

Б. А. Воронцов-Вельяминов  
Е. К. Страут

# АСТРОНОМИЯ

Учебник

Рекомендовано  
Министерством образования и науки  
Российской Федерации

4-е издание, стереотипное



ВЕРТИКАЛЬ

МОСКВА



2017

БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ

# 11

К Л А С С



УДК 373.167.1:52  
ББК 22.6я721  
В75

**Воронцов-Вельяминов, Б. А.**

В75      **Астрономия. Базовый уровень. 11 кл. : учебник / Б. А. Воронцов-Вельяминов, Е. К. Страут. — 4-е изд., стереотип. — М. : Дрофа, 2017. — 238, [2] с. : ил., 8 л. цв. вкл.**

**ISBN 978-5-358-18872-3**

Настоящая книга является переработанным вариантом широко известного учебника Б. А. Воронцова-Вельяминова «Астрономия. 11 класс». В нем полностью сохранены структура и методология изложения материала.

Учебник образует завершённую предметную линию.

Содержание учебника приведено в соответствие с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта среднего (полного) общего образования. Курс астрономии, изложенный в учебнике, рекомендуется использовать в классах естественно-научного профиля в качестве предмета по выбору.

**УДК 373.167.1:52  
ББК 22.6я721**

ISBN 978-5-358-18872-3

© ООО «ДРОФА», 2014



# I. ВВЕДЕНИЕ

## § 1. ПРЕДМЕТ АСТРОНОМИИ

---

### 1. Что изучает астрономия. Её значение и связь с другими науками

Астрономия является одной из древнейших наук, истоки которой относятся к каменному веку (VI—III тысячелетия до н. э.).

**Астрономия<sup>1</sup> изучает движение, строение, происхождение и развитие небесных тел и их систем.**

Человека всегда интересовал вопрос о том, как устроен окружающий мир и какое место он в нём занимает. У большинства народов ещё на заре цивилизации были сложены особые — космологические — мифы, повествующие о том, как из первоначального хаоса постепенно возникает космос (порядок), появляется всё, что окружает человека: небо и земля, горы, моря и реки, растения и животные, а также сам человек. На протяжении тысячелетий шло постепенное накопление сведений о явлениях, которые происходили на небе.

Оказалось, что периодическим изменениям в земной природе сопутствуют изменения вида звёздного неба и видимого движения Солнца. Вычислить момент наступления определённого времени года было необходимо для того, чтобы в срок провести те или иные сельскохозяйственные работы: посев, полив, уборку урожая. Но это можно было сделать лишь при использовании календаря, составленного по многолетним наблюдениям положения и движения Солнца и Луны. Так необ-

---

<sup>1</sup> Это слово происходит от двух греческих слов: *astron* — звезда, светило и *νόμος* — закон.

ходимость регулярных наблюдений за небесными светилами была обусловлена практическими потребностями счёта времени. Строгая периодичность, свойственная движению небесных светил, лежит в основе основных единиц счёта времени, которые используются до сих пор, — сутки, месяц, год.

Простое созерцание происходящих явлений и их наивное толкование постепенно сменялись попытками научного объяснения причин наблюдаемых явлений. Когда в Древней Греции (VI в. до н. э.) началось бурное развитие философии как науки о природе, астрономические знания стали неотъемлемой частью человеческой культуры. Астрономия — единственная наука, которая получила свою музу-покровительницу — Уранию.

С самых древних времён развитие астрономии и математики было тесно связано между собой. Вы знаете, что в переводе с греческого название одного из разделов математики — геометрии — означает «землемерие». Первые измерения радиуса земного шара были проведены ещё в III в. до н. э. на основе астрономических наблюдений за высотой Солнца в полдень. Необычное, но ставшее привычным деление окружности на  $360^\circ$  имеет астрономическое происхождение: оно возникло тогда, когда считалось, что продолжительность года равна 360 суткам, а Солнце в своём движении вокруг Земли каждые сутки делает один шаг — градус.

Астрономические наблюдения издавна позволяли людям ориентироваться в незнакомой местности и на море. Развитие астрономических методов определения координат в XV—XVII вв. в немалой степени было обусловлено развитием мореплавания и поисками новых торговых путей. Составление географических карт, уточнение формы и размеров Земли на долгое время стало одной из главных задач, которые решала практическая астрономия. Искусство прокладывать путь по наблюдениям за небесными светилами, получившее название *навигация*, сначала использовалось в мореходном деле, затем в авиации, а теперь и в космонавтике.

Вопрос о положении Земли во Вселенной, о том, неподвижна она или движется вокруг Солнца, в XVI—XVII вв. приобрёл важное значение как для астрономии, так и для миропонимания. Гелиоцентрическое учение *Николая Коперника* явилось не только важным шагом в решении этой научной проблемы, но и способствовало изменению стиля научного мышления, открыв новый путь к пониманию происходящих явлений.

Астрономические наблюдения за движением небесных тел и необходимость заранее вычислять их расположение сыграли важную роль в развитии не только математики, но и очень важного для практической деятельности человека раздела физики — механики. Выросшие из единой когда-то науки о природе — философии — астрономия, математика и физика никогда не теряли тесной связи между собой. Взаимосвязь этих наук нашла непосредственное отражение в деятельности многих учёных. Далекое не случайно, например, что **Галилео Галилей** и **Исаак Ньютон** известны своими работами и по физике, и по астрономии. К тому же Ньютон является одним из создателей дифференциального и интегрального исчисления. Сформулированный им же в конце XVII в. закон всемирного тяготения открыл возможность применения этих математических методов для изучения движения планет и других тел Солнечной системы. Постоянное совершенствование способов расчёта на протяжении XVIII в. вывело эту часть астрономии — *небесную механику* — на первый план среди других наук той эпохи.

Много раз в истории развития науки отдельные мыслители пытались ограничить возможности познания Вселенной. Пожалуй, последняя такая попытка случилась в XIX в. незадолго до открытия спектрального анализа. «Приговор» был суров: «Мы представляем себе возможность определения их (небесных тел) форм, расстояний, размеров и движений, но никогда, никакими способами мы не сможем изучить их химический состав...» (*О. Конт*).

Открытие спектрального анализа и его применение в астрономии положило начало широкому использованию физики при изучении природы небесных тел и привело к появлению нового раздела науки о Вселенной — *астрофизики*. В свою очередь, необычность с «земной» точки зрения условий, существующих на Солнце, звёздах и в космическом пространстве, способствовала развитию физических теорий, описывающих состояние вещества в таких условиях, которые трудно создать на Земле.

Более того, в XX в., особенно во второй его половине, достижения астрономии снова, как и во времена Коперника, привели к серьёзным изменениям в научной картине мира, к становлению представлений об эволюции Вселенной. Эти представления составляют основу современной *космологии*. Оказалось, что Вселенная, в которой мы сегодня живём, не-

сколько миллиардов лет тому назад была совершенно иной — в ней не существовало ни галактик, ни звёзд, ни планет. Для того чтобы объяснить процессы, происходившие на начальной стадии её развития, понадобился весь арсенал современной теоретической физики, включая теорию относительности, атомную физику, квантовую физику и физику элементарных частиц.

События, которые произошли в науке за последние десятилетия, показали, что неразрывная связь, существующая между астрономией и физикой, позволяет успешно решать многие проблемы, волнующие человечество. Далеко не случайно, что в первые годы XXI в. три Нобелевских премии по физике были присуждены учёным за исследования по астрофизике и космологии.

В астрономии, как и во многих других науках, всё больше используются компьютеры для решения задач самого разного уровня — от управления телескопами до исследования процессов эволюции планет, звёзд и галактик.

Развитие ракетной техники позволило человечеству выйти в космическое пространство. С одной стороны, это существенно расширило возможности исследования всех объектов, находящихся за пределами Земли, и привело к новому подъёму в развитии небесной механики, которая успешно осуществляет расчёты орбит автоматических и пилотируемых космических аппаратов различного назначения. С другой стороны, методы дистанционного исследования, пришедшие из астрофизики, ныне широко применяются при изучении нашей планеты с искусственных спутников и орбитальных станций. Результаты исследований тел Солнечной системы позволяют лучше понять глобальные, в том числе эволюционные, процессы, происходящие на Земле. Вступив в космическую эру своего существования и готовясь к полётам на другие планеты, человечество не вправе забывать о Земле и должно в полной мере осознать необходимость сохранения её уникальной природы.

## 2. Структура и масштабы Вселенной

Вы уже знаете, что наша Земля со своим спутником Луной, другие планеты и их спутники, кометы и малые планеты обращаются вокруг Солнца, что все эти тела составляют **Солнечную систему**. В свою очередь, Солнце и все другие звёзды,

видимые на небе, входят в огромную звёздную систему — нашу **Галактику**. Самая близкая к Солнечной системе звезда находится так далеко, что свет, который распространяется со скоростью 300 тыс. км/с, идёт от неё до Земли более четырёх лет. Звёзды являются наиболее распространённым типом небесных тел, в одной только нашей Галактике их насчитывается несколько сотен миллиардов. Объём, занимаемый этой звёздной системой, так велик, что свет может пересечь его только за 100 тыс. лет.

Во **Вселенной** существует множество других галактик, подобных нашей. Именно расположение и движение галактик определяет строение и структуру Вселенной в целом. Галактики так далеки друг от друга, что невооружённым глазом можно видеть лишь три ближайшие: две — в Южном полушарии, а с территории России всего одну — туманность Андромеды. От наиболее удалённых галактик свет идёт до Земли около 13 млрд лет. Значительная часть вещества звёзд и галактик находится в таких условиях, создать которые в земных лабораториях невозможно. Всё космическое пространство заполнено электромагнитным излучением, гравитационными и магнитными полями. Между звёздами в галактиках и между галактиками находится очень разреженное вещество в виде газа, пыли, отдельных молекул, атомов и ионов, атомных ядер и элементарных частиц.

Как известно, расстояние до ближайшего к Земле небесного тела — Луны — составляет примерно 400 тыс. км. Наиболее удалённые объекты располагаются от нас на расстоянии, которое превышает расстояние до Луны более чем в  $10^{17}$  раз.

Попробуем представить размеры небесных тел и расстояния между ними во Вселенной, воспользовавшись хорошо известной моделью — школьным глобусом Земли диаметром 25 см. Этот глобус в 50 млн раз меньше нашей планеты. В этом случае мы должны изобразить Луну шариком диаметром примерно 7 см, находящимся от глобуса на расстоянии около 7,5 м. Модель Солнца будет иметь диаметр 28 м и находиться на расстоянии 3 км, а модель Нептуна — самой далёкой планеты Солнечной системы — будет удалена от нас на 90 км. Ближайшая к нам звезда при таком масштабе модели будет располагаться на расстоянии примерно 800 тыс. км, т. е. в 2 раза дальше, чем

Луна. Размеры нашей Галактики сократятся примерно до размеров Солнечной системы, но самые далёкие звёзды всё же будут находиться за её пределами.



### ЗАДАНИЕ 1

Вспомните, какие объекты в окружающей местности расположены на таких расстояниях, которые приведены для тел Солнечной системы в описанной выше модели. Какой из них имеет те же размеры, что и модель Солнца (в предлагаемом масштабе)?

## § 2. НАБЛЮДЕНИЯ — ОСНОВА АСТРОНОМИИ

### 1. Особенности астрономии и её методов

Огромные пространственно-временные масштабы изучаемых объектов и явлений определяют отличительные особенности астрономии.

Сведения о том, что происходит за пределами Земли в космическом пространстве, учёные получают главным образом на основе приходящего от этих объектов света и других видов излучения. Наблюдения — основной источник информации в астрономии. Эта *первая особенность* астрономии отличает её от других естественных наук (например, физики или химии), где значительную роль играют опыты и эксперименты, планируемые в лабораториях. Возможности проведения экспериментов за пределами Земли появились лишь благодаря космонавтике. Но и в этих случаях речь идёт о проведении исследований небольшого масштаба, таких, например, как изучение химического состава лунных или марсианских пород. Трудно представить себе эксперименты над планетой в целом, звёздой или галактикой.

*Вторая особенность* объясняется значительной продолжительностью целого ряда изучаемых в астрономии явлений (от сотен до миллионов и миллиардов лет). Поэтому непосредственно наблюдать многие из происходящих явлений невозможно. Когда изменения происходят особенно медленно, приходится проводить наблюдения многих родственных меж-

ду собой объектов, например звёзд. Основные сведения об эволюции звёзд получены именно таким способом. Более подробно об этом будет рассказано далее.

*Третья особенность* астрономии обусловлена необходимостью указать положение небесных тел в пространстве (их координаты) и невозможностью сразу указать, какое из них находится ближе, а какое дальше от нас. На первый взгляд, все наблюдаемые светила кажутся нам одинаково далёкими.

Люди в древности считали, что все звёзды располагаются на небесной сфере, которая вращается вокруг Земли, как единое целое. Уже более 2000 лет тому назад астрономы стали применять способы, которые позволяли указать расположение любого светила на небесной сфере по отношению к другим космическим объектам или наземным ориентирам. Представлением о небесной сфере удобно пользоваться и теперь, хотя мы знаем, что реально этой сферы не существует.

Построим небесную сферу и проведём из её центра луч по направлению к звезде  $A$  (рис. 1.1). Там, где этот луч пересечёт поверхность сферы, поместим точку  $A_1$ , изображающую эту звезду. Звезда  $B$  будет изображаться точкой  $B_1$ . Повторив подобную операцию для всех наблюдаемых звёзд, мы получим на поверхности сферы изображение звёздного неба — звёздный глобус. Ясно, что если наблюдатель находится в центре этой воображаемой сферы, то для него направления на сами звёзды и их изображения на сфере будут совпадать. Расстояния между звёздами на небесной сфере можно выражать только в угловой мере. Эти угловые расстояния измеряются величиной центрального угла между лучами, направленными на одну и другую звезду, или соответствующей им дуги на поверхности сферы.

Для приближённой оценки угловых расстояний на небе полезно запомнить такие данные: угловое расстояние между двумя крайними звёздами ковша Большой Медведицы ( $\alpha$  и  $\beta$ ) составляет около  $5^\circ$  (рис. 1.2), а от  $\alpha$  Большой Медведицы до  $\alpha$  Малой Медведицы (Полярной звезды) — в 5 раз больше — примерно  $25^\circ$ . Простейшие глазомерные оценки угловых расстояний можно провести также с помощью пальцев вытянутой руки.

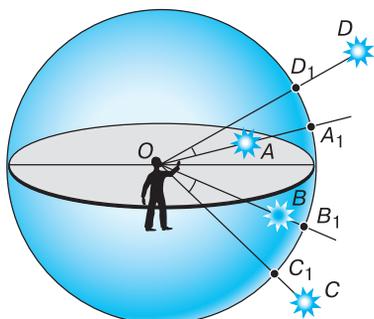


Рис. 1.1. Небесная сфера

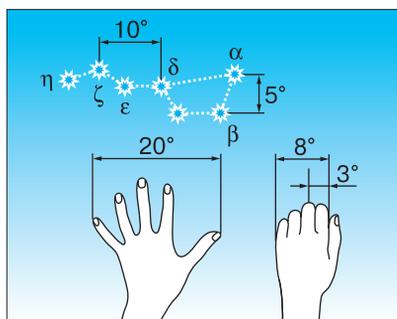


Рис. 1.2. Оценка угловых расстояний на небе

Только два светила — Солнце и Луну — мы видим как диски. Угловые диаметры этих дисков почти одинаковы — около  $30'$  или  $0,5^\circ$ . Угловые размеры планет и звёзд значительно меньше, поэтому мы их видим просто как светящиеся точки. Для невооружённого глаза объект не выглядит точкой в том случае, если его угловые размеры превышают  $2-3'$ . Это означает, в частности, что наш глаз различает каждую по отдельности светящуюся точку (звезду) в том случае, если угловое расстояние между ними больше этой величины. Иначе говоря, мы видим объект не точечным лишь в том случае, если расстояние до него превышает его размеры не более чем в 1700 раз.

О том, как на основании угловых измерений определяют расстояния до небесных тел и их линейные размеры, будет рассказано далее.

Чтобы отыскать на небе светило, надо указать, в какой стороне горизонта и как высоко над ним оно находится. С этой целью используется **система горизонтальных координат** — *азимут* и *высота*. Для наблюдателя, находящегося в любой точке Земли, нетрудно определить вертикальное и горизонтальное направления. Первое из них определяется с помощью отвеса и изображается на чертеже (рис. 1.3) отвесной линией  $ZZ'$ , проходящей через центр сферы (точку  $O$ ). Точка  $Z$ , расположенная прямо над головой наблюдателя, называется **зенитом**. Плоскость, которая проходит через центр сферы перпендикулярно отвесной линии, образует при

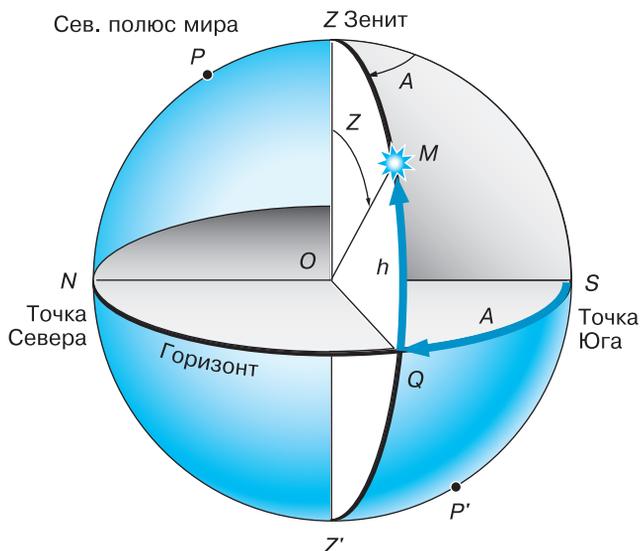


Рис. 1.3.  
Система  
горизонталь-  
ных координат

пересечении со сферой окружность — *истинный*, или *математический, горизонт*. *Высота* светила отсчитывается по окружности, проходящей через зенит и светило  $M$ , и выражается длиной дуги этой окружности от горизонта до светила. Эту дугу и соответствующий ей угол принято обозначать буквой  $h$ . Высота светила, которое находится в зените, равна  $90^\circ$ , на горизонте —  $0^\circ$ . Положение светила относительно сторон горизонта указывает его вторая координата — *азимут*, обозначаемый буквой  $A$ . Азимут отсчитывается от точки юга в направлении движения часовой стрелки, так что азимут точки юга равен  $0^\circ$ , точки запада —  $90^\circ$  и т. д.

Горизонтальные координаты указывают положение светила на небе в данный момент и вследствие вращения Земли непрерывно меняются. На практике, например в геодезии, высоту и азимут измеряют специальными угломерными оптическими приборами — *теодолитами*.

## 2. Телескопы

Основным прибором, который используется в астрономии для наблюдения небесных тел, приёма и анализа приходящего от них излучения, является *телескоп*. Слово это происходит от двух греческих слов: *tele* — далеко и *skopéo* — смотрю.

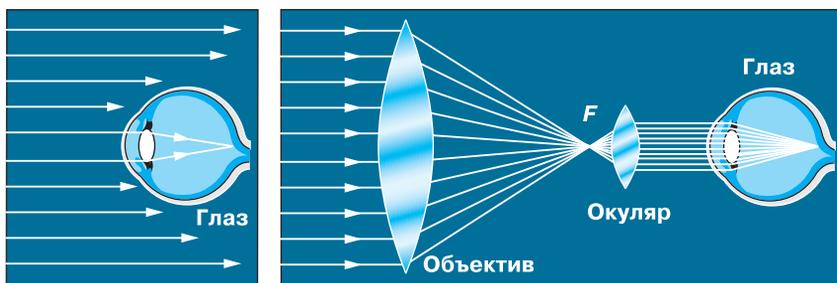


Рис. 1.4. Собираение света объективом телескопа

Телескоп применяют, во-первых, для того, чтобы собрать как можно больше света, идущего от исследуемого объекта, а во-вторых, чтобы обеспечить возможность изучать его мелкие детали, недоступные невооружённому глазу. Чем более слабые объекты даёт возможность увидеть телескоп, тем больше его *проницающая сила*. Возможность различать мелкие детали характеризует *разрешающую способность* телескопа. Обе эти характеристики телескопа зависят от диаметра его объектива.

Количество света, собираемого объективом, возрастает пропорционально его площади (квадрату диаметра) (рис. 1.4). Диаметр зрачка человеческого глаза даже в полной темноте не превышает 8 мм. Объектив телескопа может превышать по диаметру зрачок глаза в десятки и сотни раз. Это позволяет с помощью телескопа обнаружить звёзды и другие объекты, которые в 100 млн раз слабее объектов, видимых невооружённым глазом.

Чем меньше размер изображения светящейся точки (звезды), которое даёт объектив телескопа, тем лучше его разрешающая способность. Если расстояние между изображениями двух звёзд меньше размера самого изображения, то они сливаются в одно. Вследствие дифракции изображение звёзды будет не точкой, а ярким пятном — дифракционным диском, угловой диаметр которого равен

$$\alpha = \frac{206\,265 \cdot \lambda}{D} \cdot 2,44,$$

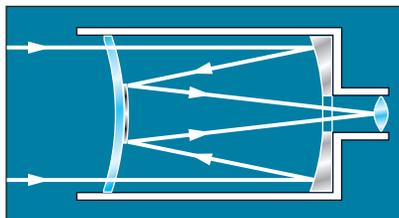


Рис. 1.5. Менисковый телескоп

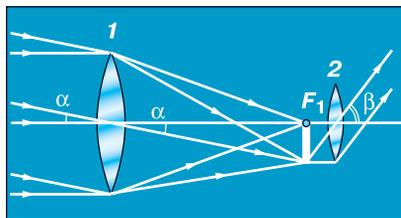


Рис. 1.6. Построение изображения в телескопе

где  $\lambda$  — длина световой волны, а  $D$  — диаметр объектива телескопа,  $206\,265$  — число секунд в радиане. У школьного телескопа, диаметр объектива которого составляет  $60$  мм, теоретическая разрешающая способность будет равна примерно  $2''$ . Напомним, что это превышает разрешающую способность невооружённого глаза (в среднем  $2'$ ) в  $60$  раз. Реальная разрешающая способность телескопа будет меньше, поскольку на качество изображения существенно влияет состояние атмосферы, движение воздуха.

Если в качестве объектива телескопа используется линза, то он называется *рефрактор* (от лат. refracto — преломляю), а если вогнутое зеркало, — то *рефлектор* (reflecto — отражаю).

Помимо рефракторов и рефлекторов в настоящее время используются различные типы зеркально-линзовых телескопов, один из которых — менисковый — представлен на рисунке 1.5.

У небольших телескопов объективом, как правило, служит двояковыпуклая собирающая линза. Как известно, если предмет находится дальше двойного фокусного расстояния, она даёт его уменьшенное, перевёрнутое и действительное изображение. Это изображение располагается между точками фокуса и двойного фокуса линзы. Расстояния до Луны, планет, а тем более звёзд так велики, что лучи, приходящие от них, можно считать параллельными. Следовательно, изображение объекта будет располагаться в фокальной плоскости.

Построим изображение Луны, которое даёт объектив  $1$  с фокусным расстоянием  $F$  (рис. 1.6). Из рисунка видно, что уг-

ловых размеров наблюдаемого объекта — угол  $\alpha$  — объектив не изменяет. Воспользуемся теперь ещё одной линзой — окуляром 2, поместив её от изображения Луны (точка  $F_1$ ) на расстоянии, равном фокусному расстоянию этой линзы —  $f$ . Фокусное расстояние окуляра должно быть меньше, чем фокусное расстояние объектива. Построив изображение, которое даёт окуляр, мы убедимся, что он увеличивает угловые размеры Луны: угол  $\beta$  заметно больше угла  $\alpha$ .

Если изображение, даваемое объективом, находится вблизи фокальной плоскости окуляра, увеличение, которое обеспечивает телескоп, равно отношению фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра:

$$W = \frac{F}{f}.$$

Телескоп увеличивает видимые угловые размеры Солнца, Луны, планет и деталей на них, но звёзды из-за их колоссальной удалённости всё равно видны в телескоп как светящиеся точки.

Имея сменные окуляры, можно с одним и тем же объективом получать различное увеличение. Поэтому возможности телескопа в астрономии принято характеризовать не увеличением, а диаметром его объектива. В астрономии, как правило, используют увеличения менее 500 раз. Применять большие увеличения мешает атмосфера Земли. Движение воздуха, незаметное невооружённым глазом (или при малых увеличениях), приводит к тому, что мелкие детали изображения становятся нерезкими, размытыми. Поэтому астрономические обсерватории, на которых используются крупные телескопы, размещаются в районах с хорошим астроклиматом: большим количеством ясных дней и ночей, с высокой прозрачностью и стабильностью атмосферы, на высоте нескольких километров над уровнем моря.

Современный телескоп представляет собой сложное устройство, которое имеет предельно точную оптику огромных размеров, наилучшие из существующих приёмники излучения и обширный комплекс научной и обслуживающей аппаратуры. Все наиболее крупные современные телескопы — это телескопы-рефлекторы.

Крупнейший в России телескоп-рефлектор (рис. 1.7) имеет зеркало диаметром 6 м, отшлифованное с точностью до долей микрометра. Фокусное расстояние зеркала 24 м. Его масса около 40 т. Масса всей установки телескопа более 850 т, а высота 42 м. Управление телескопом осуществляется с помощью компьютера, который позволяет точно навести телескоп на изучаемый объект и длительное время удерживать его в поле зрения, плавно поворачивая телескоп вслед за вращением Земли. Телескоп входит в состав Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук и установлен на Северном Кавказе (близ станицы Зеленчукская в Кабардино-Балкарии) на высоте 2100 м над уровнем моря.

Крупнейший в мире телескоп установлен на острове Ла Пальма у побережья Африки. «Глаз» этого телескопа — зеркало диаметром 10,4 м. Площадь его поверхности составляет  $82 \text{ м}^2$ , а состоит оно из 36 шестиугольных фрагментов. Оказалось, что такие огромные зеркала лучше собирать из отдельных тонких частей. Изготавливаются они не из стекла, а из более лёгких синтетических материалов. Цельное зеркало будет деформироваться под собственной тяжестью. Чтобы составное зеркало сохраняло необходимую форму, положение отдельных частей корректируется специальными приспособлениями (актюаторами), которыми управляет компьютер. Телескоп, где такая корректировка выполняется 2 раза в секунду, может обеспечить разрешающую способность около  $0,4''$ . В настоящее время обсуждаются вполне реальные проекты создания телескопов с зеркалами диаметром 25—40 м, устроенными по такому же принципу, а в перспективе намечается создание 100-метрового телескопа-рефлектора.

Астрономы уже давно не ведут визуальных наблюдений. На смену им в XIX в. пришла фотография, а в настоящее время её во многих случаях заменяют электронные приёмники света. Наибольшее распространение получили полупроводниковые приборы с зарядовой связью (сокращённо — ПЗС). Матрицы ПЗС, которые применяются в современных цифровых фотоаппаратах, по своему устройству аналогичны тем, которые используются в астрономии. Важнейшим качеством ПЗС, в которых используется внутренний фотоэффект, является их высокая чувствительность. Они регистрируют