

СОВРЕМЕННЫЙ ТЕЛЕСКОП

В.Г. Сурдин

MODERN TELESCOPE

V.G. Surdin

Дан краткий обзор современного состояния оптического телескопостроения и намечены направления его развития в ближайшие годы.

It is a brief review of the population of modern optical telescopes, and some thought about directions of their evolution in coming years.

Введение

Эволюция астрономических приборов и важнейшего из них – оптического телескопа, подобна эволюции биосферы: зародившись как простейший универсальный инструмент, телескоп за 400 лет неоднократно «мутировал» и, развиваясь в различных направлениях, дал множество узкоспециализированных типов, нацеленных на решение разнообразных задач. Prestиж национальной астрономии измеряется, прежде всего, количеством и качеством имеющихся у страны телескопов. Несмотря на развитие методов компьютерного моделирования и коммуникации (виртуальные телескопы и т. п.), без арсенала современных телескопов, установленных в лучших местах Земли и за пределами атмосферы, любая национальная астрономия обречена на прозябание.

История телескопа

Стекло было известно египтянам еще в 3800 г. до н. э., но оптические свойства стекла были полностью оценены лишь в эпоху Средневековья. Очки появились в Италии около 1300 г., а к началу XVI в. оптические центры возникли в Германии и Голландии. Первый телескоп был сделан в Голландии в 1608 г.; по-видимому, Ганс Липперсгей был первым, кто применил соответствующую комбинацию линз. Весной 1609 г. Галилей узнал о голландском изобретении и не имея детального описания сам за несколько недель разработал конструкцию и построил телескоп. Направив инструмент на небо, Галилей открыл новую эру в наблюдательной астрономии, которая продолжается до наших дней.

Конструкция телескопов-рефракторов быстро совершенствовалась, но все они страдали хроматической аберрацией: лучи разных цветов фокусировались на разном расстоянии от линзового объектива. Примерно в 1663 г. Исаак Ньютон обратился к зеркальным системам, поскольку лучи любого цвета отражаются от зеркала одинаково. Так началось развитие телескопов-рефлекторов. Около 1664 г. Джеймс Грегори предложил телескоп с главным параболическим зеркалом и вспомогательным эллиптическим. Эта схема свободна не только от хроматической, но и от сферической аберрации. Однако изготовить столь сложные зеркальные поверхности Грегори не смог. Ньютон разработал методы шлифовки и полировки сложных зеркал. В 1668 г. он построил первый телескоп-рефлектор длиной всего 16 см с параболическим зеркалом диаметром 3.1 см.

Упростив схему Грегори, он с помощью маленького плоского зеркала вывел фокус главного зеркала наружу сквозь отверстие в трубе телескопа. Ньютон делал зеркала из оптической бронзы, сплава меди с оловом, называемого «спекулум» за его блеск, сравнимый с блеском серебра. К сожалению, этот сплав из-за присутствия меди быстро тускнеет и требует переполіровки. Но его использовали для астрономических зеркал вплоть до 1850, когда изобрели метод серебрения стекла.

В течение XVIII в. наблюдался быстрый прогресс в изготовлении рефлекторов. Вильям Гершель создал в 1789 г. крупнейший для той эпохи телескоп системы Ньютона с зеркалом диаметром 122 см и фокусным расстоянием 12 м. Но в те же годы постепенно совершенствовалась и конструкция рефракторов. Важнейшим событием стало открытие ахроматического объектива, составленного из двух линз – выпуклой из легкого стекла крона и вогнутой из тяжелого флинта; такой «дублет» имеет значительно меньшую хроматическую аберрацию.

Современные телескопы-рефракторы мало изменились с той эпохи, достигнув в конце XIX в. своего максимального диаметра 1 м: линзы большого размера прогибаются под собственным весом. Зато телескопы-рефлекторы продолжили свой рост и технологическую эволюцию (табл. 1). Крупнейшим телескопом в мире с 1919 по 1948 гг. был 2.5-метровый рефлектор обсерватории Маунт-Вилсон (штат Калифорния). В 1948 г. был создан и до 1974 г. оставался крупнейшим в мире 5-метровый рефлектор обсерватории Маунт-Паломар (штат Калифорния). С 1974 по 1991 гг. крупнейшим был 6-метровый рефлектор БТА Российской академии наук, установленный в Специальной астрофизической обсерватории на Северном Кавказе. Это первый современный телескоп, поставленный на альтимутальную монтировку, имеющую вертикальную и горизонтальную оси вращения. Теперь по такой схеме строят все крупные телескопы.

В последние годы созданы телескопы нового поколения с апертурой 8–10 м. Если бы зеркало такого диаметра создавалось по старой технологии, оно весило бы сотни тонн. Поэтому используются новые технические принципы: главное зеркало делается либо составным из нескольких небольших зеркал, либо столь тонким, что само не может поддерживать свою форму и требует специальной механической системы. Крупнейшими сейчас являются Большой канарский телескоп GTC на о. Ла-Пальма и

Поколения телескопов-рефлекторов

	Главное зеркало		Монтировка	Башня	Место установки	Прототипы
	материал	форма				
I	металлический сплав спекулум	парабола	деревянная, альт-азимутальная	отсутствует	«во дворе»	20-футовый В. Гершеля (Ø=0.5 м) 1783 г.
II	стекло	парабола	жесткий экваториал	полусферический купол	близ университета	2.5 м, Маунт-Вилсон, 1917 г.
III	пирекс (Pyrex)	парабола, ячеистая структура	экваториал с компенсацией гнутя	купол, солнцезащитное покрытие	горы на континенте	5 м, Маунт-Паломар, 1948 г.
IV	ситалл, пирекс	гипербола, Ричи-Кретьен	металлическая альт-азимутальная	купол на высокой башне	высокие и сухие горы	3.5÷6 м, Чили, Аризона, БТА, 1975 г.
V	кварц, ULE, сервит, церодур, бериллий, алюминий	тонкое, гибкое (Ø=8÷9 м); составное, от 2 до 91 сегмента (Ø=10÷11 м)	короткая труба, активная оправа зеркала, сохраняющая форму его поверхности	раздвижной купол, прямоугольный или цилиндрический павильон, вентиляция башни	острова в океане, сухие горы	4÷11 м, Гавайи, Канары, Чили, США, Ю. Африка, 1980–2000 гг.
VI	Космические телескопы. Классический пример – «Хаббл» (NASA), Ø=2.4 м, 1990 г.					

телескопы-близнецы Кек-I и Кек-II в обсерватории Мауна-Кеа на о. Гавайи. Их 10-метровые зеркала собраны из 36 шестиугольных элементов диаметром 2 м. Компьютерная система постоянно регулирует их относительное положение для согласованной работы всех элементов как единого зеркала.

Эффективность телескопа

Возможности телескопа определяются не только диаметром его главного зеркала (D). Собранный телескопом свет, количество которого пропорционально площади зеркала (D^2), во-первых, необходимо зарегистрировать, а во-вторых, в зарегистрированном сигнале на фоне помех выделить полезный сигнал изучаемого источника. Поэтому для получения научного результата не менее, чем размер зеркала, важно качество приемника света, помещенного в фокусе телескопа. Мерой качества приемника служит его квантовый выход (QE – Quantum Efficiency), показывающий, сколько полезных единиц информации производит каждый упавший на приемник фотон. Эти единицы для каждого приемника свои: для глаза это ощущение вспышки света, для фотопластинки – почерневшее зерно эмульсии, для телекамеры или ПЗС-матрицы – один электронный отсчет.

Высокое качество изображения (четкость) требуется для изучения слабых источников излучения и их мелких угловых деталей. Мы убеждаемся в этом каждый раз, когда фокусируем бинокль до получения оптимально четкого изображения. Но даже идеально сфокусированный телескоп не может сделать изображение более четким (оно оказалось искаженным в результате атмосферного размытия). Поэтому очень важно для наблюдений атмосферное качество изображений в том месте, где установлен телескоп. Оно измеряется угловым размером изображения звезды (d), а точнее – площадью диска звездного изображения (d^2). Перемножив все три важнейших параметра, влияющих на качество телескопа, получим полезную относительную величину TQ – показатель качества телескопа: $TQ=QE \times (D/d)^2$. Как видно из

табл. 2, качество телескопов за предыдущие несколько десятилетий значительно улучшилось. В ближайшие годы (последняя строка таблицы) ожидается развитие этой тенденции.

Вторым важным показателем эффективности телескопа служит количество элементов изображения, которое одновременно фиксирует его приемник света. Лишь недавно электронные приемники (ПЗС) смогли превзойти по этому параметру фотопластинку; их рост интенсивно продолжается (табл. 2).

Таблица 2

Год	D, см	d, угл. сек	Приемник света	Квантовый выход (QE, %)	Показатель качества телескопа (TQ)	Количество элементов изображения
1610	5	15	глаз	3	0,3	3×10^6
1700	22	4	глаз	3	90	3×10^6
1800	120	3	глаз	3	5000	3×10^6
1920	250	1.5	фото	0,2	6000	10^7
1960	500	1.0	фото	1	3×10^5	10^8
1980	600	1.0	ПЗС	80	3×10^7	10^5
2000	1000	0.02	ПЗС	80	2×10^{11}	4×10^6
2020 ?	4000	0.003	ПЗС	80	1×10^{14}	10^{10}

4. Телескопы-рекордсмены

Важнейшие достижения в оптической астрономии, как правило, связаны с появлением телескопов-рекордсменов. Строительство каждого крупнейшего для своей эпохи телескопа через короткое время принципиально меняло наши представления о Вселенной: достаточно вспомнить телескопы Галилея и Гершеля, 100-дюймовый телескоп обсерватории Маунт-Вилсон и 200-дюймовый Маунт-Паломарский инструмент. За последние годы, благодаря работе космического телескопа «Хаббл» и гигантских наземных рефлекторов диаметром 8–10 м, в наблюдательной астрономии произошел сильнейший рынок, далеко продвинувший наши представления о формировании звезд и планет, об эволюции галактик и ранней Вселенной. Поэтому, чтобы представить себе современную мощь и ближайшее будущее оптической

Крупнейшие телескопы-рефлекторы

Название телескопа	$D_{\text{эф}}$, м	Оптическая система, главное зеркало	Расположение	Широта, долгота, высота	Начало наблюдений
Large Binocular Telescope (LBT)	11.9	Грегори, 2 монолитных зеркала диаметром по 8.4 м	Маунт Грэхем, Аризона	32°42' N, 109°53' W 3221 м	2008
Gran Telescopio Canarias (GTC)	10.0	Ричи-Крестьян, гиперболическое зеркало из 36 сегментов	Ла Пальма, Канарские о-ва	28°45' N, 17°54' W 2275 м	2009
Keck 1	9.8	Кассегрен, параболическое зеркало из 36 сегментов	Мауна Кеа, Гавайские о-ва	19°49' N, 155°28' W 4123 м	1993
Keck 2	9.8				1996
Hobby-Eberly Telescope (HET)	9.2	Сфера из 91 сегмента (11.1×9.8 м) + подвижных 4-зерк. корректор ПФ. Главное зеркало движется только по азимуту	Маунт Фоулкс, Техас	30°41' N, 104°01' W 2071 м	1997
Southern-African Large Telescope (SALT)	9.2		Сазерлэнд, Ю. Африка	32°23' S, 20°49' E 1798 м	2005
VLT, UT1	8.2	Ричи-Крестьян, тонкое монолитное зеркало	Very Large Telescope (ESO) Серро Параналь, Чили	24°38' S, 70°24' W 2635 м	1998
VLT, UT2	8.2				1999
VLT, UT3	8.2				2000
VLT, UT4	8.2				2001
Subaru Telescope	8.2	Ричи-Крестьян тонкое монолитное зеркало	Мауна Кеа, Гавайские о-ва	19°50' N, 155°29' W 4139 м	1999
Gemini North Telescope (GNT)	8.1	Ричи-Крестьян	Мауна Кеа, Гавайские о-ва	19°49' N, 155°28' W 4214 м	2000
Gemini South Telescope (GST)	8.1	Ричи-Крестьян	Серро Пашон, Чили	30°14' S, 70°43' W 2715 м	2001
Magnum Mirror Telescope (MMT)	6.5	Кассегрен, монолитное ячеистое зеркало	Маунт Хопкинс, Аризона	31°41' N, 110°53' W 2606 м	2000
Magellan 1	6.5	Грегори, Кассегрен монолитное ячеистое зеркало	Лас Кампанас, Чили	29°00' S, 70°42' W 2282 м	2000
Magellan 2	6.5				2002
Большой телескоп альт-азимутальный (БТА)	6.0	Кассегрен, монолитное толстое зеркало из пирекса	г. Пастухова, Кавказ	43°39' N, 41°26' E 2070 м	1975
Large Zenith Telescope (LZT)	6.0	Параболоид из жидкой ртути + корректор ПФ	Мэйпл Ридж, Канада	49°17' N, 122°34' W 395 м	2001
G. E. Hale 200-inch Telescope	5.0	Кассегрен, монолитное ячеистое зеркало из пирекса	Маунт Паломар, Калифорния	33°21' N, 116°52' W 1706 м	1948
Multiple Mirror Telescope (MMT)	4.5	6 зеркал по 1,8 м на одной альт-азимут. монтировке	Маунт Хопкинс, Аризона	31°41' N, 110°53' W 2606 м	1979, закрыт в 1998
Southern Observ. Astrophysical Research	4.2	Ричи-Крестьян	SOAR, Серро Пашон, Чили	30°21' S, 70°49' W 2701 м	2002
«William Herschel» Telescope	4.2	Кассегрен	ВНТ, Ла Пальма, Канарские о-ва	28°46' N, 17°53' W 2332 м	1987
«V. M. Blanco» Telescope (CTIO 4-m)	4.0	Ричи-Крестьян	Серро Тололо, Чили	30°10' S, 70°49' W 2215 м	1976
Anglo-Australian Telescope (AAT 3.9-m)	3.9	Ричи-Крестьян	г. Сайдинг Спринг, Австралия	31°17' S, 149°04' E 1130 м	1974
«N. U. Mayall» Reflector (KPNO 4-m)	3.8	Ричи-Крестьян	Китт Пик, Аризона, США	31°58' N, 111°36' W 2120 м	1973
United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT 3.8-m)	3.8	Кассегрен	Мауна Кеа, Гавайские о-ва	19°50' N, 155°28' W 4194 м	1978
Advanced Electro-Optical System (AEOS 3.6-m)	3.6	Кассегрен	Халеакала, Гавайские о-ва	20°42' N, 156°15' W 3058 м	2000
Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT 3.6-m)	3.5	Кассегрен	Мауна Кеа, Гавайские о-ва	19°49' N, 155°28' W 4200 м	1979
Telescopio Nazionale Galileo 3.6-m	3.5	Ричи-Крестьян	Ла Пальма, Канарские о-ва	28°45' N, 17°54' W 2370 м	1998
ESO 3.6-m	3.5	Ричи-Крестьян	Ла Силья, Чили	29°15' S, 70°43' W 2387 м	1977
Calar Alto Observatory 3.5-m Telescope	3.5	Ричи-Крестьян	Калар Альто, Испания	37°13' N, 02°33' W 2168 м	1984
New Technology Telescope (NTT 3.5-m)	3.5	Ричи-Крестьян	Ла Силья, Чили	29°16' S, 70°44' W 2353 м	1989
Astrophysics Research Consortium	3.5	Ричи-Крестьян	ARC 3.5-m Алаче Поинт, Нью Мексико	32°47' N, 105°49' W 2800 м	1994
Wisconsin-Indiana-Yale-NOAO Telescope	3.5	Ричи-Крестьян	WYUN 3.5-m Китт Пик, Аризона	31°57' N, 111°36' W 2089 м	1994
Starfire Optical Range 3.5-m Reflector	3.5	Кассегрен	База ВВС Киртлэнд, Нью Мексико	34°58' N, 106°28' W 1876 м	1994
«C. D. Shane» 120-inch Telescope	3.0	Кассегрен	Маунт Гамильтон, Калифорния	37°21' N, 121°38' W 1290 м	1959

Таблица 3, продолжение

NASA Infrared Telescope Facility (IRTF)	3.0	Кассегрен	Мауна Кеа, Гавайские о-ва	19°50' N, 155°28' W 4208 м	1979
3-m Liquid Mirror Telescope (NODO)	3.0	Параболоид из жидкой ртути + корректор ПФ	Клаудкрофт, Нью Мексико	32°58' N, 105°44' W 2758 м	1996
«H. J. Smith» 107-inch Telescope	2.7	Ричи-Крегъен	Маунт Лок, Техас	30°40' N, 104°01' W 2075 м	1969
«Г. А. Шайн» 2.6-м	2.6	Кассегрен	пос. Научный, Крым, Украина	44°44' N, 34°00' E 605 м	1960
Byurakan 2.6-m Reflector	2.6	Кассегрен	гора Арагац, Армения	40°20' N, 44°18' E 1406 м	1976
Nordic Optical Telescope (NOT)	2.5	Ричи-Крегъен	Ла Пальма, Канарские о-ва	28°45' N, 17°53' W 2382 м	1989
«Irenee Du Pont» 100-inch Telescope	2.5	Ричи-Крегъен	Лас Кампанас, Чили	29°00' S, 70°42' W 2282 м	1976
«Isaac Newton» Telescope (98-inch INT)	2.5	Кассегрен	Ла Пальма, Канарские о-ва	28°46' N, 17°53' W 2336 м	1984
Hooker 100-inch Telescope	2.5	Кассегрен	Маунт Вилсон, Калифорния	34°13' N, 118°03' W, 1742 м	1917
Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy	2.5	Кассегрен	Борт самолета Boeing 747 SP, «SOFIA»	Высота полета ок. 13 км	2004
Sloan 2.5-m Reflector	2.5	Ричи-Крегъен	Апаче Пойнт, Нью Мексико	32°47' N, 105°49' W 2800 м	1998
Hubble Space Telescope (HST)	2.4	Ричи-Крегъен	Околосемная орбита	600 км от поверхности Земли	1990
Hiltner 2.3-m Telescope	2.3	Ричи-Крегъен	Китт Пик, Аризона	31°58' N, 111°36' W 1939 м	1986
«Vainu Bappu» 2.3-m Telescope	2.3	Кассегрен	Кавалур, Тамил Наду, Индия	12°35' N, 78°50' E 725 м	1985

астрономии, следует познакомиться с крупнейшими телескопами и с планами строительства в ближайшие годы еще более крупных. В табл. 3 собраны сведения о крупнейших в мире рефлекторах по состоянию на конец 2011 г., включая эффективный диаметр их главного зеркала или системы зеркал ($D_{эф}$) и наличие корректора первичного фокуса (ПФ).

В ближайшие годы рост диаметров телескопов продолжится в основном за счет составных и мозаичных зеркал, но не исключено, что монолитные тонкие (~10 см) зеркала эволюционируют до сверхтонких (~1 см). Уже детально проработаны проекты телескопов диаметром 30–40 м, обдумывается и строительство 100-метрового телескопа. Их объективы будут созданы по уже оправдавшей себя мозаичной технологии: главное зеркало будет собрано из ~ 10^3 однотипных элементов. Разумеется, каждый из этих гигантов будет иметь системы активной и адаптивной оптики.

Отдельный интерес представляют специализированные телескопы – солнечные и обзорные, имеющие большое поле зрения. Оба эти направления сейчас быстро эволюционируют. Диаметры солнечных телескопов продолжают расти (табл. 4). В инструментах умеренного размера используются традиционные методы повышения качества изображений Солнца, т. е. строятся вакуумные телескопы, а также телескопы, трубы которых заполнены гелием. Однако новые крупные солнечные инструменты создаются с открытой трубой и системой адаптивной оптики. По своей конструкции они резко отличаются от традиционных неподвижных (вертикальных, горизонтальных, полярных) солнечных телескопов и все больше напоминают «ночные» инструменты. Например, перспективные конструкции – Advanced Technology Solar Telescope и European Solar

Telescope – это альт-азимутальные инструменты с объективами диаметром 4 м.

Таблица 4

Крупнейшие солнечные телескопы. Башенные, с целостом (кроме телескопов обсерватории Биг Бер). В – вакуумный; А – адаптивный; Э – экваториальная монтировка.

Диаметр, метры	Обсерватория	Расположение	Год сооруж.
1.61	Китт-Пик	Тусон, Аризона	1962
1.60 Э	Биг Бер	оз. Big Bear, Калифорния	2009
1.52 В	Сакраменто-Пик	Санспот, Нью-Мексико	1969
1.00	Астрофизическая (КрАО)	Крым, Украина	1975
1.00 А, В	Шведский солнечный телескоп, SST	о. Пальма, Канары	2002
0.90	Китт-Пик, 2 дополнительных телескопа в общем корпусе с телескопом 1.61 м	Тусон, Аризона	1962
0.90	Тейде, телескоп THEMIS	о. Тенерифе, Канары	2001
0.76 В	Большой солнечный вакуумный телескоп Байкальской астрофизической обсерватории	пос. Листвянка (Байкал, близ Иркутска), Россия	1980
0.70 В	Китт-Пик	Тусон, Аризона	1973
0.70 В	Институт физики Солнца, ФРГ	о. Тенерифе, Канары	1989
0.66	Митака	Токио, Япония	1920
0.65 В, Э	Биг Бер, демонтирован в 2006 г.	оз. Big Bear, Калифорния	1969
0.60	Медонская обсерватория	Медон, Франция	1968
0.48 В	Институт физики Солнца, Швеция	о. Пальма, Канары	1985
он же	передан в Chabot Space Center	Окленд, Калифорния	2001

Современные обзорные телескопы – в большинстве своем классические широкоугольные камеры

Шмидта (табл. 5). Однако их дальнейший рост ограничен диаметром предобъективной коррекционной пластины (<1.5 м). Поэтому обзорные телескопы нового поколения, такие как Large Synoptic Survey Telescope диаметром 8.4 м, сочетают в себе зеркальный вариант камеры Шмидта с линзовым корректором вблизи фокуса.

Таблица 5

Крупнейшие камеры Шмидта.
Указан диаметр коррекционной пластинки и зеркала

Диаметр, метры	Обсерватория	Местонахождение	Год сооружения (реконструкции)
1.3–2.0	Карла Шварцшильда	Таутенбург, Германия	1960
1.2–1.8	Паломарская	гора Паломар, Калифорния	1948/1975
1.2–1.8	Англо-Австралийская	Сайдинг-Спринг, Австралия	1973
1.1–1.5	Астрономическая	Токио, Япония	1975
1.0–1.6	Европейская южная	Ла-Силья, Чили	1971

Необычные телескопы

Отдельное направление эволюции телескопа, возникшее в самое последнее время – это телескопы удаленного доступа и телескопы-роботы. Удаленные телескопы, установленные в необжитых местах и управляемые через компьютерные сети, позволяют существенно снизить расходы на обслуживание обсерватории и ее персонала, обеспечивают бытовой комфорт наблюдателям. Использование таких телескопов может быть как персональным (один наблюдатель или одна группа) так и коллективным – через систему заказов на проведение конкретных наблюдений. Некоторые весьма крупные телескопы удаленного доступа предназначены специально для любителей астрономии. Самые известные среди них – два 2-метровых телескопа Фолкеса, созданные на средства английского математика и бизнесмена Мартина Фолкеса (Martin C. Faulkes) и установленные на Гавайях и в Австралии. К ним имеют доступ школьники всего мира.

Телескопы-роботы тоже, как правило, управляются дистанционно, однако их назначение в том, чтобы вообще исключить человека-оператора из процесса наблюдения. Это необходимо, если наблюдаются быстротечные явления. Например, оптическое отождествление объектов, порождающих мощные гамма-всплески, потребовало создания телескопов, способных наводиться на нужный участок неба за несколько секунд. Крупных систем с такими возможностями пока нет, но и телескопы диаметром 30–50 см достаточны для обнаружения наиболее

ярких объектов. Очевидно, весь процесс наблюдений, включая получение информации о всплеске, наведение телескопа, регистрацию и предварительный анализ изображения, должен быть автоматизирован. В конце 1990-х годов введены в действие несколько роботизированных систем, предназначенных не только для решения указанной выше задачи, но и для фиксации на небе преходящих событий всякого рода.

Наконец, в эволюции телескопов наметился «социальный» аспект – отдельные инструменты стали объединяться в системы, образуя оптические интерферометры. Это дает большой выигрыш в угловой разрешающей способности, но требует усилий по поддержанию взаимной когерентности собранных пучков света в условиях нестабильной атмосферы. На поверхности Земли работает уже дюжина подобных систем, включающих даже телескопы предельно большого диаметра (Keck Interferometer, Very Large Telescope Interferometer). Однако идеальным местом для развертывания оптических интерферометров является космическое пространство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Димитров Г., Бэкер Д. Телескопы и принадлежности к ним. М.-Л.: Гостехиздат, 1947. 308 с.
- Максутов Д.Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. М.: Наука, 1984. 272 с.
- Михельсон Н.Н. Оптические телескопы: теория и конструкция. М.: Наука, 1976. 512 с.
- Небо и телескоп. Ред.-сост. В.Г. Сурдин. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
- Оптические и инфракрасные телескопы 90-х годов / Под ред. А. Хьюит. М.: Мир, 1983. 296 с.
- Пономарев Д.Н. Астрономические обсерватории Советского Союза. М.: Наука, 1987. 208 с.
- Современные телескопы / Под ред. Дж. Бербиджа и А. Хьюит. М.: Мир, 1984. 312 с.
- Теребиж В.Ю. Современные оптические телескопы. М.: Физматлит, 2005. 80 с.
- Токовинин А.А. Звездные интерферометры. М.: Физматлит, 1988. 160 с.
- Уокер Г. Астрономические наблюдения. М.: Мир, 1990. 352 с.
- Щеглов П.В. Проблемы оптической астрономии. М.: Наука, 1980. 272 с.
- King H.C. The History of the Telescope. London: Griffin, 1955. 456 p.
- Schroeder D.J. Astronomical Optics. San Diego: Academic Press., 2000. 478 p.

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга (МГУ), Москва