4), 117 (1977).
20. A. Baranne, M. Mayor, and J. L. Poncet, *Vistas in Astronomy* **23**, 279 (1979).
21. A. Baranne, D. Queloz, M. Mayor, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **119**, 373 (1996).
22. S. I. Barnes, S. Gibson, K. Nieli, and D. Cochrane, *SPIE Conf. Proc.* **8446**, 844688 (2012).
23. D. J. Barry, W. G. Bagnuolo, Jr., and R. L. Riddle, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **114**, 198 (2002).
24. H. Barwig and R. Schoembs, *IAU Symp.*, No. 118, 61 (1986).
25. J. Baudrand and T. Bohm, *Astron. and Astrophys.* **259**, 711 (1992).
26. J. Baudrand and G. A. H. Walker, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **113** (785), 851 (2001).
27. W. I. Beavers and J. J. Eitter, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **89**, 733 (1977).
28. W. I. Beavers and J. J. Eitter, *IAU Symp.*, No. 118, 75 (1986).
29. W. I. Beavers, J. J. Eitter, P. H. Carr, and B. C. Cook, *Astrophys. J.* **238**, 349 (1980).
30. F. Bouchy, P. Connes, and J. L. Bertaux, *ASP Conf. Ser.* **185**, 22 (1999).
31. I. S. Bowen, *Astrophys. J.* **116**, 1 (1952).
32. P. B. Boyce, N. M. White, R. Albrecht, and A. Slettebak, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **85**, 91 (1973).
33. J. Breysacher, *Messenger* **5**, 3 (1976).
34. K. V. Bychkov, S. M. Morozova, and V. E. Panchuk, *Soviet Astronomy Letters* **4**, 199 (1978).
35. W. W. Campbell, *Astrophys. J.* **8**, 123 (1898).
36. J. C. Castley, *Publ. Astron. Soc. Australia* **2**, 137 (1972).
37. J. C. Castley and R. D. Watson, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **41**, 397 (1980).
38. E. L. Chentzov, *Izv. Krymskoj Astrophyz. Obs.* **109** (2), 152 (2013).
39. J. Dachs and T. Schmidt-Kaler, *Messenger* **7**, 9 (1976).
40. J. W. Davidson, K. S. Bjorkman, J. L. Hoffman, et al., *J. Astron. Instrumentation* **3** (3n04), id. 1450009 (2014).
41. B. Denby, R. Dalglish, V. Meadows, and K. N. R. Taylor, *IAU Symp.*, No. 118, 439 (1986).
42. R. P. Edwin, *Observatory* **109**, 173 (1989).
43. D. Enard, *Messenger* **17**, 32 (1979).
44. L. Epstein, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **79** (467), 132 (1967).
45. D. J. Erskine, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **115**, 255 (2003).
46. V. F. Esipov, in *Novaya tehnika v astronomii*, (Nauka, Leningrad, 1963), Iss. 1, p. 165.
47. D. Fabricant, P. Cheimets, N. Caldwell, and J. Geary, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **110**, 79 (1998).
48. C. Fehrenbach, *Annales d'Astrophysique* **10**, 257 (1947).
49. C. Fehrenbach and R. Burnage, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **43**, 297 (1981).
50. C. Fehrenbach and H. C. Chun, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **46**, 257 (1981).
51. P. Fellgett, *J. de Physique et le Radium* **19**, 187 (1958).
52. J. M. Fletcher, H. C. Harris, R. D. McClure, and C. D. Scarfe, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **94**, 1017 (1982).
53. S. Frandsen, N. Douglas, and H. Butcher, *Astron. and Astrophys.* **279**, 310 (1993).
54. I. Furenlid, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **96**, 325 (1984).
55. I. Furenlid and O. Cardona, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **100**, 1001 (1988).
56. J. Ge, J. van Eyken, S. Mahadevan, et al., *Astrophys. J.* **648** (1), 683 (2006).
57. J. E. Geake and W. L. Wilcock, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **116**, 561 (1956).
58. J. E. Geake and W. L. Wilcock, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **117**, 380 (1957).
59. F. M. Gerasimov, I. A. Tel'tevskij, S. V. Nesmelov, and V. P. Sergeev, *Opt.-mech. Prom.* **12**, 6 (1958).
60. F. M. Gerasimov, I. A. Tel'tevskij, S. N. Spizharskij, and S. V. Nesmelov, *Opt.-mech. Prom.* **3**, 47 (1957a).
61. F. M. Gerasimov, I. A. Tel'tevskij, S. N. Spizharskij, and S. V. Nesmelov, *Opt.-mech. Prom.* **4**, 57 (1957b).
62. F. M. Gerasimov, E. A. Yakovlev, I. V. Pejsahson, and B. V. Koshelev, *Optika i Spektroskopiya* **28**, 790 (1970).
63. S. Gibson, S. I. Barnes, J. Hearnshaw, et al., *SPIE Conf. Proc.* **8446**, 844648 (2012).
64. F. Giesekeing, *Sky and Telescope* **57**, 142 (1979a).
65. F. Giesekeing, *Messenger* **17**, 29 (1979b).
66. D. F. Gray, *The Observation and Analysis of Stellar Photospheres* (Wiley, New York, 1976).
67. D. F. Gray, in *Proc. of the 4th Int. Colloq. on Astrophysics on High resolution spectrometry, Trieste, 1978*, Ed. by M. Hack (Trieste Osservatorio, 1978), p. 268.
68. D. F. Gray, *IAU Symp.* No. 118, 401 (1986).
69. R. F. Griffin, *Astrophys. J.* **148**, 465 (1967).
70. R. F. Griffin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **145**, 163 (1969).
71. T. R. Gull, C. R. O'Dell, and R. A. R. Parker, *Icarus* **21** (3), 213 (1974).
72. S. A. Gulyaev, V. E. Panchuk, V. V. Pleshakov, and S. G. Pyatkes, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. обс.)* **22**, 3 (1986).
73. B. Gustafsson and P. E. Nissen, *Astron. and Astrophys.* **19**, 261 (1972).
74. J. S. Hall, *Astron. J.* **54** (1179), 187 (1949).
75. G. R. Harrison, *J. Optical Soc. of America* **39** (6), 413 (1949a).
76. G. R. Harrison, *J. Optical Soc. of America* **39** (7), 522 (1949b).
77. M. Harwit, *Applied Optics* **10** (6), 1415 (1971).
78. J. B. Hearnshaw, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **3**, 102 (1977).
79. J. B. Hearnshaw, S. I. Barnes, G. M. Kershaw, et al., *Experimental Astronomy* **13**, 59 (2002).
80. J. B. Hearnshaw, P. L. Cottrell, and R. Miles, *J. British Astron. Assoc.* **97**, 318 (1987).
81. W. A. Hiltner, *Science* **109**, 165 (1949).
82. W. A. Hiltner, *Astrophys. J.* **114**, 241 (1951).
83. W. A. Hiltner and A. D. Code, *J. Optical Soc. of America* **4** (3), 149 (1950).

84. A. A. Hoag and D. J. Schroeder, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **82**, 1141 (1970).
85. A.-M. Hubert-Delplace and H. Hubert, *An atlas of Be stars* (Paris-Meudon Obs., 1979).
86. D. M. Hunten, W. K. Wells, R. A. Brown, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **103**, 1187 (1991).
87. M. Imbert and L. Prévot, *Messenger* **25**, 6 (1981).
88. P. Jacquinot, *J. Optical Soc. of America* **44**, 761 (1957).
89. P. Jacquinot and C. Dufour, *J. Rech., Cent. Nat. Rech. Sci.* **6**, 91 (1948).
90. N. D. Kalinenkov and A. V. Kharitonov, *Trudy AFI AN KazSSR* **8**, 128 (1967).
91. K. S. Kawabata, A. Okasaki, H. Akitava, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **111**, 898 (1999).
92. T. G. Kaye, S. Vanaverbeke, and J. Innis, *J. British Astron. Assoc.* **116** (2), 78 (2006).
93. J. C. Kemp, J. B. Swedlund, J. Landstreet, and J. R. P. Angel, *Astrophys. J.* **161**, 77 (1970).
94. G. M. Kershaw and J. B. Hearnshaw, *Southern Stars* **33**, 89 (1989).
95. A. V. Kharitonov and V. G. Klochkova, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. обс.)* **3**, 91 (1972).
96. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, V. P. Romanenko, and I. D. Najdenov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 132 (2005).
97. N. S. Komarov and N. S. Pozigun, *Astron. Zh.* **45**, 133 (1968).
98. I. M. Kopylov, *Izv. Krymskoj Astrophyz. Obs.* **11**, 44 (1954).
99. I. M. Kopylov and N. V. Steshenko, *Izv. Krymskoj Astroph. Obs.* **33**, 308 (1965).
100. N. F. Kossova, A. M. Nizhin, and A. V. Smirnova, *Opt.-mech. Prom.* **8**, 35 (1958).
101. S. K. Kozłowski, M. Konacki, M. Ratajczak, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **443** (1), 158 (2014).
102. D. W. Kurtz, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **200**, 208 (1982).
103. A. Lallemand and M. Duchesne, *Publ. de l'Observatoire de Haute-Provence* **3** (50), 3 (1956).
104. D. Latham, in *Proc. of the 67th IAU Colloq. Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes, Zelenchukskaya, USSR, 1981*, Ed. by C. M. Humphries (Reidel, Dordrecht, 1982), p. 259 (Astrophysics and Space Science Library **92**).
105. D. W. Latham, in *Proc. of 40th IAU Colloq. on Astronomical Applications of Image Detectors with Linear Response*, Ed. by M. Duchesne and G. Lelievre (Observatoire de Paris-Meudon, 1977), p. 45.
106. G. Lemaître, *J. Optical Soc. of America* **66**, 1334 (1976).
107. G. Lemaître, in *Proc. of the 67th IAU Colloq. Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes, Zelenchukskaya, USSR, 1981*, Ed. by C. M. Humphries (Reidel, Dordrecht, 1981), p. 137 (Astrophysics and Space Science Library **92**).
108. G. Lemaître, in *Proc. of the 78th IAU Colloq. on Astronomy with Schmidt-type Telescopes, Asiago, Italy, 1983*, Ed. by M. Capaccioli, p. 533 (D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Boston, 1984).
109. W. Liller, *Applied Optics* **2**, 187 (1963).
110. V. P. Linnik, in *Novaya tehnika v astronomii*, Ed. by N. N. Michelson, (Nauka, Leningrad, 1963), No. 1, p. 176.
111. J. Lub, *Messenger* **19**, 1 (1979).
112. H. Mandel, *IAU Symp. No. 132*, 9 (1988).
113. B. Margon, H. C. Ford, J. I. Katz, et al., *Astrophys. J.* **230**, L41 (1979).
114. G. Marino, S. Catalano, A. Frasca, and E. Marilli, *Inf. Bull. Var. Stars* **4599**, 1 (1998).
115. N. U. Mayall, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **48** (281), 14 (1936).
116. N. U. Mayall, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **49**, 101 (1937).
117. M. Mayor, in *Proc. of 88th IAU Colloq. on Stellar Radial Velocities, Schenectady, USA, 1984*, Ed. by A. G. D. Philip and D. W. Latham, pp. 35–48 (L. Davis Press, Schenectady, 1985).
118. W. McClintock, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **91**, 712 (1979).
119. D. A. McDavid, *IAU Symp. No. 118*, p. 457 (1986).
120. C. D. McKeith, P. L. Dufton, and L. A. Kane, *Observatory* **98**, 263 (1978).
121. R. S. McMillan, T. Moore, M. L. Perry, and P. H. Smith, *Astron. J.* **403**, 801 (1993).
122. J. F. McNall, D. E. Michalski, and T. L. Miedaner, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **84** (497), 145 (1972).
123. A. B. Meinel, *Astron. J.* **68**, 285 (1963).
124. O. A. Mel'nikov and N. F. Kuprevich, *Astron. Zh.* **33**, 845 (1956).
125. O. A. Mel'nikov, N. F. Kuprevich, and L. N. Zhukova, *Sov. Astron.* **3**, 575 (1959).
126. L. Mertz, *J. de Physique et le Radium* **19** (3), 233 (1958).
127. H. T. Ming, D. A. Briotta, Jr., N. S. Kamath, and I. Harwit, *Applied Optics* **14**, 2533 (1975).
128. A. S. Miroshnichenko, A. V. Pasechnik, N. Manset, et al., *Astrophys. J.* **766** (2), 119 (2013).
129. L. V. Mirzoyan, *Commun. Byurakan Astrophys. Obs.* **16**, 41 (1955).
130. S. W. Mochnacki, S. Chew, W. Kunowski, et al., *IAU Symp. No. 118*, p. 461 (1986).
131. W. W. Morgan, P. C. Keenan, and E. Kellman, *An atlas of stellar spectra, with an outline of spectral classification* (Univ. Chicago Press, Chicago, 1943).
132. S. M. Morozova and V. E. Panchuk, *Soobshch. Spets. Astrofiz. Obs.* **22**, 27 (1978).
133. N. D. Morrison, *Bull. Amer. Astron. Soc.* **27** (1), 647 (1995).
134. U. Munari and M. G. Lattanzi, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **104**, 121 (1992).
135. U. Munari and P. Valisa, *Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **43** (3), 174 (2014).
136. K. A. Murdoch, J. B. Hearnshaw, and M. Clark, *Astron. J.* **413**, 349 (1993).

137. Yu. S. Nagulin, N. K. Pavlyucheva, and E. A. Yakovlev, *Optika i Spektroskopiya* **49** (5), 987 (1980).
138. T. Namioka, *J. Optical Soc. of America* **49**, 951 (1958).
139. P. E. Nissen, *Astron. and Astrophys.* **36**, 57 (1974).
140. P. E. Nissen, *Messenger* **9**, 12 (1977).
141. J. B. Oke, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **81** (478), 11 (1969).
142. V. E. Panchuk, Preprint No. 144, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs, Nizhny Arkhyz, 2000).
143. V. E. Panchuk, G. A. Chuntunov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 339 (2014).
144. V. E. Panchuk, E. V. Emelianov, V. G. Klochkova, and V. P. Romanenko, Preprint No. 195, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs, Nizhny Arkhyz, 2004).
145. V. E. Panchuk and V. G. Klochkova, *Bull. Crimean Astron. Obs.* **109**, 124 (2013).
146. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. E. Sachkov, and M. V. Yushkin, *Solar System Research* **49** (6), 420 (2015a).
147. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. E. Sachkov, et al., in *Abstracts of the Int. Conf. on The present and future of small and medium-size telescopes, Nizhny Arkhyz, Russia, 2015*, p. 70 (Nizhny Arkhyz, 2015b).
148. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Astronomy Reports* **61** (9), 820 (2017a).
149. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, et al., *J. Instrument Engineering* **60** (1), 53 (2017b).
150. V. E. Panchuk, V. V. Klochkova, V. G. Komarov, and D. V. Marchenko, in *Abstracts of the Int. Conf. on The present and future of small and medium-size telescopes, Nizhny Arkhyz, Russia, 2015*, p. 69 (Nizhny Arkhyz, 2015c).
151. V. E. Panchuk and Y. B. Verich, in *Abstracts of the Int. Conf. on The present and future of small and medium-size telescopes, Nizhny Arkhyz, Russia, 2015*, pp. 66–67 (Nizhny Arkhyz, 2015).
152. V. E. Panchuk, M. V. Yakopov, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Instruments and Experimental Techniques* **61** (4), 572 (2018).
153. V. E. Panchuk, Yu. Yu. Balega, V. G. Klochkova, and M. E. Sachkov, *Physics—Uspekhi (Advances in Physical Sciences)* **63** (6), 562 (2020).
154. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, V. G. Klochkova, et al., *Astrophysical Bulletin* **70** (2), 226 (2015d).
155. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and M. V. Yakopov, *Astrophysical Bulletin* **66** (3), 355 (2011).
156. S. Perruchot, D. Kohler, F. Bouchy, et al., *SPIE Conf. Proc.* **7014**, p. 7014J (2008).
157. E. Pickering, *Astronomische Nachrichten* **142**, 105 (1896).
158. E. C. Pickering, *Annals Astron. Obs. Of Harvard College* **26**, 1 (1891).
159. S. B. Pikelnier, *Izv. Krymskoj Astrofizicheskoi Obs.* **11**, 8 (1954).
160. A. F. Punanova and V. V. Krushinsky, *Izv. Krymskoj Astrofizicheskoi Observatorii* **109** (2), 51 (2013).
161. D. Queloz, *IAU Symp.*, No. 167, p. 221 (1995).
162. D. Queloz, M. Mayor, L. Weber, et al., *Astron. and Astrophys.* **354**, 99 (2000).
163. T. M. Rachkovskaya, *Izv. Krymskoj Astrophyz. Obs.* **109** (2), 118 (2013).
164. K. D. Rakos, W. W. Weiss, S. Muller, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **102**, 674 (1990).
165. G. Raskin and H. V. Winkel, *SPIE Conf. Proc.* **7014**, 178 (2008).
166. E. H. Richardson, *J. Roy. Astron. Soc. Canada* **62**, 313 (1968).
167. E. H. Richardson and G. J. Brealey, *J. Roy. Astron. Soc. Canada* **67**, 165 (1973).
168. A. W. Rodgers, R. Roberts, P. T. Rudge, and T. Stapinski, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **85** (505), 268 (1973).
169. S. Schectman, *SPIE Conf. Proc.* **445**, 128 (1984).
170. S. A. Schectman and W. A. Hiltner, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **88**, 960 (1976).
171. P. V. Scheglov (ed.) *The present and future of medium-size telescopes* (Izd. Inostr. liter., Moscow, 1960) [in Russian].
172. D. J. Schroeder, *Applied Optics* **6** (11), 1976 (1967).
173. D. J. Schroeder and C. M. Anderson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **83** (494), 438 (1971).
174. C. Schwab, S. G. Leon-Saval, C. H. Betters, et al., *IAU Symp.*, No. 293, pp. 403–406 (2014).
175. K. Serkowski, in *Proc. of the 4th Colloq. on Astrophys on High Resolution Spectrometry, Trieste, 1978*, Ed. by M. Hack, p. 245 (Osservatorio Astronomico di Trieste, 1978).
176. K. Serkowski, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **84**, 649 (1972).
177. K. Serkowski, D. S. Mathewson, and V. Ford, *Astrophys. J.* **196**, 261 (1975).
178. M. Slechta and P. Skoda, *Publ. Astron. Inst. Acad. Sciences Czech Republic* **90**, 1 (2002).
179. N. J. A. Sloane, T. Fine, P. G. Phillips, and M. Harwit, *Applied Optics* **8** (10), 2103 (1969).
180. K. G. Strassmeier, T. Granzer, M. Weber, et al., *Astronomische Nachrichten* **322** (5/6), 287 (2001).
181. K. G. Strassmeier, T. Granzer, M. Weber, et al., *Astronomische Nachrichten* **325** (6/8), 527 (2004).
182. O. Struve, *Astrophys. J.* **86**, 613 (1937).
183. O. Struve, G. Van Biesbroeck, and C. T. Elvey, *Astrophys. J.* **87**, 559 (1938).
184. J. J. Swift, M. Bottom, J. A. Johnson, et al., *J. Astron. Telescopes, Instruments, and Systems* **1**, 027002 (2015).
185. K. N. Tarasov, *Spectral'nye pribory* (Mashinostroenie, Leningrad, 1968).
186. O. Thizy and F. Cochard, *IAU Symp.* **272**, pp. 282–283 (2011).
187. J. Titus and W. W. Morgan, *Astrophys. J.* **92**, 256 (1940).
188. A. A. Tokovinin, *Sov. Astron.* **31** (1), 98 (1987).
189. A. V. Torres-Dodgen and W. B. Weaver, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **105**, 693 (1993).
190. L. Vanzì, J. Chacon, K. G. Helminiak, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **424**, 2770 (2012).
191. E. A. Vitrichenko, I. V. Volkov, G. I. Shanin, et al., *Sov. Astron.* **18**, 513 (1975).

192. B. Warner, IAU Symp., No. 118, pp. 3–15 (1986).
193. L. Weber, A. Blecha, G. Davignon, et al., SPIE Conf. Proc. **4009**, 61 (2000).
194. W. W. Weiss, M. Barylak, J. Hron, and J. Schmiedmayer, Publ. Astron. Soc. Pacific **93**, 787 (1981).
195. O. C. Wilson, Publ. Astron. Soc. Pacific **68** (403), 346 (1956).
196. B. Wolf, H. Mandel, O. Stahl, et al., Messenger **74**, 19 (1993).
197. F. B. Wood (ed.), Irish Astron. J., **5**, p. 61 (1958).
198. H. J. Wood, Publ. Astron. Soc. Pacific **80** (477), 647 (1968).
199. R. W. Wood, Phys. Rev. **48**, 928 (1935).

Stellar Spectroscopy Technique on Small- and Intermediate-Diameter Telescopes

V. E. Panchuk^{1,2}, V. G. Klochkova¹, and E. V. Emelianov¹

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

²North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017 Russia

We briefly present the history of technical solutions aimed at improving the efficiency of spectroscopy on small- and moderate-diameter telescopes. We assess the current state of spectroscopy techniques and some of the perspectives.

Keywords: *techniques: spectroscopic—telescopes*