

Казанский федеральный университет

Институт физики

Р.Я. Жучков, Е.Н. Типикина

Астрофотография в задачах

Учебное пособие

Казань – 2017

УДК 521.91-95

ББК В22

*Печатается по решению
Учебно-методической комиссии Института Физики КФУ
Протокол № 5 от 14 марта 2017 г.*

*заседания кафедры астрономии и космической геодезии
Протокол № 5 от 22 февраля 2017 г.*

Рецензент:

ведущий научный сотрудник Коуровской астрономической
обсерватории Уральского федерального университета,
к.ф.-м.н., доцент **С. Ю. Горда**

Жучков Р. Я., Типикина Е. Н.

Астрофотография в задачах: учебное пособие / Р. Я. Жучков,
Е. Н. Типикина. – Казань: Казан. ун-т, 2017. – 97 с.

В сборник включены практические задачи по астрофотографии. Описаны как приёмы, позволяющие получить подобные фото с использованием простейших приборов и инструментов, так и примеры измерений и вычислений параметров объектов съёмки, светоприёмников, оптики и т. д.

Рекомендуется для студентов специальности «Астрономия» при изучении курсов "Общая астрономия" и "Практикум по общей астрономии", а также для подготовки школьников к астрономическим олимпиадам различного уровня, факультативных занятий по физике (раздел «Оптика»), всем, кто увлекается съёмкой звёздного неба и хочет понять, как, анализируя полученное изображение, узнать больше о том, что и как снималось.

© Жучков Р. Я., Типикина Е. Н., 2017

© Казанский университет, 2017

Оглавление

Введение	5
Раздел 1. Съёмка Луны и Солнца	7
Задача №1.1 БТА на рассвете.....	12
Задача №1.2 Луна через телескоп.....	14
Задача №1.3 Луна и Венера.....	16
Задача №1.4 Фазы Луны.....	19
Задача №1.5 Серп Луны и Ан-30.....	23
Задача №1.6 Луна, Венера и Юпитер.....	26
Задача №1.7 Заход Луны	30
Задача №1.8 Луна и самолёт	36
Задача №1.9 Луна над Антальяй.....	38
Задача №1.10 Восход Луны и Венеры	43
Задача №1.11 Луна и планеты.....	45
Задача №1.12 Солнечный протуберанец.....	48
Задача №1.13 Пятно на Солнце	50
Задача №1.14 Закат над Калугой	52
Задача №1.15 Закат Солнца на Кавказе	53
Задача №1.16 Закат Солнца в горах	57
Задача №1.17 Солнечное затмение.....	61

Раздел 2. Съёмка неподвижной камерой – короткие выдержки	64
Задача №2.1 Небо над обсерваторией ТЮБИТАК	67
Задача №2.2 Звёздное небо Турции.....	69
Задача №2.3 Парад планет.....	73
Задача №2.4 Звёздное небо в горах Турции	78
Задача №2.5 Небо над планетарием	81
Задача №2.6 Жёлтая палатка.....	85
Задача №2.7 Луна и звёзды	89
Авторы фотографий и параметры съёмки.....	92
Некоторые термины и понятия.....	94
Список литературы	96

Введение

Астрономическая фотография как направление давно и прочно укрепилась среди разделов фотографии. Появление и развитие цифровой фототехники сделало эту область творчества доступной широкому кругу любителей астрономии.

В среде Internet можно найти статьи, описывающие особенности съёмки различных космических объектов и атмосферных явлений, использования программного обеспечения, предназначенного для постобработки астрономических снимков. Но пособий, посвящённых тому, какие характеристики фотографируемых объектов можно извлечь из любительских астрономических снимков, совсем мало.

Умение по виду изображения оценивать параметры съёмки и используемой фототехники позволяет не только получить самостоятельно подобные снимки, но и изучить фотографируемые объекты или явления.

Анализ каждого астрономического кадра или серии кадров представляет собой небольшую лабораторную работу по оптике, основам небесных координат и общей астрономии. Часто эту работу можно представить как олимпиадную задачу практического тура – от простейшей до довольно сложной, требующей привлечения многих дополнительных параметров и знаний. Серии астрономических снимков позволяют выполнить и интересные исследовательские работы, например, по сравнению характеристик различных объективов или светоприёмников, параметров звёзд или объектов Солнечной системы.

Данное пособие адресовано прежде всего школьникам, интересующимся астрономией, их учителям, а также студентам первых курсов специальности «Астрономия». Оно включает в себя подборку астрономических фотографий, распределённых по разделам, т.е. способам и объектам съёмки, на основе которых составлены качественные и расчетные вопросы и задачи. Некоторые из них представляют собой типовые задания практических туров астрономических олимпиад. Приведенные подробные решения позволят проверить правильность собственных рассуждений или познакомиться с новым для себя методом оценки тех или иных параметров объекта или условий съёмки.

Сборник содержит два раздела: съёмка Луны и Солнца и съёмка неподвижной камерой на коротких выдержках (пока осевое вращение Земли не искажает форм объектов небесной сферы).

Для тех, кто пожелает не только решить задачи по готовым фотографиям, но и получить собственные интересные снимки, мы привели в предисловии к каждому разделу сборника краткие рекомендации по фотосъёмке Луны, Солнца и звёзд.

Начальный уровень владения цифровым фотоаппаратом со сменным объективом и знание основ астрономической съёмки позволяют школьникам сфотографировать космические объекты, проиллюстрировать известные эффекты (осевое вращение Земли, её орбитальное движение и иные), глубже понять изучаемые явления.

И не так важно, будет демонстрироваться полученная фотография на выставке, конференции или нет, главное, что для учащегося каждая такая работа и её анализ – это своего рода открытие.

В сборнике использованы фотографии, полученные авторами пособия, инструкторами и участниками (школьниками 8-11 классов) казанских астрономических школ, проводимых астроклубом «Лира» при кафедре астрономии и космической геодезии КФУ. Сведения об авторах снимков и параметры съёмки приводятся в таблице (стр. 87) после решения задач.

Приложением к сборнику являются электронные копии фотографий, использованных при его подготовке. Для удобства поиска нужной фотографии в электронном приложении, в сборнике используется следующий принцип нумерации изображений:

- исходные фотографии, по которым составлены задачи, обозначаются как «Фото X.Y.», X – номер раздела, Y – номер фотографии в разделе;

- остальные иллюстрации, в том числе построения по исходным фотографиям, подписаны как «Рис. X.Z.», X – номер раздела, Z – номер иллюстрации в разделе.

Все материалы могут распространяться свободно при условии некоммерческого использования и обязательной письменной ссылки на авторов и настоящий сборник.

Раздел 1. Съёмка Луны и Солнца

Начинать обучение астрофотографии лучше всего со снимков наиболее ярких небесных объектов, таких как Солнце и Луна. Самые интересные фотографии с ними получаются на восходе или закате.

Поэтому первый раздел пособия состоит из задач, составленных по фотографиям с изображением Луны, Солнца и объектов, находящихся на Земле или в атмосфере (здания, летящие объекты и прочее).

Рассмотрим некоторые техничесикие требования и особенности такой съёмки.

Параметры съёмки: выдержка, диафрагма, чувствительность.

Интенсивность света, падающего на матрицу фотоаппарата от Луны и Солнца, довольно велика, для их съёмки требуются относительно короткие выдержки (порядка 1/1000 – 1 секунды). При этом не стоит использовать высокое значение ISO, достаточно выставить 100-400 единиц. Диафрагму можно прикрыть до значения 5.6-8, но это зависит от характеристик конкретного объектива. Выдержку следует подобрать по показаниям экспонометра или эмпирически. Стоит помнить, что даже один объект может потребовать разных экспонар для проработки разных участков. Так, для проработки пепельного света Луны потребуются выдержки около 1 секунды и более, освещённая же часть при этом будет пересвечена. И наоборот, при фотографировании рельефа освещённой части Луны пепельный свет будет едва заметен.

Однако, при съёмке неподвижной камерой Луны и Солнца, необходимо учитывать, что они, в отличие от зданий, совершают суточное перемещение по небу. Поэтому есть максимальное значение выдержки, зависящее от размеров матрицы фотоаппарата и фокусного расстояния объектива, при которой диски Луны и Солнца ещё не смазываются из-за их движения по небесной сфере.

Фокусное расстояние объектива

Для достаточной детализации объектов съёмки, угловые размеры которых составляют градусы или доли градуса, следует использовать длиннофокусные объективы (фокусное расстояние в 35-мм эквиваленте составляет от 100 до 2000 мм и более). Размеры дисков Луны и Солнца, получаемых на матрице фотоаппарата в зависимости от применяемого

объектива приведены в таблице 1 (пример расчётов показан в задаче № 1.2).

Таблица 1

Размеры диска Луны/Солнца на матрице фотоаппарата

Фокусное расстояние объектива	Размер матрицы							
	полный кадр 36x24 мм кроп фактор 1		23.7x15.6 мм кроп фактор 1.5		22.3x14.9 мм кроп фактор 1.6		17.3x13.0 мм кроп фактор 2	
	Размер диска Солнца/Луны на матрице фотоаппарата							
	мм	в % от меньшей стороны кадра	мм	в % от меньшей стороны кадра	мм	в % от меньшей стороны кадра	мм	в % от меньшей стороны кадра
50 мм	0.4	2	0.4	3	0.4	3	0.4	3
135 мм	1.2	5	1.2	8	1.2	8	1.2	9
200 мм	1.7	7	1.7	11	1.7	11	1.7	13
500 мм	4.4	18	4.4	28	4.4	29	4.4	34
1000 мм	8.7	36	8.7	56	8.7	58	8.7	67

Устранение эффектов дрожания камеры

Малое поле зрения длиннофокусных объективов, их заметная масса и значительные габариты требуют использования штатива даже при коротких выдержках.

Для устранения эффектов дрожания следует использовать пульт дистанционного спуска затвора (рис. 1.1), автоспуск или управление камерой с компьютера.

В большинстве современных фотокамер есть также возможность управления спуском затвора по радиоканалу - например, со смартфона с установленным специальным программным приложением. Дальность связи по WiFi достигает нескольких десятков метров и позволяет управлять камерой из укрытия, что может быть удобным, например, при съёмке зимой. Есть у этого



Рис. 1.1. Проводной и инфракрасный пульты дистанционного управления затвором фотоаппарата.

источник: <http://www.intel-foto.ru/catalog/> и <http://www.pleer.ru/>

способа и недостаток - повышенное энергопотребление камеры с включенным радиоканалом. Современная техника позволяет использовать несколько альтернативных вариантов дистанционного управления спуском затвора, выбор конкретного способа – вопрос личных предпочтений, опыта и обстоятельств.

В случае зеркальных камер полезно использование функции предварительного подъёма зеркала. Также имеет смысл отключить автостабилизацию изображения.

Техника безопасности при съёмках Солнца

При съёмках Солнца обязательно требуется использовать либо проекцию на экран, либо **солнечный фильтр** с относительным пропусканием порядка 10^{-6} , либо узкополосный интерференционный фильтр (как правило, такие фильтры центрируются на красную линию водорода H_{α} с $\lambda = 6563 \text{ \AA}$ и позволяют изучать структурные элементы хромосферы). Пренебрежение этими правилами может привести и к выходу из строя техники, и к слепоте при попытке взглянуть на Солнце глазом.

Съёмка в прямом фокусе телескопа

Для получения высокой детализации (например, съёмка солнечных пятен или протуберанцев, кратеров Луны) можно вести съёмку в прямом фокусе телескопа, соединив фотоаппарат с окулярным узлом через Т-адаптер (рис. 1.2, 1.3), в этом случае роль штатива выполняет монтировка телескопа. Для достижения наилучшего качества снимка желательно включить часовое ведение телескопа, при этом максимальное время выдержки значительно увеличивается, т.к. суточное движение объекта компенсируется движением трубы телескопа.

Построение суточной параллели

Для анализа некоторых снимков (в частности, для определения угловой скорости вращения Солнца по пятнам – метод, предложенный Галилео Галилеем) требуется обозначить положение суточной параллели. Проще всего сделать это, получив последовательность из двух-трёх снимков Солнца без смещения камеры (фотоаппарат неподвижно закреплён на штативе). Интервал между снимками может принимать значения от десятков секунд для фокусных расстояний $F > 1 \text{ м}$ до 2-3 минут для $F = 200 - 1000 \text{ мм}$. После совмещения изображений, полученных на снимках, определяют положение суточной параллели, которое будет опорным при сравнении снимков, полученных в разные дни.

Если же имеется камера, неподвижно и постоянно укреплённая на



Рис. 1.2. Соединение фотоаппарата с телескопом через Т-адаптер.



Рис. 1.3. Схема соединения фотоаппарата с окулярным узлом телескопа.
источник: <http://www.100market.net/>

экваториальной монтировке, с хорошей точностью выставленной в Полюс Мира, то ориентация суточной параллели будет сохраняться для всех кадров.


Также следует учесть, что при использовании экстремально больших эквивалентных фокусных расстояний ($F > 2$ м) даже выдержки в десятые доли секунды на неподвижной камере могут привести к смазу изображения из-за суточного вращения небесной сферы.

Получение комбинированных снимков

Для получения нескольких изображений Луны или Солнца на одном кадре, нужно сделать серию снимков (необходимо, чтобы камера при этом не сдвигалась), которые затем сложить в любой программе, работающей с наложением слоёв.

Можно использовать программу Startrails [7]. Открываем программу, заходим в пункт меню «Файл», выбираем «Открыть изображения» и добавляем все нужные фотографии с последовательными положениям Солнца/Луны. Затем переходим к закладке «Построить» и нажимаем «Звездные треки» (программа создана для сложения фотографий с треками звёзд, но хорошо складывает и кадры с Солнцем и Луной). Режим совмещения выбираем «Замена светлым (lighten)», нажимаем «Ок». Процесс сложения занимает некоторое время, зависящее от количества кадров и их разрешения, после чего можно сохранить полученный результат, зайдя в пункт меню «Файл» подменю «Сохранить изображение».

Универсальное средство – Adobe Photoshop [8]. Открываем все

необходимые кадры, затем выбираем кадр, который будет «базовым», на него накладываем остальные кадры в виде слоев: активируем нужный кадр, вбираем инструмент «Перемещение» , зажимаем клавишу Shift (при этом наложение слоев происходит без сдвига) и переносим с помощью мышки кадр на базовый слой. Режим наложения слоев – «замена светлым», можно использовать режим наложения слоев «нормальный», но при этом необходимо будет использовать маски слоёв.

Обобщив указанные выше рекомендации, составим примерную последовательность действий при фотографировании Луны или Солнца:

1. определить объект и вид съёмки (одиночный кадр Солнца/Луны с детализацией, восход/заход светил с серией снимков, художественный кадр, где Луна/Солнце – часть пейзажа и др.);
2. выбрать объектив с фокусным расстоянием, удовлетворяющем замыслу (см. таблицу 1);
3. установить фотоаппарат на штатив (или закрепить в прямом фокусе телескопа, при этом необходимо произвести балансировку трубы телескопа с фотоаппаратом);
4. при съёмке Солнца необходимо надеть на объектив фотоаппарата/телескопа **солнечный фильтр**. Если ведётся съёмка заката/восхода Солнца, то в ряде случаев (при низкой прозрачности атмосферы) фильтр не требуется;
5. Отключить автостабилизацию на объективе, перевести фокусировку объектива в ручной режим, установить режим съёмки фотоаппарата в положение **M** (ручной режим), подключить пульт дистанционного управления (или установить автоспуск);
6. выставить значение ISO, диафрагму и предполагаемую выдержку;
7. навестись на снимаемый объект;
8. произвести фокусировку (у зеркальных камер лучше использовать режим live view);
9. сделать проверочный кадр, скорректировать при необходимости выставленную экспозапару и резкость;
10. продолжить съёмку до получения кадра, соответствующего задуманному.

Задача №1.1 БТА на рассвете



Фото 1.1. БТА на рассвете.

Вам представлен снимок башни крупнейшего в России 6-м телескопа БТА САО РАН, полученный на восходе Солнца. Оцените расстояние, с которого был сделан снимок. Высота купола БТА 53 метра. Матрица фотоаппарата имеет размеры 22.2 x 14.8 мм, фокусное расстояние объектива 68 мм.

Решение.

Определим размер купола БТА на матрице при съёмке. Введем обозначения: a - высота матрицы (равная 14.8 мм), A - высота фотографии, H - высота купола телескопа на фотографии, h - высота купола БТА на матрице. Тогда $\frac{A}{a} = \frac{H}{h}$, $\Rightarrow h = \frac{a \cdot H}{A}$

Изобразим ход лучей через объектив фотоаппарата, представив его при этом одной собирающей линзой (рис. 1.4).

При фотографировании удаленных объектов их изображение получается в фокальной плоскости объектива, где располагается матрица.

Из подобия треугольников получаем соотношение $\frac{H_0}{h} = \frac{L}{F}$, где

L – расстояние от фотографа до БТА, F – фокусное расстояние объектива, H_0 – высота купола БТА.

Тогда

$$L = \frac{H_0 \cdot F}{h} = \frac{H_0 \cdot F \cdot A}{a \cdot H}$$

На фотографии отношение высоты кадра к высоте купола телескопа составляет

$$\frac{A}{H} \approx 2.3, \text{ а расстояние от}$$

телескопа до фотографа $L = \frac{53\text{м} \cdot 68\text{мм} \cdot 2.3}{14.8\text{мм}} \approx 560\text{м}$

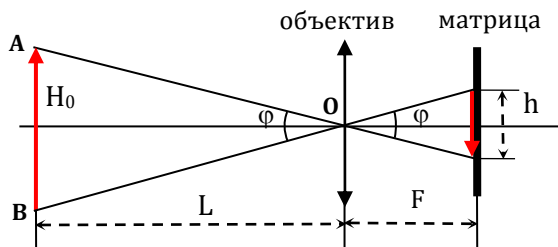


Рис. 1.4. Ход лучей через объектив фотоаппарата.



Рис. 1.5. БТА со спутника.

На рис. 1.5, представляющем собой часть спутниковой карты (<https://maps.yandex.ru>), показано расположение фотографа относительно телескопа во время съёмки.

Задача №1.2 Луна через телескоп



Фото 1.2. Убывающая Луна.

По фотографии Луны определите фокусное расстояние объектива телескопа. Съёмка велась в прямом фокусе (т.е. можно принять, что телескоп является просто «большим объективом» для фотоаппарата).

Матрица фотоаппарата имеет размеры 22.2x14.8 мм.

Фотография не кадрировалась! (т.е. отношение сторон фотографии равно отношению сторон матрицы)

Решение.

Изображение далеких объектов получаются в фокальной плоскости телескопа-объектива (рис. 1.6)

Пусть d_1 - линейный размер Луны на фотографии, d - линейный размер Луны на матрице, b_1 - высота фотографии, b - высота матрицы (равная 22.2 мм), F - фокусное расстояние объектива телескопа, φ - угловой размер Луны (рис. 1.7).

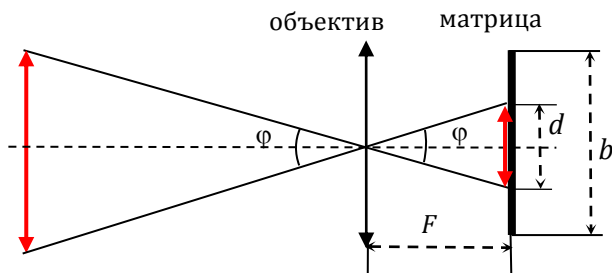


Рис. 1.6. Ход лучей через телескоп-объектив.

Для определения диаметра Луны на фотографии следует соединить две крайние точки её терминатора (всегда лежащие на одном диаметре) – вне зависимости от ориентации диска на кадре.

Линейный размер лунного диска на матрице во столько же раз меньше, чем на фотографии, во сколько раз высота матрицы меньше высоты фотографии:

$$\text{фотографии: } \frac{b_1}{b} = \frac{d_1}{d}.$$

$$\text{Откуда } d = \frac{d_1 \cdot b}{b_1},$$

$$d = 0.78 \cdot 22.2 \text{ мм} \approx 17.3 \text{ мм}.$$

Из рис. 1.6 следует, что

$$\text{tg } \frac{\varphi}{2} = \frac{d/2}{F} \Rightarrow F = \frac{d}{2 \cdot \text{tg } \frac{\varphi}{2}} \approx \frac{d}{\varphi_{[рад]}}$$

т.к. угол φ мал, можно применить формулу для приближенных вычислений тригонометрических функций: $\text{tg } \alpha \approx \alpha_{[рад]}$

Угловой размер Луны примем равным $30'$. Тогда фокусное расстояние объектива телескопа

$$F = \frac{17.3 \text{ мм}}{2 \cdot \text{tg } \frac{30'}{2}} \approx 1900 \text{ мм} \approx 2 \text{ м}$$

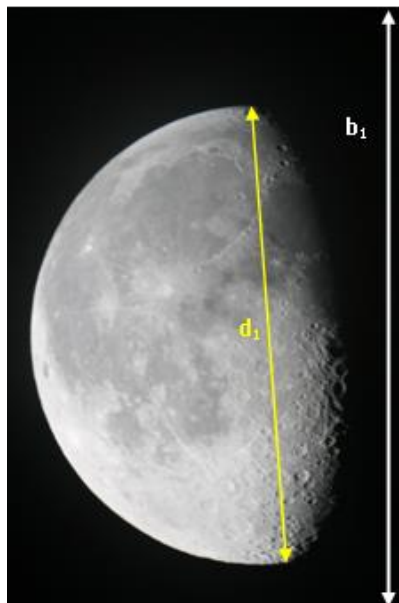


Рис. 1.7. Обозначения линейных размеров объектов.

Задача №1.3 Луна и Венера



Фото 1.3. Серп Луны и Венера.

На предоставленной вам фотографии, сделанной 14 августа 2012 года в пос. Дачное недалеко от города Казани во время проведения астрономической школы, изображены Луна и Венера.

Внимательно изучив фотографию, дайте ответы на следующие вопросы:

1. Какая это Луна – растущая или убывающая? Поясните, как вы это определили.
 2. В какое время суток была сделана фотография (утром или вечером)?
 3. На снимке, кроме освещённой Солнцем части луны (серп), видна остальная часть лунного диска, находящаяся в тени (пепельный свет Луны). Объясните происхождение этого явления.
4. Оцените по фотографии угловое расстояние между Луной и Венерой на момент съёмки.
 5. Изобразите на рисунке примерное расположение Луны, Земли и Венеры относительно Солнца на момент съёмки. Считать, что орбиты всех перечисленных тел лежат в плоскости эклиптики и являются круговыми.

Решение.

1. Луна стареющая. Для северного полушария, где и располагается Казань, справедливо правило: если серп Луны похож на букву «С», то Луна стареющая, если «рожки» серпика соединить отрезком и получается буква «Р», то Луна растущая.

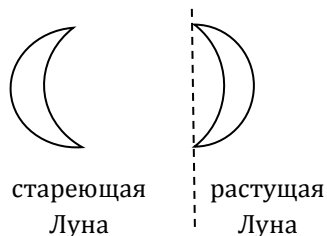


Рис. 1.8. Правило определения фаз Луны.

2. Фотография была сделана утром. Узкий серп стареющей Луны обращен к Солнцу, находящемуся за горизонтом ниже и левее (рис. 1.9).

Казань расположена в северном полушарии Земли, где движение Луны и Солнца происходит с востока на запад через юг, т.е. их суточные параллели при взгляде на

восток направлены из нижнего левого угла к верхнему правому. Именно так располагаются Луна и Венера на фотографии, следовательно, мы смотрим на восток, и сначала появятся Луна и Венера, а затем взойдет Солнце.

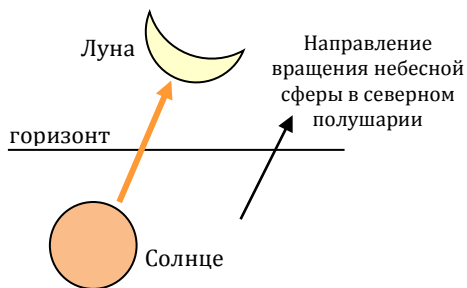


Рис. 1.9. Восход стареющей Луны.

3. Пепельный свет появляется вследствие слабого освещения тёмной части Луны солнечным светом, отражённым от Земли. Хорошо заметен пепельный свет в то время, когда серп Луны мал, вблизи новолуния, т.е. когда к Луне обращена почти вся освещённая Солнцем поверхность Земли.

4. Угловой диаметр Луны при наблюдении с Земли составляет примерно 0.5° . На фотографии угловой размер Луны d в 4.7 раз меньше расстояния D от центра Лунного диска до Венеры (рис. 1.10).

Следовательно, угловое расстояние между Луной и Венерой составляет

$$\varphi = \frac{0.5^\circ \cdot D}{d} \approx 2.4^\circ$$

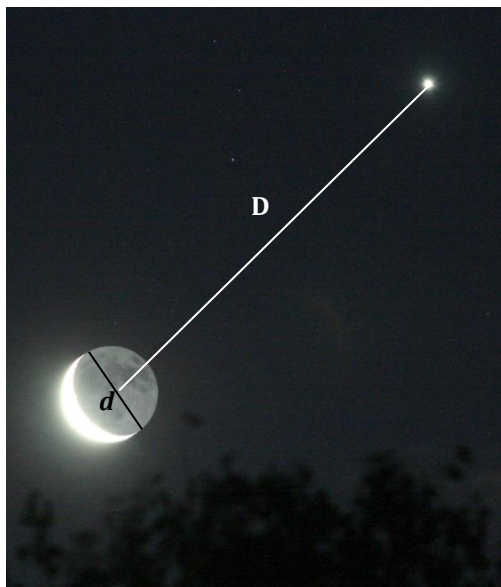


Рис. 1.10. Обозначения линейных расстояний на фотографии.

5. Сначала определим, на каком угловом расстоянии φ для земного наблюдателя находятся Луна и Солнце на момент съёмки (рис. 1.11).

Углы $\angle SOO_1$ и $\angle MO_1T$ равны как углы со взаимно перпендикулярными сторонами.

Из $\triangle MO_1T$ $\cos \varphi = (R - x)/R$, где R – радиус Луны, x – размер освещенной части Луны (измеряем эти величины по фотографии). Получаем $\varphi \approx 51^\circ$, т.е. Луна располагается для земного наблюдателя западнее Солнца на 51° .

Угловое расстояние между Луной и Венерой составляет 2.4° (см. п.4)

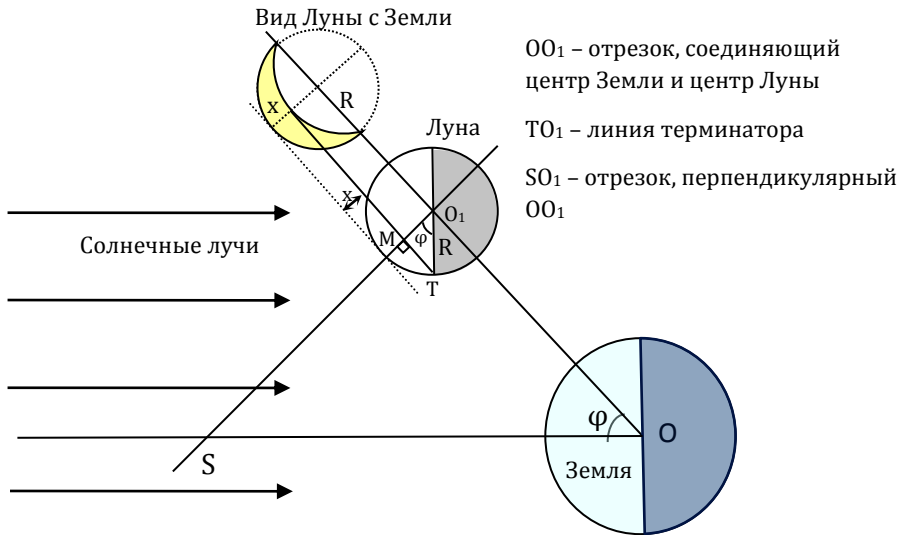


Рис. 1.11. Расположение Луны и Земли по отношению к направлению падения солнечных лучей.

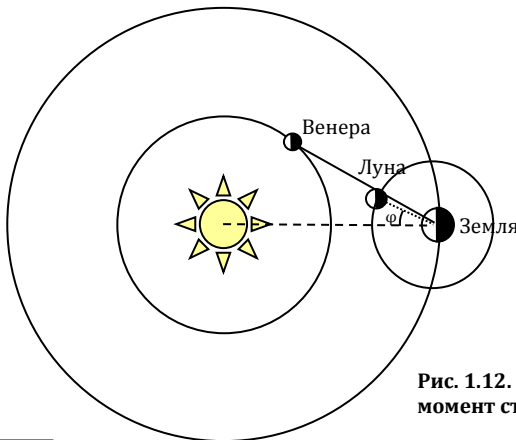


Схема расположения Луны, Земли и Венеры относительно Солнца на момент съёмки показана на рис. 1.12.

Рис. 1.12. Расположение Луны, Земли и Венеры на момент съёмки.

Задача №1.4 Фазы Луны



Фото 1.4. Фазы Луны.

На предоставленной вам комбинированной фотографии (4 отдельных снимка, полученных с помощью телескопа в августе 2012 года, расположенных на одном изображении с помощью программы Adobe Photoshop) представлены последовательные фазы Луны.

По фотографии

1. определите фазу Луны на каждом снимке;
2. изобразите на одном рисунке для каждого снимка примерное расположение Луны относительно Земли на момент съёмки. Считать, орбиту Луны круговой и лежащей в плоскости эклиптики;
3. оцените, сколько примерно дней прошло между 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4 снимками;
4. оцените диаметр моря Ясности.

Решение.

1. Фазой Луны Φ называется отношение ширины b лунного серпа к диаметру d лунного диска (рис. 1.13): $\Phi = \frac{b}{d}$

Измерив по фотографиям диаметр лунного диска и ширину серпа в каждом случае, получаем $\Phi_1 \approx 0.81$, $\Phi_2 \approx 0.62$, $\Phi_3 \approx 0.31$, $\Phi_4 \approx 0.14$.

2. Чтобы изобразить взаимное расположение Луны, Земли и Солнца на рисунке, необходимо определить фазовый угол φ (угол, образованный направлениями центр Солнца - центр Земли и центр Земли - центр Луны) (рис. 1.14).

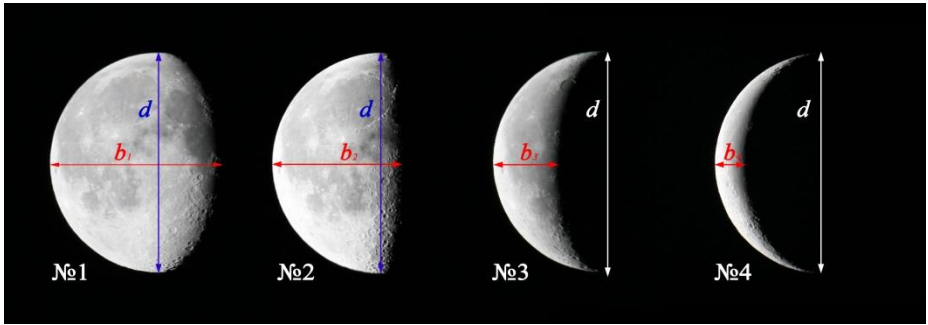


Рис. 1.13. К определению фаз Луны.

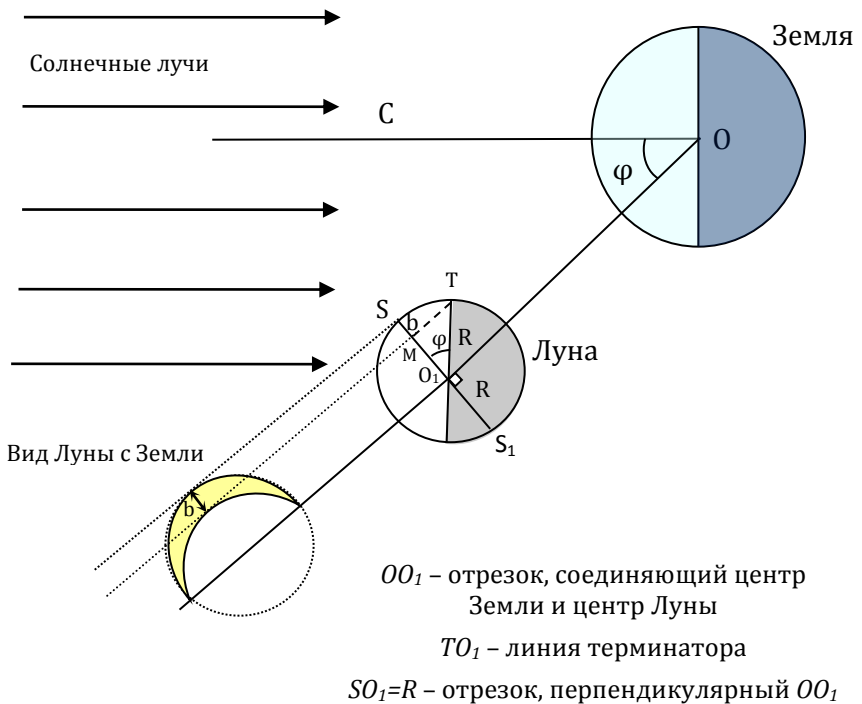


Рис. 1.14. Взаимное расположение Луны, Земли и Солнца.

Пусть O - центр Земли, O_1 - центр Луны, φ - угол между направлениями с Земли на Солнце и на Луну, отсчитываемый в сторону движения Луны, SS_1 - диаметр лунного диска, перпендикулярный к лучу зрения земного наблюдателя.

$\angle O_1OC$ - угловое удаление Луны от Солнца, обозначенный на рисунке φ , и $\angle TO_1S$ равны как углы, со взаимно перпендикулярными сторонами. Тогда ширина лунного серпа b будет равна:

$$b = SO_1 - MO_1 = R - R \cdot \cos \varphi = R (1 - \cos \varphi),$$

а выражение для расчета фазы Луны примет вид:

$$\Phi = \frac{b}{d} = \frac{R (1 - \cos \varphi)}{2R} = \frac{1 - \cos \varphi}{2} = \sin^2 \frac{\varphi}{2}.$$

Откуда $\varphi = 2 \arcsin \sqrt{\Phi}$ для растущей Луны и $\varphi = 360^\circ - 2 \arcsin \sqrt{\Phi}$ - для убывающей, т.к. за начало отсчета принято положение Луны во время новолуния, а угол φ отсчитывается по направлению орбитального движения Луны.

Для данных фотографий убывающей Луны получаем:

фотография	фото № 1	фото № 2	фото № 3	фото № 4
фаза	0.81	0.62	0.31	0.14
угол φ	232°	256°	292°	316°

Согласно таблице изобразим на рисунке взаимное положение Луны и Земли для каждого дня съёмки (рис. 1.15).

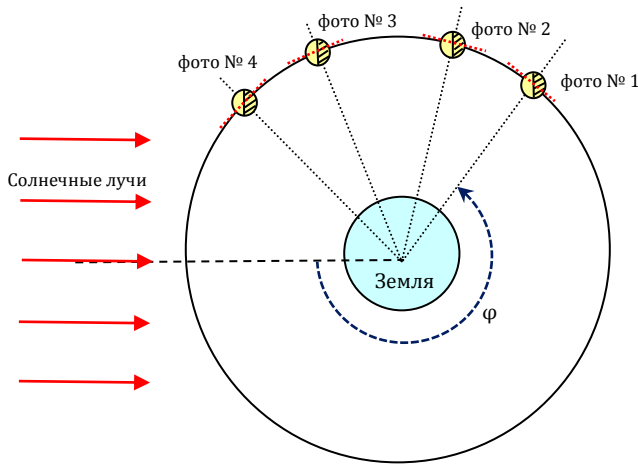


Рис. 1.15. Положение Луны, Земли и Солнца при съёмке в различные дни.

3. Если считать орбиту Луны круговой, то угол φ можно примерно оценить по синодическому периоду Луны S и количеству дней t , прошедших от новолуния: $\varphi = 360^\circ \cdot \frac{t}{S}$. Следовательно, промежуток

времени Δt между двумя последовательными снимками равен $\Delta t = \frac{\Delta\varphi \cdot S}{360^\circ}$.

Между первым и вторым снимками прошло

$$\Delta t_{1-2} = \frac{(256^\circ - 232^\circ) \cdot 29.53 \text{ дня}}{360^\circ} \approx 2 \text{ дня},$$

между вторым и третьим снимками прошло

$$\Delta t_{2-3} = \frac{(292^\circ - 256^\circ) \cdot 29.53 \text{ дня}}{360^\circ} \approx 3 \text{ дня},$$

между третьим и четвертым снимками прошло

$$\Delta t_{3-4} = \frac{(316^\circ - 292^\circ) \cdot 29.53 \text{ дня}}{360^\circ} \approx 2 \text{ дня}.$$

4. Для оценки диаметра Моря Ясности воспользуемся первой фотографией, на которой данный объект полностью освещен солнечными лучами. При оценке размеров Моря Ясности будем считать его форму близкой к круговой и используем его диаметр, продолжение которого проходит через центр лунного диска. Море Ясности расположено по долготе недалеко от центрального меридиана, но примерно на половине расстояния между экватором и полюсом по широте. Поэтому измерения будем проводить по диаметру Моря Ясности, параллельному экватору, как менее искаженному перспективой вследствие шарообразности Луны.

Линейный масштаб фотографии k определяется как отношение реального диаметра Луны D , выраженного в км, к размеру лунного диска

d на фото, измеренного в мм (или см): $k = \frac{D_{[\text{км}]}}{d_{[\text{мм}]}}$.

Обозначим диаметр Моря Ясности на фотографии l , тогда его реальный

диаметр L будет равен: $L = k_{[\text{км}/\text{мм}]} \cdot l_{[\text{мм}]} = D_{[\text{км}]} \frac{l_{[\text{мм}]}}{d_{[\text{мм}]}}$

Диаметр Луны равен 3470 км, на фото диаметр Моря Ясности в 5.3 раз меньше диаметра Луны, следовательно, размер Моря Ясности

$$L = 3470 \text{ км} \cdot \frac{1}{5.3} \approx 650 \text{ км}.$$

Задача №1.5 Серп Луны и Ан-30



Фото 1.5. Луна и Ан-30.

На фотографии Вы видите самолёт воздушного наблюдения и аэрофотосъёмки Ан-30 рядом с тонким серпом стареющей Луны. Фотография сделана в Казани ($\varphi=55^{\circ}47'$ с. ш. $\lambda=49^{\circ}07'$ в. д.) 12 июня 2007 года.

По фотографии

1. рассчитайте расстояние от фотографа до самолёта (длина фюзеляжа самолета 24.3 метра);
2. оцените высоту полёта самолёта, считая, что в момент съёмки Луна находилась в верхней кульминации, наклоном орбиты Луны к эклиптике пренебречь.

Решение.

1. Угловой размер Луны – 0.5° .

Длина l самолета на снимке почти в 2 раз меньше диаметра Луны (диаметр определим, соединив "рожки" серпа).

Следовательно, угловой размер самолета $\varphi = 0.5^{\circ}/2 = 0.25^{\circ} \approx 0.00436$ рад.

Т.к. угол мал, то $l = \varphi \cdot L$, где L - расстояние до самолета, φ - угловой размер самолета в радианах. Откуда, $L = \frac{l}{\varphi} = \frac{24.3\text{ м}}{0.00436\text{ рад}} \approx 5570\text{ м}$.

2. Самолёт находится на угловом расстоянии от Луны примерно на диаметр лунного диска, т.е. менее градуса. Значит, необходимо оценить угловую высоту Луны над горизонтом в момент съёмки. Будем считать, что движение Луны происходит вдоль эклиптики. Склонение Солнца 12 июня 2007 года было $23^{\circ} 06'$ (значение можно взять из календаря наблюдателя или оценить по дате). Фаза стареющей Луны Φ равна:

$\Phi = \frac{b}{d}$, где b - ширина лунного серпа, d - диаметр лунного диска.

Измерения дают $\Phi=0.11$ (рис. 1.16).

Угол φ , на который Луна отстоит от Солнца, определяется по формуле $\varphi = 2 \arcsin \sqrt{\Phi}$ (см. задачу №1.4).

При фазе 0.11 угол φ составляет 38.7° , т.е. Луна располагается для земного наблюдателя западнее Солнца на 38.7° (рис. 1.17)

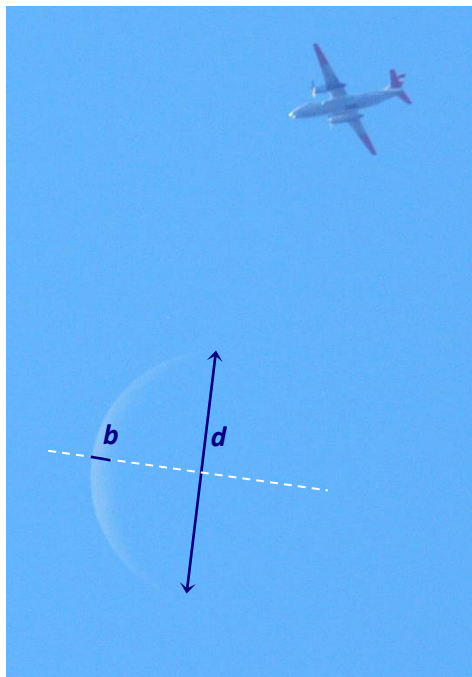


Рис. 1.16. Определение фазы Луны.

На этот угол Солнце продвигается по эклиптике за 39 дней (скорость движения Солнца по эклиптике примерно $1^\circ/\text{сут}$), значит, исходя из предположения, что Луна движется вдоль эклиптики, координаты Луны такие же, как были у Солнца 39 дней назад (движение Солнца по эклиптике происходит с запада на восток).

39 дней назад было 5 мая 2007 г и склонение Солнца на эту дату составляло $\delta=16^\circ 03'$ (способы оценки склонения Солнца на определённую дату, если нет возможности воспользоваться данными астрономического календаря, показаны в задаче 1.7). Такое же склонение было и у Луны 12 июня 2007 года (истинное

значение склонения Луны на 12.06.2007 г по астрономическому календарю $19^\circ 28'$, различие объясняется наклоном орбиты Луны к эклиптике).

Съёмка, по условию задачи, проводилась в момент высшей кульминации Луны. Определим высоту высшей кульминации Луны в Казани. Исходя из рисунка 1.18 $h_e = \delta + 90^\circ - \varphi$ и составляет $h_e \approx 16^\circ + 90^\circ - 55.5^\circ = 50.5^\circ$

Самолет располагается менее чем на градус выше Луны, поэтому его угловую высоту h над горизонтом можно принять равной 51° .

Тогда высота полёта самолёта H составит $H = L \cdot \sin h$ (рис. 1.19), где L - расстояние до самолёта, определенное в первом пункте задачи.

$$H = 5570\text{м} \cdot \sin 51^\circ \approx 4330\text{м}$$

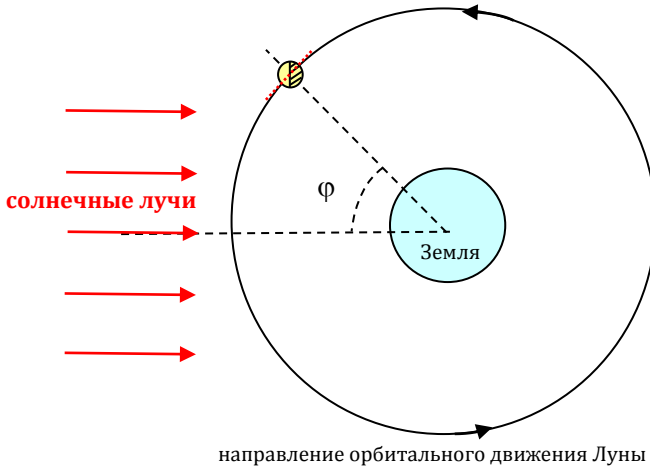


Рис. 1.17. Расположение Луны, Земли и Солнца в момент съёмки.

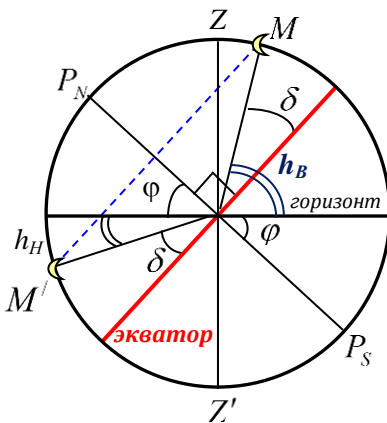


Рис. 1.18. К определению высоты верхней кульминации Луны.

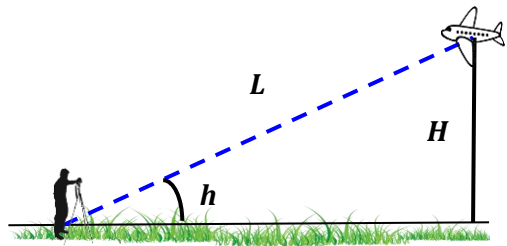


Рис. 1.19. Определение высоты полёта самолёта.

Задача №1.6 Луна, Венера и Юпитер



Фото 1.6. Луна, Юпитер и Венера над ТЮБИТАК.

1 декабря 2008 г Луна наблюдалась недалеко от Венеры и Юпитера. Это явление показано на фотографиях, сделанных в Турецкой национальной обсерватории ТЮБИТАК.

Изобразите примерное расположение планет, Луны и Земли относительно Солнца на момент съёмки. Орбиты планет и Луны считать круговыми.

Оцените высоту башни телескопа РТТ-150 Казанского университета, если фотограф располагался на расстоянии 200 м от неё. За уровень основания башни телескопа принять нижний край кадра.

Решение.

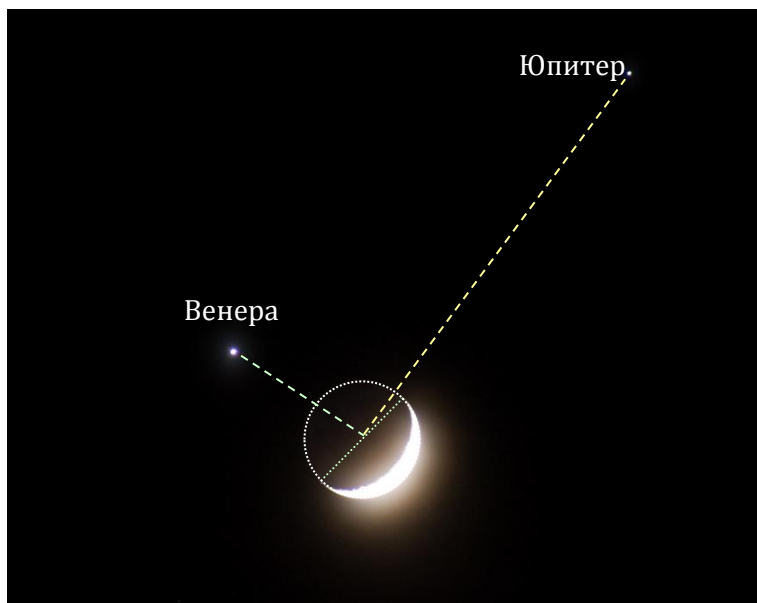


Рис. 1.20. К определению угловых расстояний между объектами.

1. Определим фазу Φ Луны по формуле: $\Phi = \frac{b}{d}$, где b - ширины лунного серпа, d - диаметр лунного диска. Измерения дают $\Phi = 0.15$.

Угол φ , на который Луна отстоит от Солнца, определяется по формуле $\varphi = 2 \arcsin \sqrt{\Phi}$ (см. задачу №1.4). При фазе 0.15 угол φ составляет 45.6° , т.е. Луна располагается для земного наблюдателя западнее Солнца на 45.6°

Угловой диаметр Луны составляет 0.5° . Угловое расстояние от центра лунного диска до Венеры в 1.34 раза больше диаметра диска Луны (рис. 1.20), следовательно, составляет $1.34 \cdot 0.5^\circ = 0.67^\circ$.

Угловое расстояние от центра лунного диска до Юпитера равно $3.85 \cdot 0.5^\circ = 1.93^\circ$.

Угол между направлениями Венера–Луна и Юпитер–Луна в проекции на плоскость эклиптики (рис. 1.21б) близок к нулю. Из-за масштаба рисунка все четыре тела (Земля, Луна, Венера и Юпитер) показаны почти на одной прямой, но это не точно так.

Планеты наблюдаются близ соединения с Луной, когда их эклиптические долготы близки. Если восстановить от планет и Луны перпендикуляры к эклиптике (рис. 1.21а), то будет видно, что разброс эклиптических долгот Луны, Юпитера и Венеры не превосходит градуса (менее двух диаметров Луны). Именно на эту величину - в пределах градуса - будут отличаться направления "Земля-Луна", "Земля-Юпитер" и "Земля-Венера" на рис. 1.21б.

Прямой угол между направлениями Луна–Венера и Луна–Юпитер наблюдается в картинной плоскости, а не в плоскости орбит. В данном случае картинная плоскость перпендикулярна плоскости эклиптики (рис. 1.21а) и наблюдаемое угловое расстояние между Венерой, Луной и Юпитером обусловлено наклоном всех трёх орбит к плоскости эклиптики.

Именно поэтому ни одно из тел не лежит точно на эклиптике в момент съёмки.

2. Пусть H - высота купола телескопа на фотографии, d - диаметр лунного диска, L - расстояние от фотографа до телескопа.

Изобразим ход лучей через объектив фотоаппарата, представив его при этом одной собирающей линзой (рис. 1.4, задача №1.1).

Высоту телескопа H_0 выразим из треугольника АОВ: $H_0 = 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}$, где

φ - угловая высота башни телескопа. Угол φ можно определить по изображению Луны на фотографии. Угловой размер лунного диска 0.5° , высота телескопа на фотографии в 12.8 раза больше лунного диска, т.е.

составляет $0.5^\circ \cdot 12.8 = 6.4^\circ$. Тогда $H_0 = 2 \cdot 200 \text{ м} \cdot \operatorname{tg} \frac{6.4^\circ}{2} \approx 22 \text{ м}$.

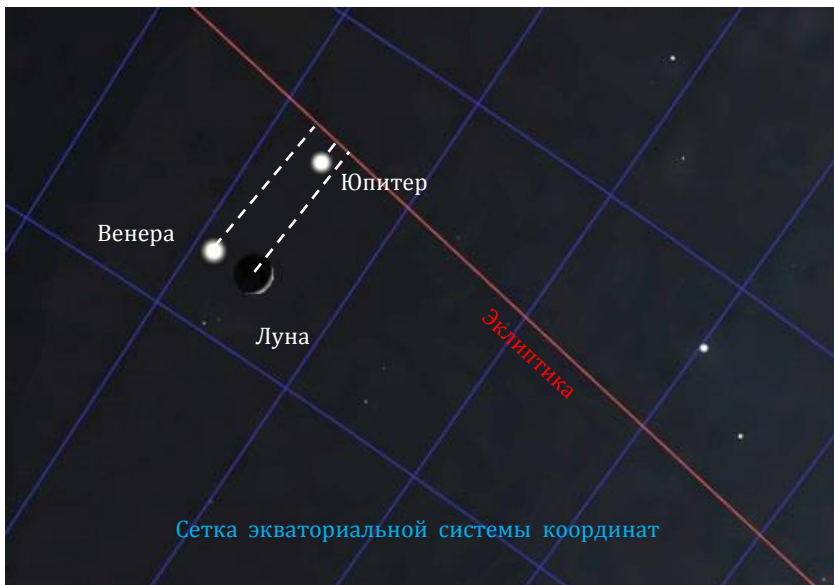


Рис. 1.21а. Взаимное расположение Луны и планет, вид с Земли.

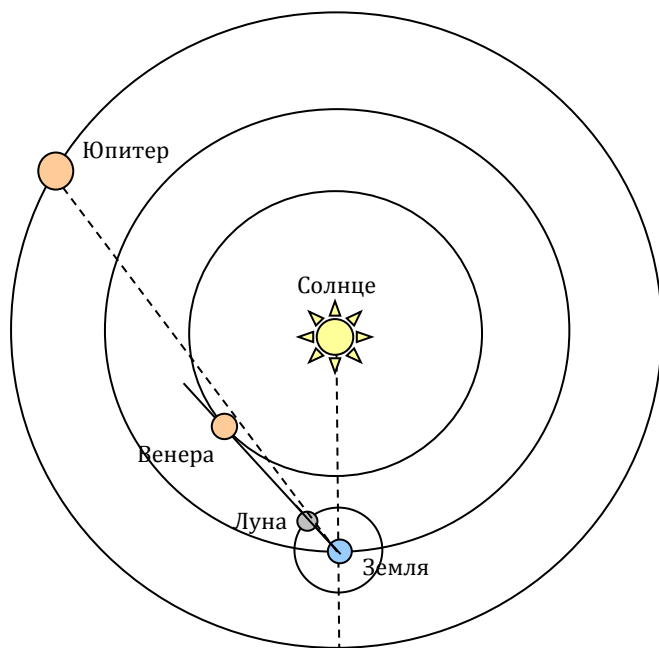


Рис. 1.21б. Взаимное расположение Луны, планет и Солнца.

Задача №1.7 Заход Луны



Фото 1.7. Заход Луны.

На фотографии, сделанной 19 июля 2015 г на вершине горы Пастухова во время проведения летней астрономической школы на базе СКАС КФУ, показан заход Луны. Фотография получена путём наложения отдельных кадров друг на друга. Матрица фотоаппарата имеет размеры 18x24 мм.

Пренебрегая рефракцией у горизонта, оцените по фотографии:

1. фазу Луны;
2. экваториальные координаты Луны в момент съёмки, считая, что Луна движется по эклиптике;
3. фазу Земли для наблюдателя, находящегося на Луне в этот момент;
4. местное среднее солнечное время захода Луны (уравнением времени пренебечь), считая, что движение Луны происходит по эклиптике.

Решение.

1. Фаза Луны Φ равна: $\Phi = \frac{b}{d}$, где b - ширины лунного серпа, d - диаметр лунного диска. Измерения дают $\Phi=0.15$.

2. Угол φ , на который Луна отстоит от Солнца, определяется по формуле $\varphi = 2 \arcsin \sqrt{\Phi}$ (см. задачу №1.4).

При фазе 0.15 угол φ составляет 45.6° , т.е. Луна располагается для земного наблюдателя восточнее Солнца на 45.6° . На этот угол Солнце продвигается по эклиптике за 45 дней (скорость движения Солнца по эклиптике примерно $1^\circ/\text{сут}$), значит, исходя из предположения, что Луна движется вдоль эклиптики, координаты Луны такие же, как будут у Солнца через 45 дней (движение Солнца по эклиптике происходит с запада на восток).

Через 45.6 дней будет 3 сентября 2015 г, прямое восхождение Солнца на эту дату составит $\alpha=10^h 46^m$, а склонение $\delta=07^\circ 49'$. Такие же координаты были и у Луны 19.07.2015 года (истинные значения координат Луны на 19 июля 2015 г по астрономическому календарю $\alpha=10^h 31^m$ $\delta=06^\circ 16'$, различие объясняется наклоном орбиты Луны к эклиптике и погрешностью измерений).

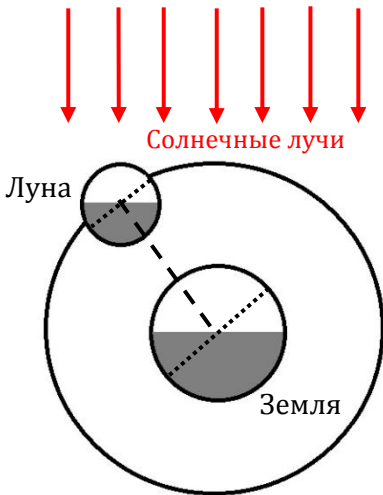


Рис. 1.22. Фазы Луны и Земли.

3. Для наблюдателя с Луны видится освещённой такая же часть земного диска, какая для земного наблюдателя является затенённой на лунном диске (рис. 1.22).

Фаза Земли Φ_z для лунного наблюдателя равна $\Phi_z = 1 - \Phi_l$, где Φ_l - фаза Луны для земного наблюдателя.

Из п.3 фаза Луны составляет 0.15, следовательно, фаза Земли для наблюдателя на Луне $1 - 0.15 = 0.85$

4. В дни, когда склонение Солнца равно нулю (день весеннего и осеннего равноденствий), оно заходит в шесть часов вечера по местному среднему солнечному времени.

Определим прямое восхождение и склонение Солнца 19 июля. Это можно сделать, заглянув в астрономический календарь, который покажет значения $\alpha = 07^h 51.3^m$, $\delta = 20^\circ 58'$, а можно оценить.

Прямое восхождение: с дня летнего солнцестояния (в этот день прямое восхождение Солнца 6^h) прошло около месяца, средняя скорость изменения прямого восхождения Солнца составляет 2^h в месяц, т.е. на 19 июля прямое восхождение Солнца составит примерно $6^h + 2^h = 8^h$.

Склонение:

1 способ (самый простой и наименее точный) основан на предположении о *равномерном* изменении склонения Солнца в течении года.

За год (365.25 дней) склонение Солнца изменяется от -23.5° до $+23.5^\circ$ и назад, т.е. на 94° .

Модуль средней суточной скорости изменения склонения Солнца составит:

$$|V_\delta| = \frac{4\varepsilon}{365.25 \text{ дней}} = 0.26 \text{ }^\circ/\text{сут}.$$

Склонение Солнца на конкретную дату будет составлять:

$$\delta = 0.26 \text{ }^\circ/\text{сут} \cdot \Delta t,$$

где Δt – количество дней, прошедших с (или оставшихся до) ближайшего момента года, когда склонение Солнца известно. Эти даты и координаты Солнца приведены в таблице 2.

Таблица 2

Координаты Солнца в дни равноденствий и солнцестояний

Явление	Приблизительная дата	α	δ
Весеннее равноденствие	21 марта	0^h	0°
Летнее солнцестояние	22 июня	6^h	$+ 23^\circ 26'$
Осеннее равноденствие	23 сентября	12^h	0°
Зимнее солнцестояние	22 декабря	18^h	$-23^\circ 26'$

При этом надо помнить, что $0.26 \text{ }^\circ/\text{сут}$ - это модуль средней скорости, и для нахождения верного ответа надо учесть знак изменения склонения (в соответствии с рис. 1.23), а также то, с какой стороны (правее или левее) от выбранной нами точки эклиптики с известными координатами находится соответствующая выбранной дате точка.

Оценим склонение Солнца в данной задаче приведённым способом. От 21 июня, дня летнего солнцестояния, до 19 июля пройдет 28 дней. Склонение Солнца изменится примерно на

$$\delta = 0.26 \text{ } \frac{\circ}{\text{сут}} \cdot 28 \text{ сут} = 7.3^{\circ}$$

и составит около 16° (оценка очень грубая, т.к. вблизи солнцестояний скорость изменения склонения Солнца наименьшая).

2 способ основан на использовании данных таблицы 3.

Вблизи солнцестояний склонение Солнца меняется со скоростью около 0.1° в сутки, за 30 дней изменение составит 3° и склонение Солнца будет около 21° .

3 способ основан на графическом представлении изменения склонения Солнца (рис.1.23). По графику, склонение Солнца на 19 июля составляет около 21° .

Склонение Солнца на любую дату года можно также определить по звёздной карте экваториальной области неба.

4 способ основан на записи уравнения эклиптики как уравнения синусоиды:

$$\delta = \varepsilon \cdot \sin \frac{2\pi(t-t_0)}{365.25}, \quad (*)$$

где ε – наклонение эклиптики к экватору (фактически, амплитуда синусоиды), $(t-t_0)$ – количество дней, прошедших с момента весеннего равноденствия t_0 .

Из уравнения (*) можно получить и максимальную скорость суточного изменения склонения Солнца. Она

Таблица 3

Скорость изменения склонения Солнца в течение года

Даты	$\Delta\delta/\text{сутки}$
19 февраля - 20 апреля	+ $0^{\circ}.4$
21 апреля - 22 мая	+ $0^{\circ}.3$
23 мая - 22 июня	+ $0^{\circ}.1$
22 июня - 22 июля	- $0^{\circ}.1$
23 июля - 21 августа	- $0^{\circ}.3$
22 августа - 23 октября	- $0^{\circ}.4$
24 октября - 22 ноября	- $0^{\circ}.3$
23 ноября - 22 декабря	- $0^{\circ}.1$
22 декабря - 21 января	+ $0^{\circ}.1$
22 января - 18 февраля	+ $0^{\circ}.3$

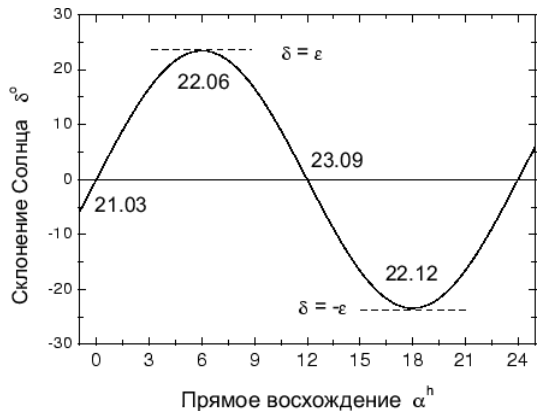


Рис. 1.23. График изменения склонения Солнца в течение года.

соответствует моментам $t-t_0=0$ и $t-t_0=183$.

Продифференцировав уравнение (*), получим

$$V_{\delta} = \varepsilon \frac{2\pi}{365.25} \cos \frac{2\pi(t-t_0)}{365.25}.$$

Для дня весеннего равноденствия $t-t_0=0$, а скорость изменения склонения Солнца $V_{\delta} = 23.5 \frac{2\pi}{365.25} \cos 0 = 0.4 \text{ } ^{\circ}/\text{сут}$, что совпадает с табличным значением для дней равноденствия и их окрестностей (таблица 2).

Из сферической тригонометрии известно, что для любой точки эклиптики справедлива формула:

$$\operatorname{tg} \delta = \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \varepsilon \quad (**).$$

Полагая изменение прямого восхождения Солнца α равномерным (это не совсем так, но намного менее грубое приближение, чем равномерность изменения склонения), можно получить прямое восхождение Солнца в любой день года

$$\alpha = \frac{0.9856 \text{ } ^{\circ}/\text{сут}}{15 \text{ } ^{\circ}/\text{час}} (t-t_0)$$

и затем, используя формулу (**), найти прямое восхождение Солнца на указанную дату.

Оценка склонения Солнца по формуле (*) на 19 июля (с момента весеннего равноденствия прошло около 120 дней) даст значение

$$\delta = 23.5^{\circ} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot 120}{365.25} \approx 21^{\circ}$$

Оценим теперь время захода Солнца 19 июля. Обратимся к рисунку 1.24. Пусть т.А - точка захода Солнца в день равноденствия, т.В - точка захода 19 июля. Из-за наклона суточных параллелей к горизонту, Солнцу до т. В необходимо пройти по суточной параллели дополнительный путь ВС.

$BC = \Delta\delta / \operatorname{tg}\beta$, $\beta = 90^\circ - \varphi$, где φ - широта местности (в данной оценке допускается существенное упрощение - часть сферы "разворачивается" на плоскость, при этом угол ABC не равен $90^\circ - \varphi$).

$BC = 21^\circ / \operatorname{tg}(90^\circ - 44^\circ) \approx 20^\circ$, при скорости движения Солнца по суточной параллели со скоростью около 15° в час этот путь Солнце преодолеет за 1.3^h , т.е. зайдет в $18^h + 1.3^h = 19.3^h$.

Вернемся к Луне: если бы склонение Луны было бы как и у Солнца на 19 июля, то время захода Луны и Солнца отличалось бы на разницу прямых восхождений. Прямое восхождение Солнца 8^h , Луны - 10.5^h , разница $10.5^h - 8^h = 2.5^h$, т.е. Луна зашла бы в $19.3^h + 2.5^h = 21.8^h$.

Но у Луны $\delta \approx 7^\circ$, а у Солнца 21° , разница 14° . Луне придется пройти меньше, чем Солнцу, на $BC = 14^\circ / \operatorname{tg}(90^\circ - 44^\circ) \approx 13.5^\circ$, скорость движения Луны вдоль суточной параллели 14.5° в час, получается, что Луна зайдет раньше примерно на 50 мин.

Итого: время захода Луны $21.8^h - 0.9^h \approx 21^h$.

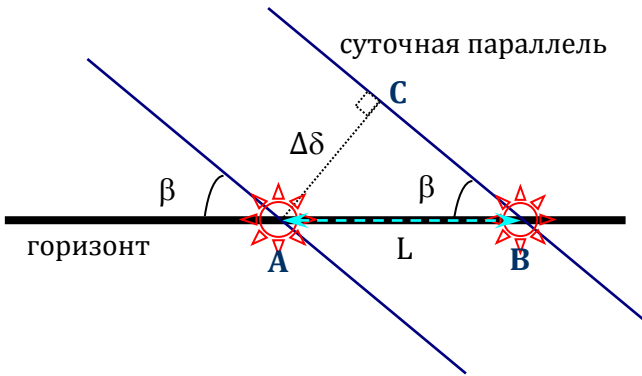


Рис. 1.24. Суточные параллели Солнца на заходе в различные дни года.

Задача №1.8 Луна и самолёт



Фото 1.8. Восход Луны и самолёт.

На комбинированной фотографии представлен восход Луны 25 января 2013 года. Оцените по снимку:

1. через какой промежуток времени были сделаны отдельные снимки;
2. время, прошедшее между первым и последним снимками;
3. с какого расстояния были сделаны отдельные кадры (длину самолета принять равной 30 метрам).

Решение.

1. Угловой размер Луны – 0.5° . На фотографии расстояние между центрами дисков Луны в 1.4 раза больше размера диска Луны, следовательно, Луна продвинулась за время между последовательными снимками на $1.4 \cdot 0.5^\circ = 0.7^\circ$.

Угловая скорость передвижения Луны по небесному экватору 14.5° в час (15° в час – скорость смещения Луны по небесному экватору вследствие суточного вращения Земли, 13° в сутки – смещение Луны относительно звёзд, происходящее против направления вращения небесной сферы, является следствием орбитального движения Луны вокруг Земли).

Движение Луны по суточной параллели, отличающейся от небесного экватора, происходит со скоростью $14.5 \frac{\circ}{\text{час}} \cdot \cos \delta$.

Оценим склонение Луны на момент съёмки. Луна на снимке почти полная, поэтому разность часовых углов (и прямых восхождений) Солнца и Луны близка к 12^h . Можно учесть, что полнолуние ещё не наступило и оценить разницу прямого восхождения Луны на снимке и в момент полнолуния как 1^h . Получается, что прямое восхождение Луны на момент съёмки: $\alpha(\text{Луны}) = \alpha(\text{Солнца}) + 12^h - 1^h$.

Луна находится на эклиптике там же, где Солнце будет находиться через 5.5 месяцев после момента съёмки (мы пренебрегаем наклоном орбиты Луны к плоскости эклиптики – здесь важна лишь оценка склонения). Через 5.5 месяца наступит середина июля и склонение Солнца будет примерно 22° (методику оценки склонения Солнца см. в решении задачи 1.7).

Тогда скорость движения Луны по суточной параллели в день съёмки $14.5 \frac{\circ}{\text{час}} \cdot \cos 22^\circ = 13.4 \frac{\circ}{\text{час}}$.

Значит, промежуток времени между первым и последним снимками:

$$0.7^\circ \cdot 13.4 \frac{\circ}{\text{час}} = \frac{0.7^\circ \cdot 60 \text{ мин}}{13.4^\circ} \approx 3 \text{ мин.}$$

2. На фотографии расстояние между центрами первого и последнего дисков Луны в 7.2 раза больше размера диска Луны, т.е. Луна продвинулась на 3.6° , значит, прошло 15 минут (см. п.1).

3. Длина d самолета на снимке в 5.5 раз меньше диска Луны, получается, что угловой размер самолета $\varphi = 0.5^\circ / 5.5 = 0.09^\circ \approx 0.00157 \text{ рад}$. Т.к. угол мал, то $d = \varphi L$, где L - расстояние до самолета, φ - угловой размер самолета в радианах. Откуда, $L = \frac{d}{\varphi} = \frac{30 \text{ м}}{0.00157 \text{ рад}} \approx 19000 \text{ м}$.

Задача №1.9 Луна над Антальей

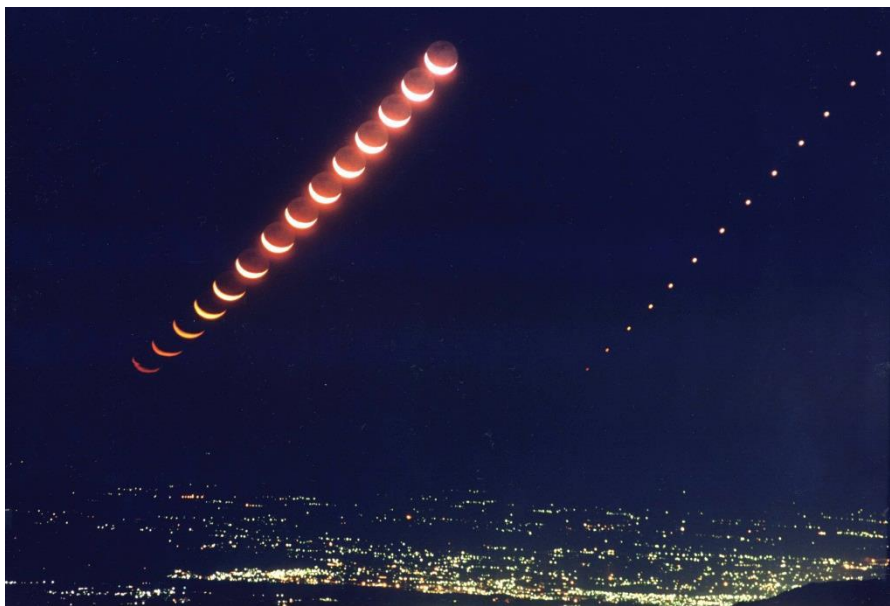


Фото 1.9. Восход Луны и Венеры над городом Анталья.

На предоставленной Вам фотографии запечатлены Луна и Венера над городом Анталья (Турция). Внимательно изучив фотографию, дайте ответы на следующие вопросы:

1. в какое время суток была сделана фотография? Как изменился бы ответ, если бы снимок был сделан в южном полушарии?
2. объясните, почему на фотографии у горизонта не заметно пепельного света Луны;
3. лунный серп и Венера у горизонта окрашены в красно-оранжевый цвет; чем выше над горизонтом поднимается Луна, тем окраска становится бледнее, ближе к белому. Объясните изменение окраски восходящей Луны и Венеры;
4. почему у горизонта форма лунного серпа отлична от круговой?
5. почему на нижних изображениях Луны край серпа неровный?
6. оцените, на какой географической широте находится город Анталья (склонение Венеры на момент съёмки было близким к нулю) .

7. каково фокусное расстояние объектива фотоаппарата? Размеры негатива фотоплёнки 24×36 мм;
8. оцените погрешность определения фокусного расстояния объектива для случая отпечатка фотографии размером 20×30 см;
9. что бы изменилось на фотографии, если бы съёмка велась в Казани?

Решение.

1. В северном полушарии (где и расположена Турция) вид лунного серпа, показанного на фотографии, соответствует стареющей Луне. Наблюдать стареющую Луну можно только утром перед восходом Солнца на востоке. Следовательно, съёмка велась утром.

В южном полушарии изображенный вид лунного серпа соответствует растущей (молодой) Луне. Растущую Луну можно наблюдать вблизи горизонта вечером на западе. Следовательно, съёмка велась вечером.

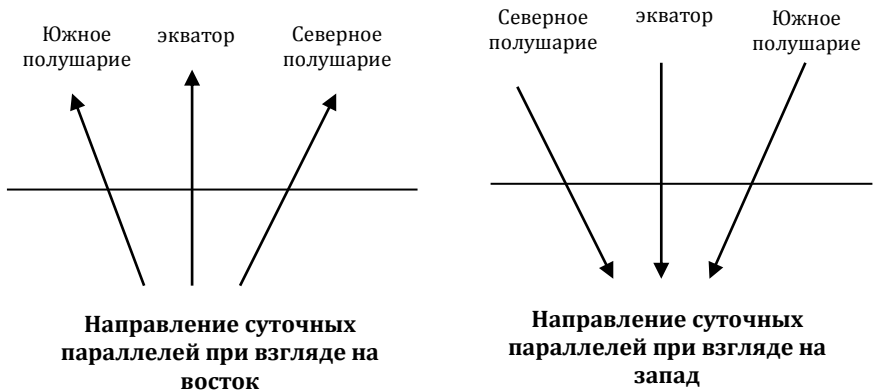


Рис. 1.25. Направление суточных параллелей в южном и северном полушариях.

2. Пепельный свет появляется вследствие слабого освещения тёмной части Луны солнечным светом, отражённым от Земли. Хорошо заметен пепельный свет в то время, когда серп Луны мал, вблизи новолуния, т.е. когда к Луне обращена почти вся освещённая Солнцем поверхность Земли.

У горизонта световые лучи испытывают наибольшее поглощение (т.к. именно эти лучи проходят в атмосфере наибольший путь), поэтому пепельный свет Луны у горизонта не заметен.

3. Лучи, идущие от светил, находящихся вблизи горизонта, проходят больший путь в атмосфере Земли, чем лучи, идущие от светил, расположенных в зените (рис. 1.26). Чем длиннее путь светового луча, тем сильнее рассеиваются лучи синей области спектра (релеевское рассеяние), тогда как красные лучи достигают наблюдателя, что приводит к "покраснению" светил у горизонта.

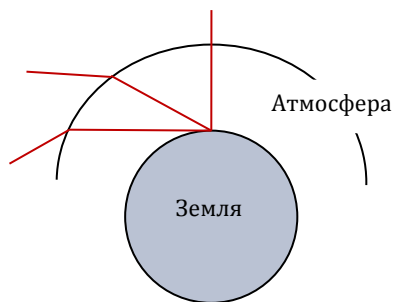


Рис. 1.26. Прохождение световых лучей через атмосферу (модель однородного слоя).

4. Изменение формы лунного диска, а также диска Солнца у горизонта при их восходе или заходе объясняется рефракцией. Рефракция нижних краёв дисков этих светил у горизонта почти на $6'$ больше рефракции верхних краёв, а так как горизонтальные диаметры рефракцией не изменяются, то видимые диски Луны и Солнца принимают овальную форму.

5. В атмосфере Земли всегда существуют конвективные потоки воздуха (т.н. «дрожание атмосферы»), из-за чего плотность и коэффициент преломления слоёв воздуха быстро меняются со временем и различны в разных точках. Лучи света, проходя сквозь беспокойную атмосферу, вследствие неодинакового преломления за время выдержки попадают не точно в одну и ту же точку на негативе, что приводит к «размазыванию» изображения светящегося объекта. Наибольшие отклонения из-за дрожания атмосферы испытывают лучи света, идущие у горизонта, т.к. им приходится проходить в атмосфере наибольший путь. Путь лучей, идущих от светил, расположенных вблизи зенита, в десятки раз меньше,

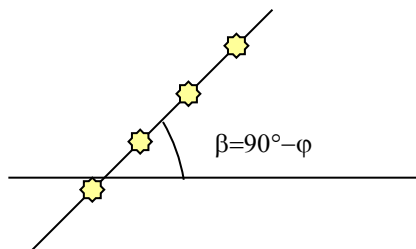


Рис. 1.27. Наклон суточной параллели к горизонту при $\delta=0^\circ$.

а значит и отклонение от первоначального направления менее значительно. Следовательно, самый неровный край будет у нижнего изображения лунного серпа.

6. Склонение Венеры, по условию задачи, близко к нулю, следовательно, можно с

достаточно высокой точностью считать, что наклон суточной параллели Венеры составляет с горизонтом угол, близкий к $\beta = 90^\circ - \varphi$, где φ - географическая широта местности. Определить угол β можно, найдя любую его тригонометрическую функцию. Измерения дают $\varphi \approx 40^\circ$ (что очень близко к истине, реальная географическая широта Анталы 37° с.ш.).

7. Определим, каков диаметр диска Луны на негативе.

Пусть d_1 - линейный диаметр Луны на фотографии, d - линейный диаметр Луны на негативе, b_1 - высота фотографии, b - высота негатива, равная по условию 24 мм.

Луна на негативе во столько же раз меньше, чем на фотографии, во сколько раз высота негатива меньше высоты фотографии:

$$\frac{b_1}{b} = \frac{d_1}{d}.$$

Откуда $d = \frac{d_1 \cdot b}{b_1},$

$$d = 0.054 \cdot 24 \text{ мм} \approx 1.3 \text{ мм}.$$

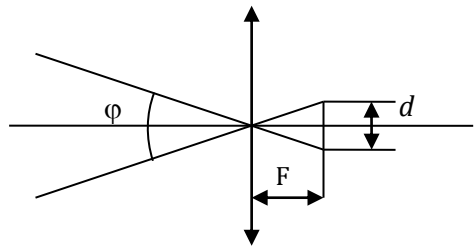


Рис. 1.28. Ход лучей через объектив.

Т.к. Луна находится далеко за двойным фокусным расстоянием объектива (практически на бесконечности), то ее изображение получается в фокальной плоскости объектива.

Угловой диаметр Луны составляет $\varphi = 0.5^\circ$. Из геометрических соображений и рисунка 1.25 получаем: $\text{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{r}{F} = \frac{d}{2 \cdot F}$, где r - радиус, а d - диаметр Луны на негативе, F - фокусное расстояние объектива фотоаппарата.

Откуда $F = \frac{d}{2 \cdot \text{tg} \frac{\varphi}{2}}$. Расчеты дают $F = \frac{1.3 \text{ мм}}{2 \cdot \text{tg} \frac{0.5^\circ}{2}} \approx 150 \text{ мм}.$

8. Оценим относительную погрешность ε : $\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_1} \cdot 100 \%$, $\Delta d = 1 \text{ мм}$

(т.к. измерения ведутся линейкой с ценой деления 1 мм), $d_1 = 1.1 \text{ см}$ - диаметр Луны на фотографии размером 20×30 см.

$$\varepsilon = \frac{1_{мм}}{11_{мм}} \cdot 100\% \approx 10\%$$

9. Во-первых, будет различным наклон суточных параллелей Венеры и Луны к горизонту. Т. к. географическая широта Казани больше ($\varphi = 56^\circ$), то светила будут восходить под меньшим углом к горизонту.

Во-вторых, чем выше широта, тем ближе серп лунного месяца к вериткали (т.е. тем более он напоминает букву "С" - вспоминаем детское правило, как отличить молодую Луну от стареющей: серп растущей напоминает букву "Р" без вертикальной палочки, а стареющей - букву "С"). В околоэкваториальной области восходящий или заходящий серп Луны практически "лежит на боку", отсюда ассоциация с лодочкой, имеющаяся у многих населяющих южные страны народов.

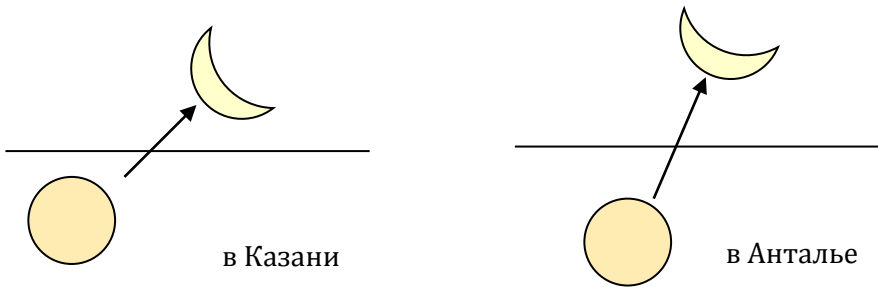


Рис. 1.29. Расположение лунного серпа на восходе на разных широтах.

Задача №1.10 Восход Луны и Венеры



Фото 1.10. Восход Луны и Венеры.

На предоставленной вам комбинированной фотографии (8 отдельных снимков, полученных неподвижной камерой, наложены друг на друга в программе Adobe Photoshop), сделанной 14 августа 2012 года на казанской астрономической школе, изображен восход Луны и Венеры.

По фотографии оцените угловое расстояние между Луной и Венерой на момент съёмки.

Почему определение широты места съёмки по этому снимку менее точно, чем по снимку в предыдущей задаче (задача №1.9 «Луна в Анталье»)?

Решение.

1. На фотографии расстояние l от центра диска первого изображения Луны до первого изображения Венеры примерно в 4.6 раза больше диаметра диска Луны d . Видимый угловой диаметр Луны составляет 0.5° , следовательно, угловое расстояние между Луной и Венерой $0.5^\circ \cdot 4.6 = 2.3^\circ$.

Съёмка Луны и Венеры в Анталье производилась вблизи дня осеннего равноденствия, когда склонение Солнца было равно почти 0° , Луна и Венера находились на небольшом угловом расстоянии от Солнца, а, следовательно, суточная параллель Венеры была наклонена к горизонту на угол, близкий к $\beta = 90^\circ - \varphi$, где φ - географическая широта местности.

Во время съёмки Луны и Венеры в Казани, склонение Солнца составляло около 14° (данные астрономического календаря на 14 августа 2012 г), следовательно, наклон суточной параллели Луны и Венеры к горизонту $\beta \neq 90^\circ - \varphi$, однако, это отклонение невелико.



Рис. 1.30. К определению угловых расстояний между объектами.

Задача №1.11 Луна и планеты



Фото 1.7. Луна, Венера и Регул.

На фотографии, сделанной 19 июля 2015 г на вершине горы Пастухова во время проведения летней астрономической школы на базе СКАС КФУ, показано положение Луны и Венеры сразу после того, как край Солнца скрылся за горизонтом. Считая, что линия горизонта совпадает со средней линией гор, а матрица фотоаппарата имеет размеры 18x24 мм, определите возраст Луны (время, прошедшее от момента новолуния до момента съёмки). Наклоном орбиты Луны к эклиптике пренебречь.

Решение.

Определим угловое расстояние от Луны до Солнца, считая, что Солнце только что село за горизонт.

Точку захода Солнца можно определить несколькими способами:

1 способ. Проведем линию, соединяющие "рога" месяца; пересечение с горизонтом серединного перпендикуляра к этой линии примерно укажет точку захода Солнца. Однако, погрешность существенная, т.к. наклон орбиты Луны к эклиптике не учтён (рис. 1.31);

2 способ. Звезда Регул лежит почти на эклиптике, Венера отклоняется от эклиптики при наблюдении с Земли не более, чем на 8° , Луна - не



Рис. 1.31. К первому способу определения точки захода Солнца.

более, чем на 5° , т.е. положение эклиптики можно примерно провести так, как показано на рисунке 1.32. Для более точного изображения положения эклиптики необходим хотя бы ещё один объект, лежащий на эклиптике (или очень близко к ней), например, Юпитер, находившийся в тот день почти на линии эклиптики.

3 способ. Грубую оценку местоположения точки захода Солнца можно сделать по области неба у горизонта с наибольшей яркостью. Но по данному кадру сделать это не удастся, т.к. точка захода выходит за пределы кадра и на фотографии нет области, где небо у горизонта вновь становится темнее.

Угловой размер Луны 0.5° . Расстояние от Луны до Солнца в первом способе (рис. 1.31) в 45 раз больше диска Луны, т.е. угловое расстояние от Солнца до Луны составляет $45 \cdot 0.5^\circ = 22.5^\circ$. Второй способ (рис. 1.32) дает значение углового расстояния в 30° . Примем за среднее значение 27° .

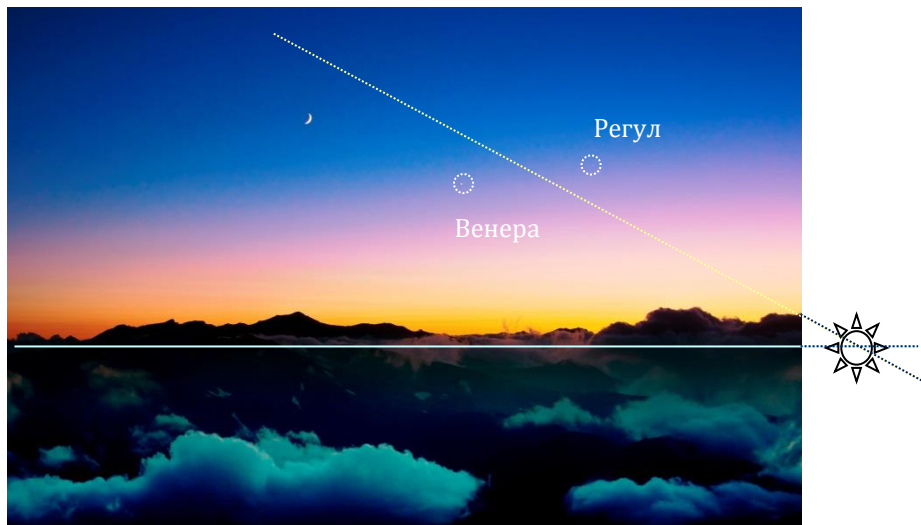


Рис. 1.32. Ко второму способу определения точки захода Солнца.

Тогда фаза Луны составит (см. задачу №1.4)

$$\Phi = \sin^2 \frac{\varphi}{2} = \sin^2 \frac{27^\circ}{2} \approx 0.05.$$

Возраст Луны t выразим из формулы: $\varphi = 360^\circ \cdot \frac{t}{S}$, где S - синодический период обращения Луны, составляющий 29.53 дня.

$$t = \varphi \cdot \frac{S}{360^\circ} = 27^\circ \cdot \frac{29.53 \text{ дня}}{360^\circ} \approx 2.2 \text{ дня}$$

*Фазу Луны можно определить по доли освещённой части диска, однако, на данной фотографии это сделать не позволяет слишком мелкое изображение лунного диска.

Неточность методов определения точки захода Солнца приводит к ошибке почти в два раза (возраст Луны на момент съёмки составлял 3.8 дня), причём наименьшую ошибку метода даёт второй способ.

Задача №1.12 Солнечный протуберанец



Фото 1.8. Солнце в линии H_{α} .

Вам представлен снимок Солнца, сделанный через фильтр, центрированный на красную линию водорода H_{α} с $\lambda = 6563 \text{ \AA}$, которая образуется в хромосфере Солнца и позволяет изучать её структурные элементы. Оцените высоту солнечных протуберанцев. На какую высоту поднялось солнечное вещество в выбросе?

Решение.

Линейный масштаб фотографии $k = \frac{D}{d}$, где d - линейный диаметр

Солнца на фотографии, D - истинный линейный диаметр Солнца, составляющий $1.4 \cdot 10^9$ м.

Для оценки будем считать, что основание протуберанцев проецируется на видимый край солнечного диска. Тогда истинная высота

протуберанца H будет в k раз больше его высоты h на снимке

$$H = k \cdot h = \frac{D_{[M]}}{d_{[cm]}} \cdot h_{[cm]}.$$

Для протуберанца №1 получаем $H_1 \approx 2.3 \cdot 10^7$ м (что составляет около 1.8 диаметров Земли), для протуберанца №2 $H_2 \approx 3.4 \cdot 10^7$ м (что составляет около 2.6 диаметров Земли).

Высота выброса солнечного вещества составит $H_3 \approx 4.9 \cdot 10^7$ м (3.8 диаметров Земли).

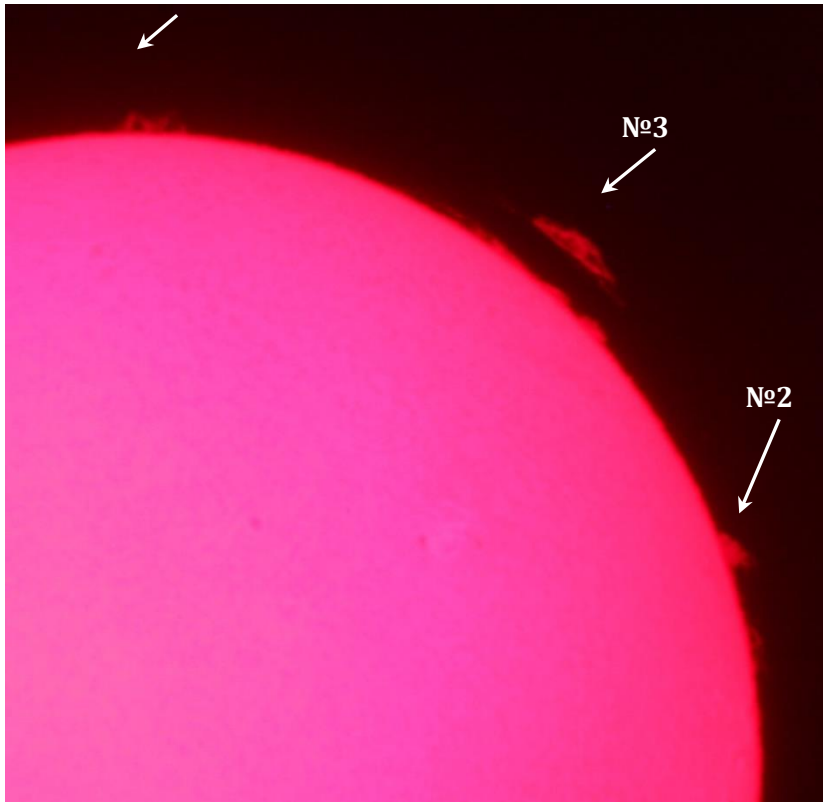


Рис. 1.33. Солнечные протуберанцы в линии $H\alpha$.

Задача №1.13 Пятно на Солнце



Фото 1.13. Солнечное пятно.

Вы видите фотографию диска Солнца с группой солнечных пятен, полученную 13 августа 2012 года во время проведения летней астрономической школы в пос. Дачное недалеко от Казани. Оцените, во сколько раз размер пятна на Солнце (за размер пятна принять диаметр полутени) больше диаметра Земли.

Решение.

Определим линейный масштаб фотографии $k = \frac{R}{r}$, где r - линейный радиус Солнца на фотографии, R - истинный линейный радиус Солнца, составляющий $0.7 \cdot 10^9$ м.

Т.к. весь диск Солнца не вошел на фотографию, необходимо определить положение центра диска Солнца на снимке. Проведём две хорды у края

диска и восстановим в их середине перпендикуляры, точка пересечения перпендикуляров - центр окружности (рис. 1.34).

Пятно расположено вблизи центра диска Солнца, поэтому искажением размеров пятна из-за проецирования части поверхности сферы на картинную плоскость можно пренебречь.

Тогда размер пятна

$$D = k \cdot d = \frac{R_{[M]}}{r_{[cm]}} \cdot d_{[cm]},$$

где d - диаметр пятна на фотографии.

Для данной фотографии $D \approx 2.4 \cdot 10^7$ м или $2.4 \cdot 10^7$ м / 12800 000 м ≈ 2 диаметра Земли.

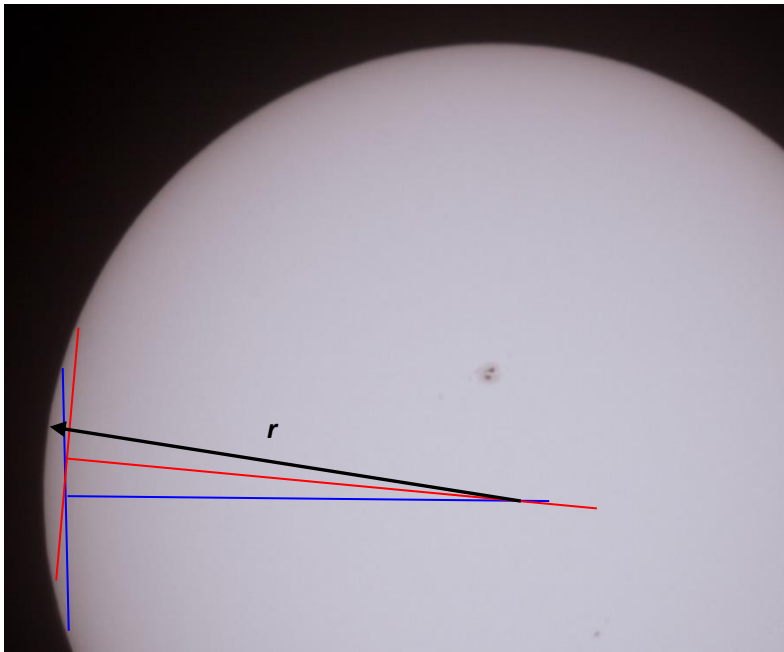


Рис. 1.34. Определение положения центра диска Солнца.

Задача №1.14 Закат над Калугой

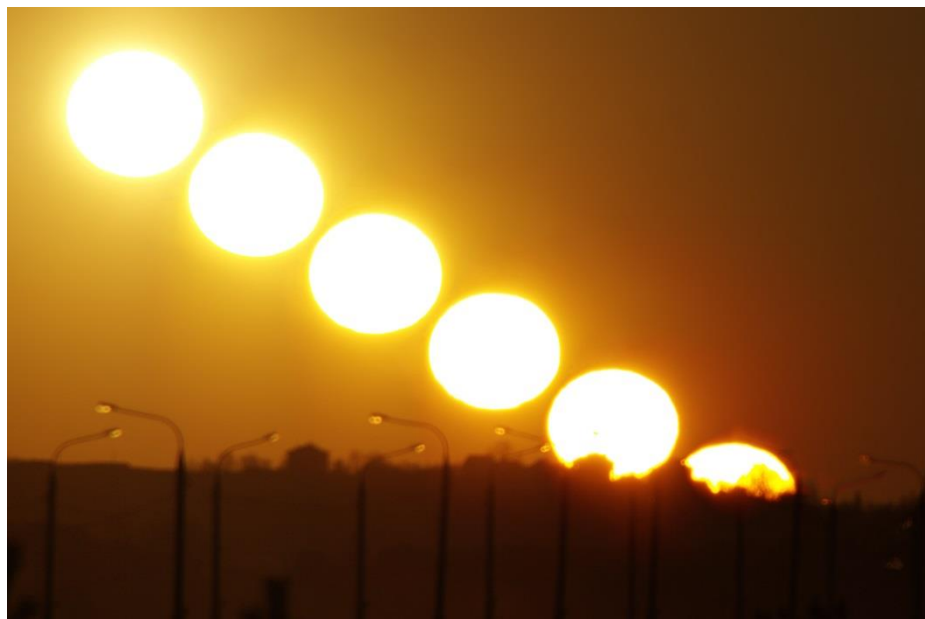


Фото 1.9. Закат над Калугой.

Объясните, почему при приближении к горизонту солнечный диск становится все более "сплюснутым"?

Решение.

При приближении к горизонту солнечным лучам приходится проходить всё более длинный путь в атмосфере, рефракция увеличивается и принимает максимальное значение вблизи горизонта. Это приводит к тому, что верхняя и нижняя часть солнечного диска приподнимается вследствие рефракции неодинаково, диск "сплюсчивается", горизонтальный диаметр рефракцией не изменяется.

Задача №1.15 Закат Солнца на Кавказе



Фото 1.15. Закат Солнца в различные дни.

На фотографиях, полученных на СКАС КФУ в августе 2015 года, показан заход Солнца в разные дни - 1 и 2 августа 2015 г. Снимки выполнялись с одной и той же точки на местности. Матрица фотоаппарата имеет размеры 18x24 мм.

Определите по фотографиям (масштаб снимков одинаковый):

1. угол наклона суточной параллели Солнца к горизонту; почему по этому углу нельзя оценить широту места съёмки? Широта СКАС составляет 44° ;
2. суточное изменение склонения Солнца;
3. какой кадр сделан 01.08, а какой - 02.08?

Решение.

1. Проведем суточную параллель Солнца (рис. 1.35). С достаточной степенью точности за уровень, параллельный горизонту, можно принять нижний край кадра. На фотографии угол наклона суточной параллели Солнца к горизонту составляет около 38° .

Суточные параллели светил, склонения которых малы, наклонены к горизонту под углом, близким к $90^\circ - \varphi$, где φ - географическая широта местности. Если бы склонение Солнца было около 0° , то наклон суточной параллели был бы равен $90^\circ - 44^\circ = 46^\circ$ и по нему можно было бы оценить широту местности. Однако, в начале августа склонение Солнца составляет около 20° и угол наклона суточной параллели уже не равен $90^\circ - \varphi$.



Рис. 1.35. Суточная параллель Солнца.

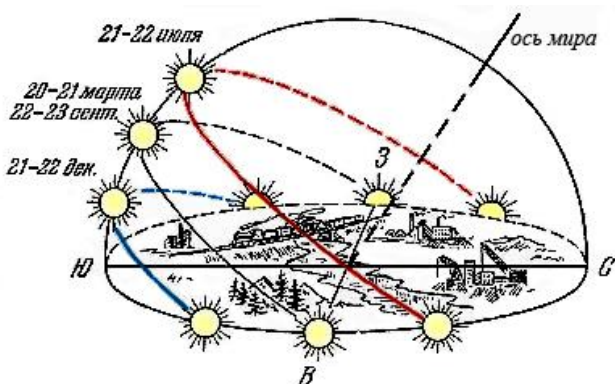


Рис. 1.36. Суточные параллели Солнца в различные дни года.

2. Изобразим две суточные параллели Солнца (рис. 1.37), рассуждения относятся к точке центра солнечного диска. Т. к. склонение Солнца изменяется с течением времени, точка захода солнечного диска смещается вдоль линии горизонта на L градусов. Тогда изменением склонения Солнца $\Delta\delta$ будет отрезок AC .

Совместим изображения обеих фотографий и проведем необходимые построения (рис. 1.38).

Отрезок $\Delta\delta$ в 2.6 раза меньше горизонтального диаметра Солнца (вертикальный диаметр сжимается рефракцией). Считая, что угловой размер горизонтального диаметра Солнца составляет 0.5° , получаем $\Delta\delta = 0.5^\circ / 2.6 \approx 0.2^\circ$

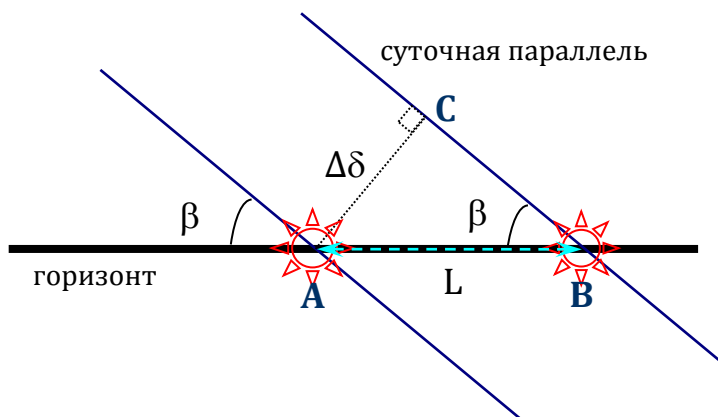


Рис. 1.37. Смещение суточной параллели Солнца за день.

3. Нарисуем суточные параллели Солнца для дней равноденствий и солнцестояний (рис. 1.39).

На второй фотографии точка захода Солнца сместилась влево - к точке запада (снимки сделаны в период между летним солнцестоянием и осенним равноденствием). Получается, что второй снимок сделан позже первого.

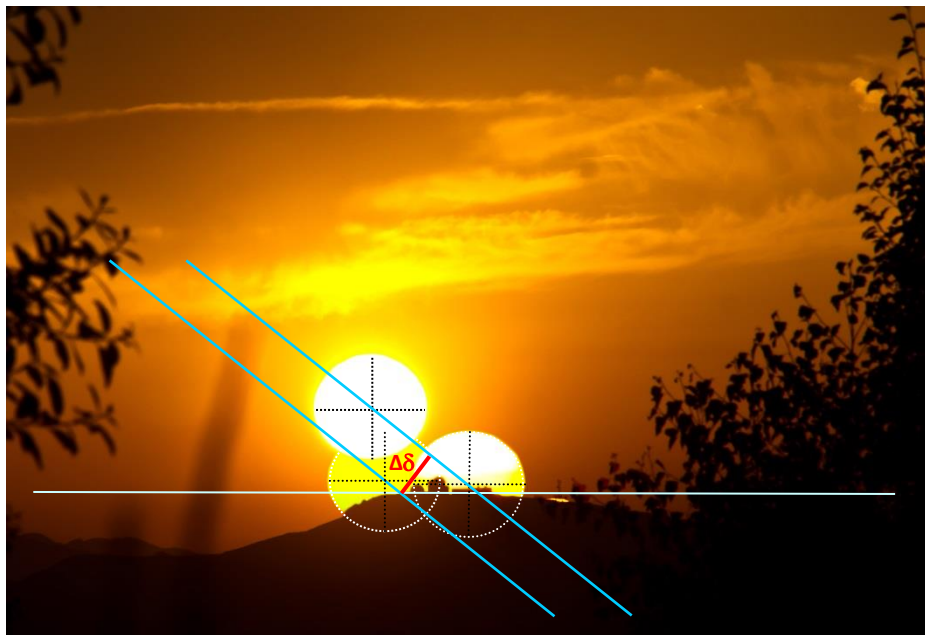


Рис. 1.38. Суточное смещение точки захода Солнца.

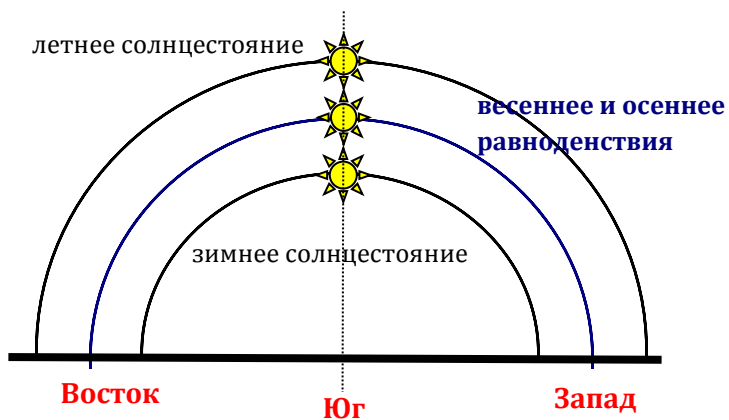


Рис. 1.39. Суточные параллели Солнца в дни равноденствий и солнцестояний.

Задача №1.16 Закат Солнца в горах

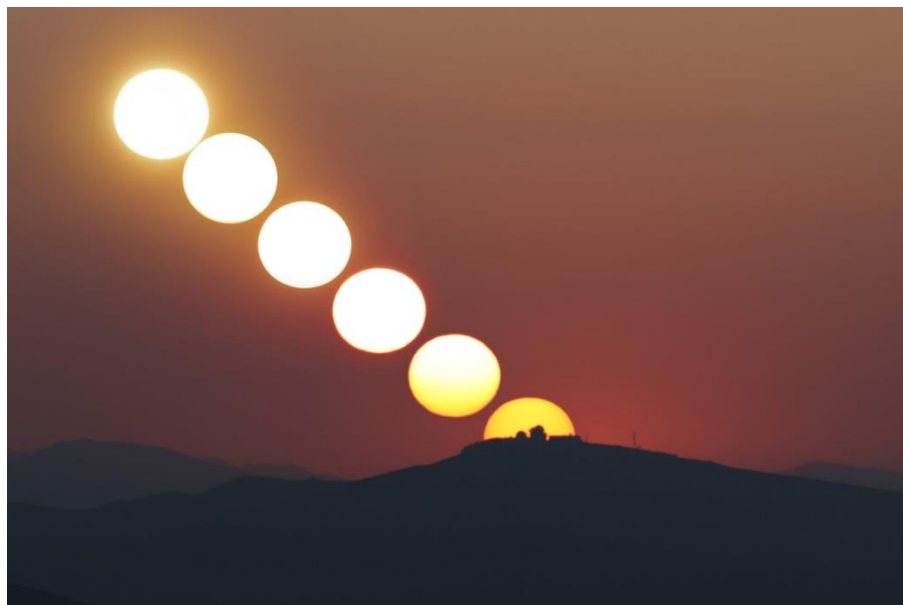


Фото 1.16-1. Закат Солнца за гору Чапалы 1 августа 2016 г.

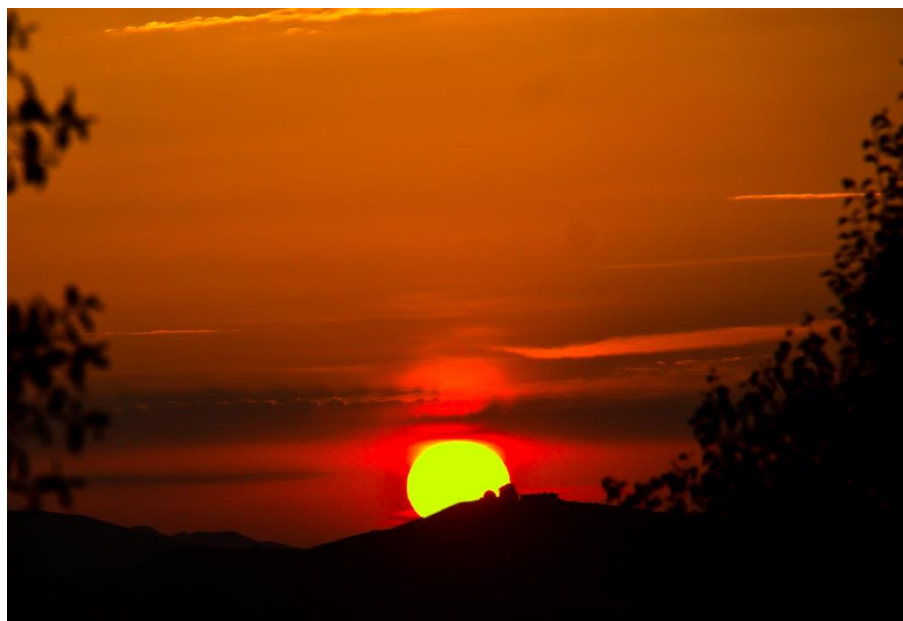


Фото 1.16-2. Закат Солнца за гору Чапалы 2 августа 2015 г.

Перед вами две фотографии заката Солнца, сделанные на Северокавказской астрономической станции КФУ 2 августа 2015 года (фото 1.16-2) и 1 августа 2016 года (фото 1.16-1). Точка съёмки в обоих случаях была одна и та же. Оцените по фотографиям продолжительность тропического года.

Решение.

Год 2016 был високосным, получается, что с момента заката 2 августа 2015 года по заход Солнца 1 августа 2016 года прошло 365 суток – почти год. Однако, если бы продолжительность тропического года включала целое число суток, то точка захода Солнца на обеих фотографиях была бы одной и той же (точка съёмки не менялась). Но на фотографии, снятой 1 августа 2016 года, Солнце садится за горизонт в точке, смещённой правее точки захода Солнца 2 августа 2015 года (рассуждения относятся к центру диска Солнца). Этот факт говорит о том, что склонение Солнца на момент заката 1 августа 2016 года было больше, чем на момент заката 2 августа 2015 года (задача №1.15). Поскольку в августе склонение Солнца убывает, то между рассматриваемыми событиями (закатами Солнца) прошло несколько меньше тропического года. Оценим, на сколько меньше, определив разницу склонений Солнца в указанные даты.

Изобразим две суточные параллели Солнца, наложив две фотографии друг на друга и выровнив их по постройкам обсерватории на горизонте (рис. 1.40). Изменением склонения Солнца будет отрезок $\Delta\delta$ (пояснения даны в задаче №1.15 и рис.1.37).

Отрезок $\Delta\delta$ в 8.3 раза меньше горизонтального диаметра Солнца (вертикальный диаметр сжимается рефракцией). Считая, что угловой размер горизонтального диаметра Солнца составляет 0.5° , получаем $\Delta\delta = 0.5^\circ / 8.3 \approx 0.06^\circ$. В начале августа скорость изменения склонения Солнца составляет $v_{\Delta\delta} = 0.25^\circ/\text{сут}$ (по данным астрономического календаря или см. решение задачи №1.7). Тогда время, за которое склонение Солнца изменится на $\Delta\delta$, составит:

$$\Delta t = \frac{\Delta\delta}{v_{\Delta\delta}}, \quad \Delta t = \frac{0.06^\circ}{0.25^\circ/\text{сут}} = 0.24 \text{ сут} = 5.76 \text{ часа}$$

Таким образом, между двумя закатами, показанными на фотографиях, прошло 365 дней, и это на 5.76 часа (0.24 дня) меньше продолжительности тропического года (когда параллели совпали бы). Отсюда получим, что год длится 365.24 сут.

Истинное значение продолжительности тропического года составляет 365.2421897 дней.

В завершение надо отметить, что, формально, среднее солнечное время захода Солнца в данной точке зависит от его склонения, которое было разным 02.08.2015 и 01.08.2016. Поэтому между моментами захода прошло не точно 365 дней, и на эту же поправку наш ответ будет отличаться от верного. Но, поскольку разница времен захода составляет величину порядка минуты, а точность измерений позволяет определить продолжительность года не лучше, чем 0.01 суток (около 10 минут), то на практике такое допущение не приведет к ошибке.

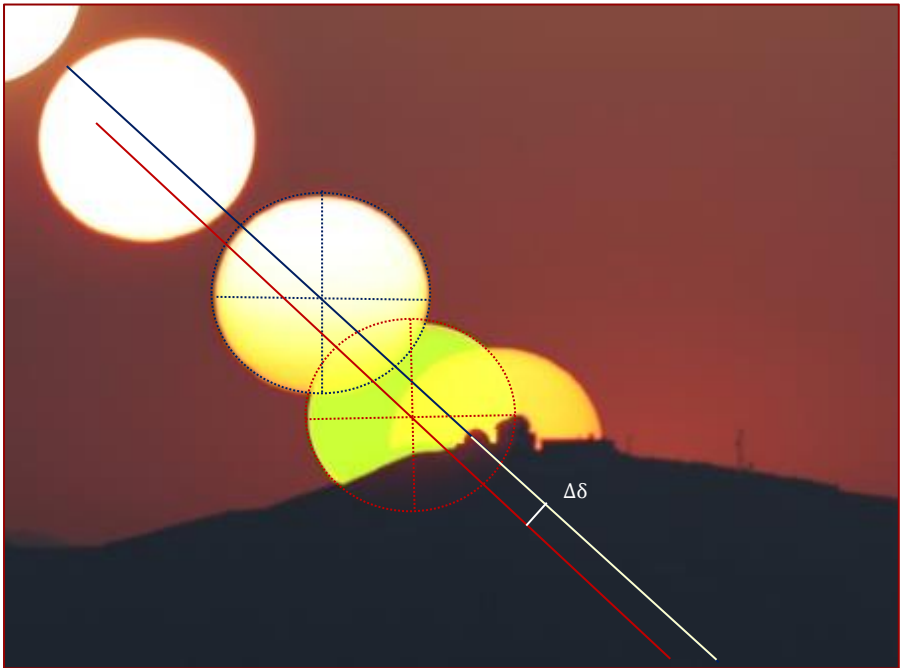


Рис. 1.40а. Суточные параллели Солнца для двух закатов.

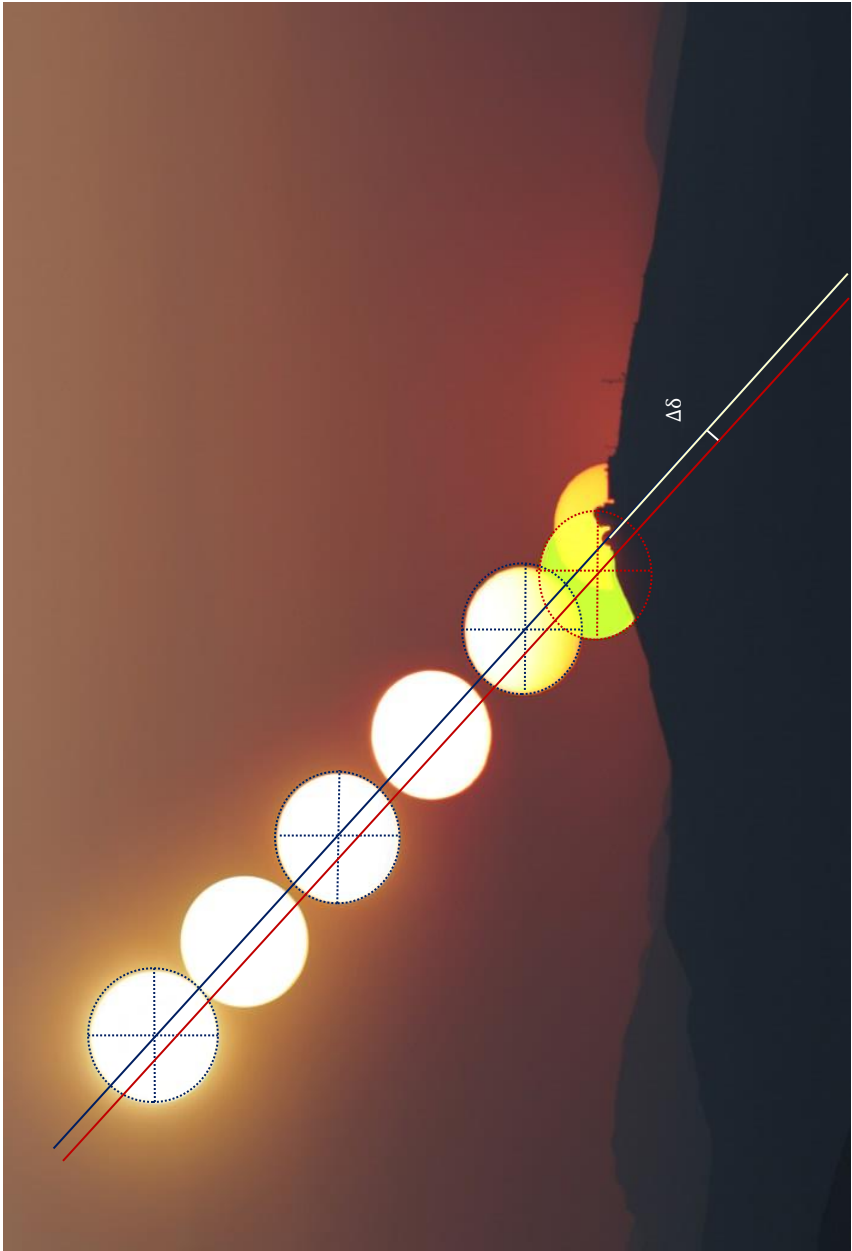


Рис. 1.40б. Построение суточных параллелей Солнца для двух закатов.

Задача №1.17 Солнечное затмение

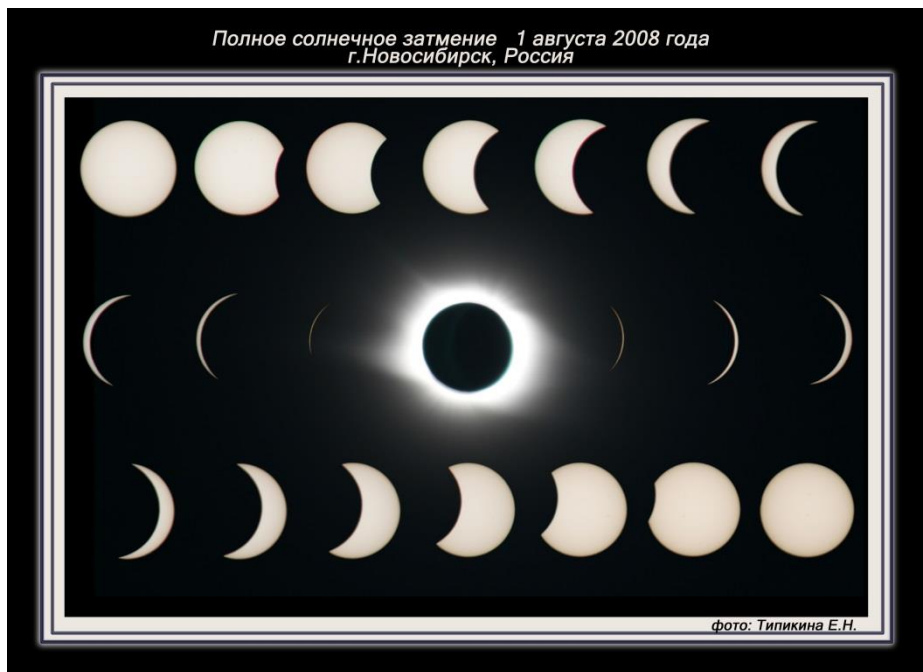


Фото 1.17. Солнечное затмение 1 августа 2008 года.

Перед вами комбинированная фотография, отражающая фазы полного солнечного затмения 1 августа 2008 года, наблюдавшегося в г. Новосибирске.

По фотографии определите:

1. какой была солнечная активность в августе 2008 г;
2. интервал съёмки между вторым и седьмым изображениями Солнца;
3. какие структурные элементы солнечной короны можно рассмотреть на снимке.

Решение.

1. Фазу солнечной активности можно качественно оценить по виду солнечной короны, сфотографированной во время полной фазы затмения (снимок в центре коллажа). Корона не симметрична, на снимке наблюдаются длинные лучи, выдающиеся влево вверх и вправо вниз. Такой вид корона принимает в годы низкой активности Солнца.



Рис. 1.41. Вид солнечной короны в годы максимума и минимума солнечной активности.

Убедиться в правильности данного вывода можно, рассмотрев график зависимости чисел Вольфа для разных лет (рис. 1.42).

2. Определим, на сколько градусов продвинулась Луна по солнечному диску за время между кадрами №2 и №7 (рис. 1.43). На фотографии расстояние Δx в 1.4 раза меньше диаметра Солнца, следовательно, Луна сместилась на 0.36° (угловой диаметр Солнца примем равным 0.5°).

Луна движется относительно звёзд со скоростью 13° в сутки, получается, что на 0.36° Луна сместится за 0.66 часа, т.е. за 40 минут.

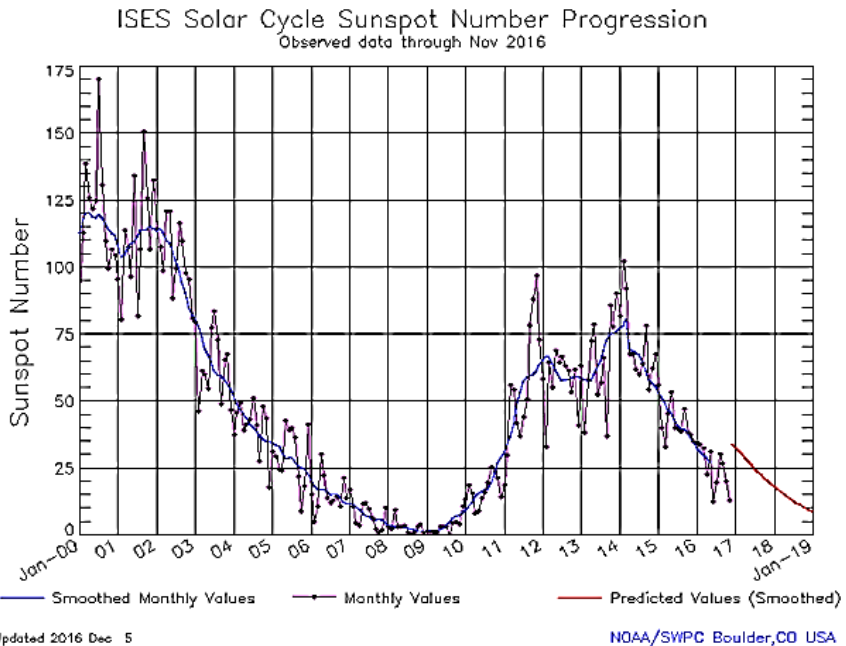


Рис. 1.42. Числа Вольфа с 2000 по 2016 годы.

источник: <http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>

3. На снимке можно выделить внутреннюю и внешнюю корону.

Внутренняя корона – узкая яркая часть короны, удаленная от края диска Солнца (закрытого во время полной фазы затмения диском Луны) на 0.2-0.3 радиуса Солнца. *Внешняя корона* – остальная протяженная часть короны. Также хорошо различимы *лучи*, как короткие, так и длинные, в структуре короны.

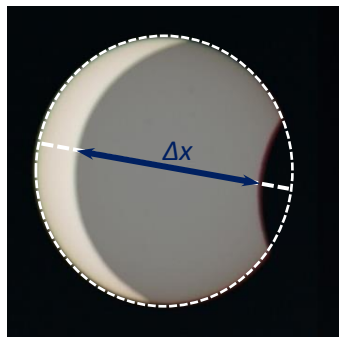


Рис. 1.43. Последовательные положения лунного диска во время затмения.

Солнечная корона примерно симметрична относительно магнитной оси Солнца, поэтому на снимке полной фазы можно выделить области магнитных полюсов Солнца (рис. 1.44).

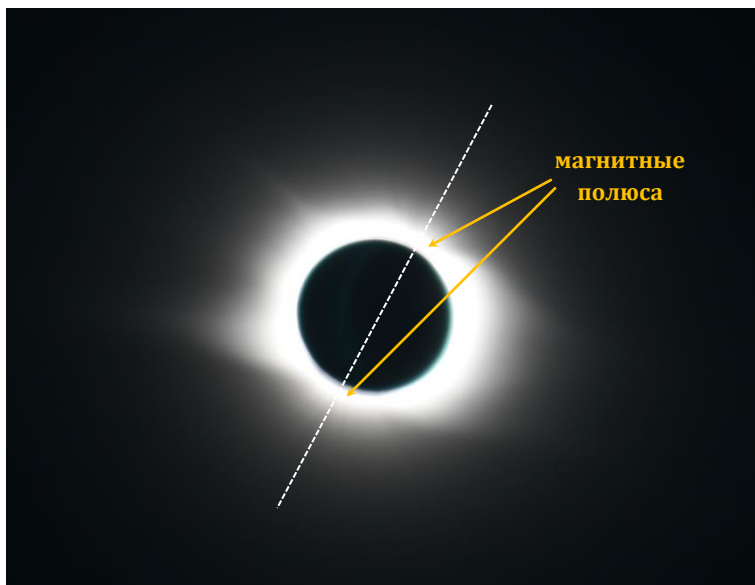


Рис. 1.44. Солнечная корона во время полного солнечного затмения 1 августа 2008 г.

Раздел 2. Съёмка неподвижной камерой – короткие выдержки

Этот раздел объединяет задачи, составленные по фотографиям неба, полученным с относительно короткими выдержками. Форма небесных объектов на этих снимках не была искажена вращением небесной сферы, звёзды и планеты остались точечными объектами, хотя фотокамера при этом была неподвижной.

Рассматриваемый раздел астрофотографии - относительно небольшой и занимает промежуточное положение между съёмками ярких объектов (Луны и Солнца) и съёмками неба с длинными выдержками (неподвижным фотоаппаратом или с использованием механизма часового ведения).

Применительно к данному сборнику следует понимать, что граница между первым и вторым разделами достаточно условна, некоторые снимки можно отнести и туда, и туда, как, например, фото 1.8.

Рассмотрим особенности получения кадров с «точечными» звёздами с использованием неподвижного фотоаппарата.

Параметры съёмки: выдержка, диафрагма, чувствительность.

Длительность выдержек при съёмке неба неподвижной фотокамерой, так, чтобы ещё не были заметны треки звёзд, может составлять примерно 1 - 30 секунд в зависимости от фокусного расстояния объектива.

При $F > 100$ мм даже за несколько секунд выдержки будет заметно влияние суточного вращения Земли и изображения небесных объектов будут смазанными. Поэтому для каждого объектива (и приёмника! – ведь каждая матрица имеет свой размер пикселя) существует своё максимальное время, за которое звёзды еще не превратятся в треки. Оно может быть найдено путём простых расчётов (задача №2.3) или получено эмпирически.

Короткими выдержки рассматриваемых снимков можно назвать только с точки зрения «классической» астрофотографии. По сравнению с временем экспозиции при фотографировании Луны и Солнца выдержки довольно велики, что ужесточает требования к фиксации камеры, ветроустойчивости штатива и наличию возможности дистанционного спуска затвора. За это время уже успевают

проработаться относительно слабые объекты, а яркие, например, Луна, становятся сильно пересвеченными.

Диафрагму объектива желательно открыть как можно больше, т.к. за достаточно короткое время выдержки на матрицу от слабых объектов должно попасть как можно больше света. Но следует учесть, что с увеличением степени открытости объектива уменьшается ГРИП (глубина резко изображаемого пространства) и сильнее проявляется хроматическая аберрация (окрашивание краёв изображения) и другие оптические искажения.

Для лучшей проработки на фотографии слабых объектов часто приходится использовать высокую чувствительность приёмника (вплоть до максимально разумной, выше которой изображение «утонет» в шумах, она зависит от камеры).

Фокусное расстояние объектива

Для получения снимков, охватывающих площадь нескольких созвездий, следует использовать широкоугольные объективы, вплоть до принадлежащих к классу «рыбий глаз» (поле зрения до 180°).

При анализе снимков в задачах следует учесть, что в случае использования широкоугольных объективов на краях поля кадра имеются значительные искажения (абберации) – особенно хорошо они видны на снимках, полученных объективом типа «рыбий глаз». Также сказывается и падение яркости к краю – эффект виньетирования.

Опция «шумоподавление»

Отдельно следует остановиться на присутствующей во многих современных камерах опции «шумоподавление при длительных выдержках» (или «автодарк»). Использовать её или нет – зависит от конкретной модели камеры и приёмника. Для матриц с относительно большими шумами она желательна. Если же матрица имеет малые шумы считывания, то разумно обойтись без этой опции, экономя заряд аккумулятора и время (ведь с «автодарком» время, требуемое на съёмку одного кадра, удваивается – после рабочего кадра камера автоматически делает равный ему по длительности «темновой кадр», который затем вычитает для устранения шумов). В крайнем случае можно сделать отдельную серию темновых кадров, усреднить и потом при обработке вычесть их из рабочих.

Обобщив вышесказанное, приведем примерную последовательность съёмки неподвижной камерой при использовании коротких выдержек:

1. определить объект и вид съёмки (участок неба, часть Млечного пути, пейзаж со звёздным небом и т.д.);
2. установить на камеру короткофокусный объектив (*);
3. установить фотоаппарат на штатив, при необходимости на крючок штатива повесить груз (это увеличит устойчивость штатива);
4. Отключить автостабилизацию на объективе, перевести фокусировку объектива в ручной режим, установить режим съёмки фотоаппарата в положение М (ручной режим), подключить пульт дистанционного управления (или установить автоспуск);
5. навестись на снимаемый объект;
6. произвести фокусировку (у зеркальных камер лучше использовать режим live view);
7. выставить значение ISO, диафрагму и предполагаемую выдержку. При съёмке с выдержками более 5 секунд для экономии времени «пристрелочные» кадры (подбор композиции и экспозиции) имеет смысл делать при завышенных значениях чувствительности, но уменьшенных выдержках. После получения желаемого, но зашумлённого результата, можно снизить чувствительность до оптимального значения, пропорционально увеличив время выдержки;
8. продолжить съёмку до получения кадра, соответствующего задуманному.

()Примечание:* для съёмки можно использовать и объективы с фокусными расстояниями порядка 40-85 мм. Но следует помнить, что с увеличением фокусного расстояния уменьшается поле зрения объектива, становится меньше время выдержки, при которой звёзды на кадре ещё остаются «точками».

Такова общая канва подготовки к съёмке. Не стоит забывать, что кроме методической, полученные кадры могут иметь и эстетическую ценность – к этому также следует стремиться.

Удачных вам кадров и их интерпретации!

Задача №2.1 Небо над обсерваторией ТЮБИТАК



Фото 2.1. Небо над обсерваторией ТЮБИТАК.

Перед вами фотография звёздного неба, сделанная в Турецкой национальной обсерватории ТЮБИТАК фотоаппаратом с объективом "рыбий глаз" ("фишай") с фокусным расстоянием 16 мм. Матрица фотоаппарата имеет размеры 24 мм x 36 мм. Какие созвездия и наиболее яркие объекты неба можно различить на снимке?

Решение.

На кадре можно различить созвездия: Большая Медведица, Малая Медведица, Дракон, Цефей, Кассиопея, Андромеда, Персей, Треугольник, Жираф, Рысь, Телец, Возничий, Кит, Рыбы, Овен.

На фотографии также можно различить: звёздное скопление Плеяды, рассеянное звёздное скопление Гиады, двойное звёздное скопление χ - h Персея, Туманность Андромеды - галактику, видимую невооруженным глазом (рис. 2.1).

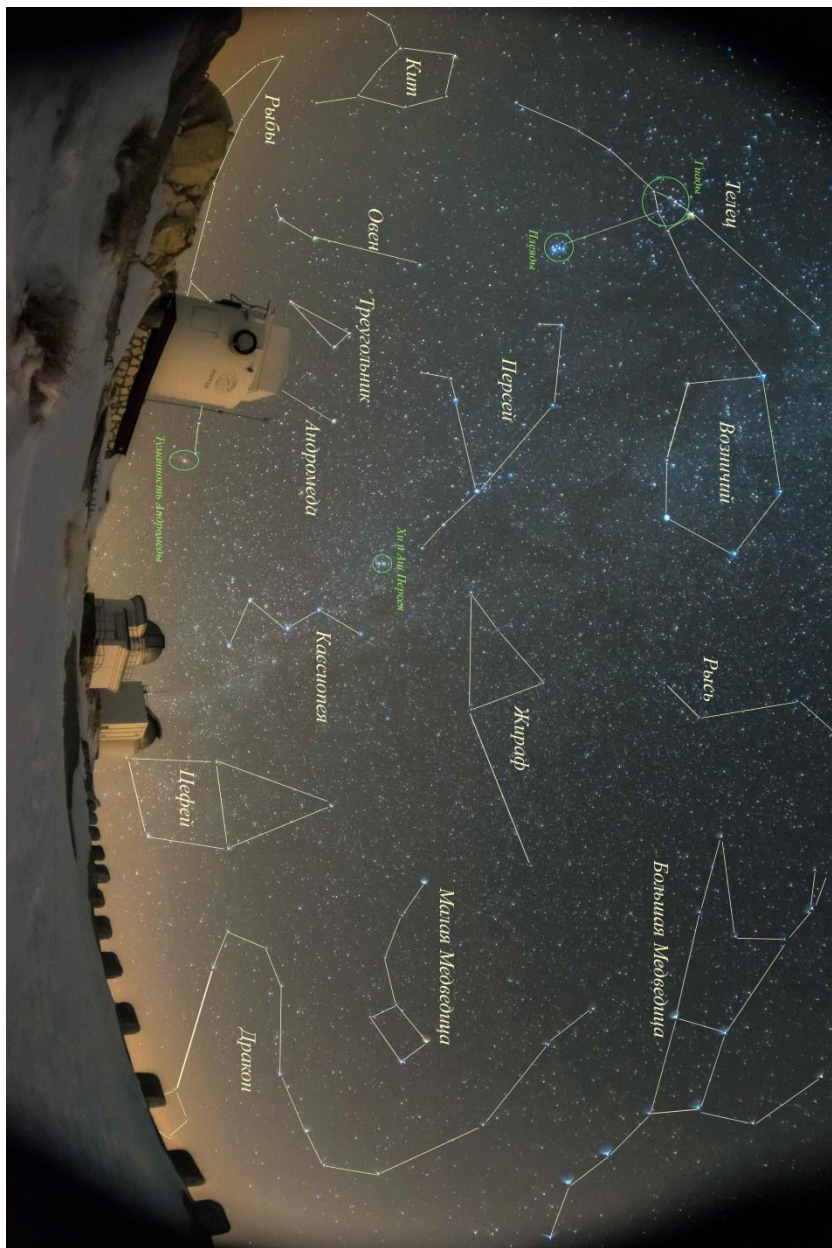


Рис. 2.1. Созвездия над ТЮБИТАК.

Задача №2.2 Звёздное небо Турции



Фото 2.2. Небо над турецкой обсерваторией.

На фотографии, сделанной 29 февраля 2016 г, вы видите звёздное небо над Турецкой национальной обсерваторией ТЮБИТАК.

Внимательно рассмотрев снимок, дайте ответы на вопросы:

1. какие основные астрономические объекты и явления запечатлены на кадре?
2. в какое время суток в конце зимы и начале весны удобнее наблюдать запечатлённое на фото явление?
3. какой максимальный угол может образовывать ось запечатлённого на фото конуса света с горизонтом при наблюдении на широте Турецкой национальной обсерватории (широта 36°) при съёмке вечером в конце февраля?

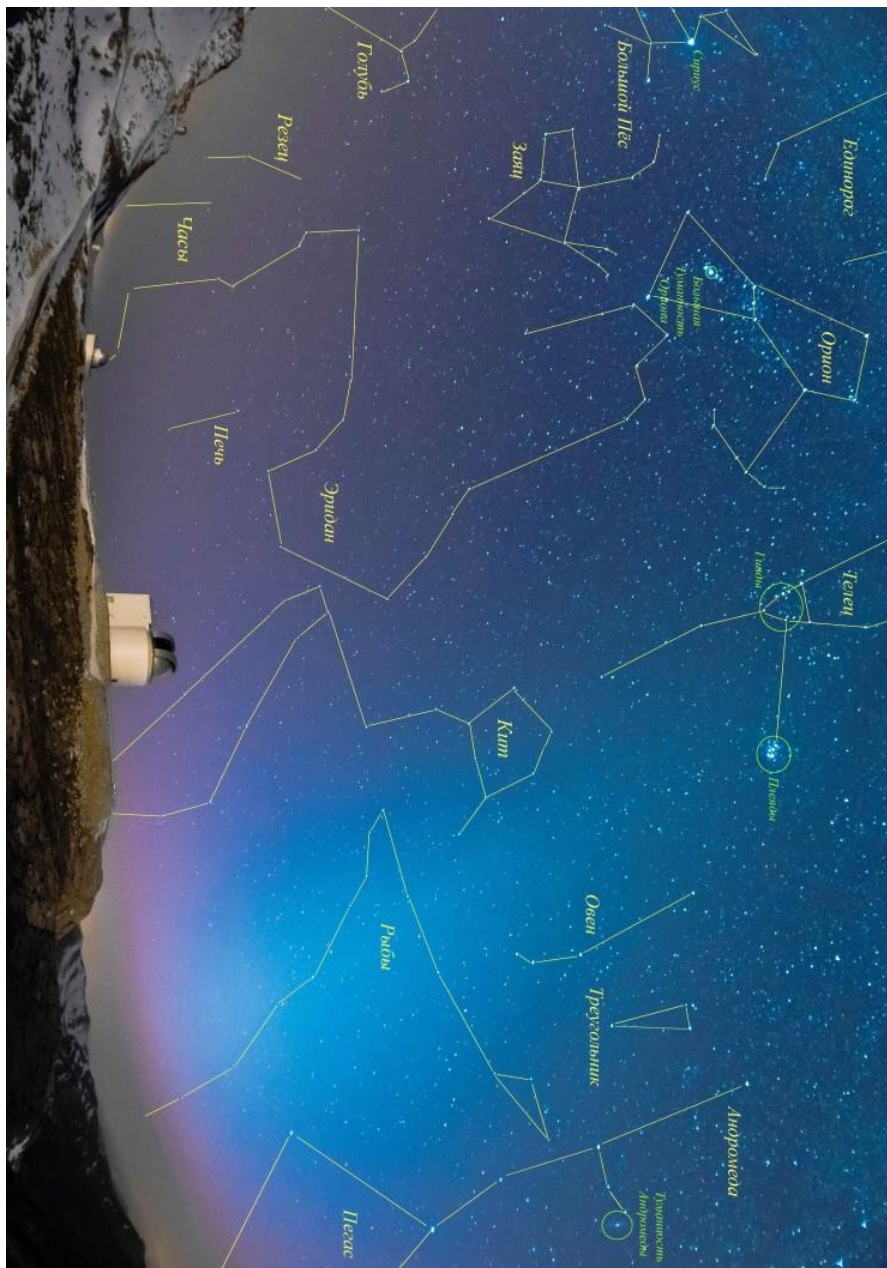


Рис. 2.2. Созвездия над обсерваторией.

Решение.

1. На фотографии (рис. 2.2) можно увидеть следующие основные объекты:

- созвездия Ориона, Единорога, Большого Пса, Зайца, Эридана, Тельца, Овна, Рыб, Кита, Андромеды, Треугольника, Пегаса, Печи, Часов, Голубя, Резца;
- самую яркую звезду неба - Сириус,
- звёздные скопления Плеяды и Гиады,
- Туманность Андромеды - галактику, видимую невооруженным глазом.

На фотографии можно увидеть следующие явления:

- **зарию** - полосу розового (и его оттенков) цвета на небе у горизонта, появляющуюся перед восходом или после заката Солнца.
- **зодиакальный свет** - светлый конус на небе, расположенный в правой части фотографии. Это рассеянное межпланетной пылью солнечное излучение. Поскольку пыль концентрируется в плоскости, близкой к плоскости эклиптики, то и ось видимого на фото конуса соответствует плоскости эклиптики. Яркость свечения и ширина конуса быстро убывают с угловым удалением от Солнца, поскольку концентрация частиц выше во внутренних областях Солнечной системы, а также потому, что их индикатриса рассеяния имеет максимум при прямом рассеянии. Зодиакальный свет наблюдается после захода или перед восходом Солнца;
- **полоса серого** на горизонте - облачность.

2. Так как зодиакальный свет тянется вдоль эклиптики, то наблюдать его лучше в то время, когда эклиптика поднимается под бóльшим углом к горизонту в момент восхода или захода Солнца (рис. 2.3). Весной на широте Турецкой обсерватории ($\varphi = 36^\circ$) эклиптика выше поднимается вечером на заходе Солнца.

3. Изобразим положение эклиптики и экватора относительно горизонта в конце февраля в момент захода Солнца (рис. 2.4), где φ - широта места наблюдения, ε - угол наклона эклиптики к экватору .

Угол наклона эклиптики к горизонту α составит: $\alpha = 90^\circ - \varphi + \varepsilon$, $\alpha = 90^\circ - 36^\circ + 23.5^\circ = 77.5^\circ$. Это и есть угол наклона к горизонту конуса зодиакального света вечером в конце феврале после захода Солнца.

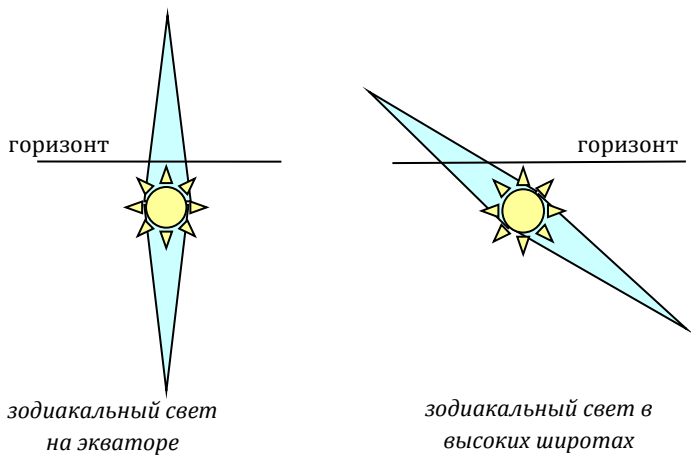


Рис. 2.3. Зодиакальный свет на разных широтах.

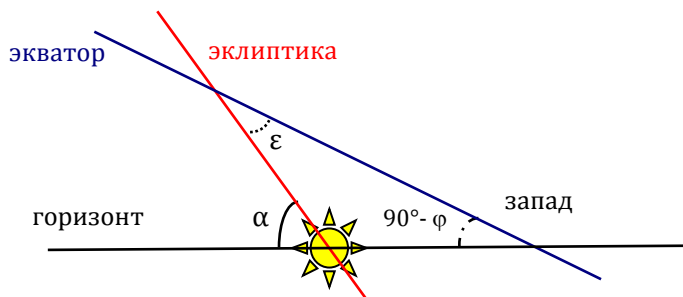


Рис. 2.4. Положение экватора и эклиптики относительно горизонта.

Задача №2.3 Парад планет

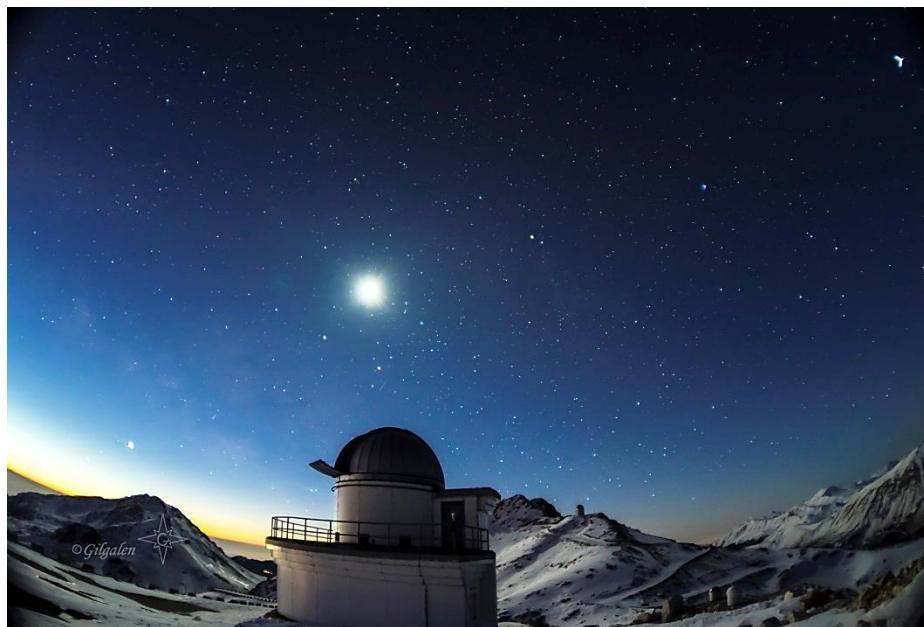


Фото 2.3. Парад планет.

Перед вами фотография звёздного неба, сделанная в Турецкой национальной обсерватории ТЮБИТАК 3 февраля 2016 года на фотоаппарат с размером матрицы 24 мм x 36 мм и общим количеством мегапикселей 24.

Определите по снимку:

1. какие созвездия попали в поле зрения камеры;
2. какие планеты Солнечной системы можно наблюдать на снимке;
3. фокусное расстояние объектива;
4. почему звёзды по краям снимка получились как "птички";
5. с какой максимальной выдержкой можно было сделать снимок, чтобы звёзды остались точками (не появились треки).

При решении задачи можно воспользоваться электронным планетарием или звёздными картами.

Решение.

1. На кадре можно различить созвездия (рис. 2.5): Скорпион, Дева,

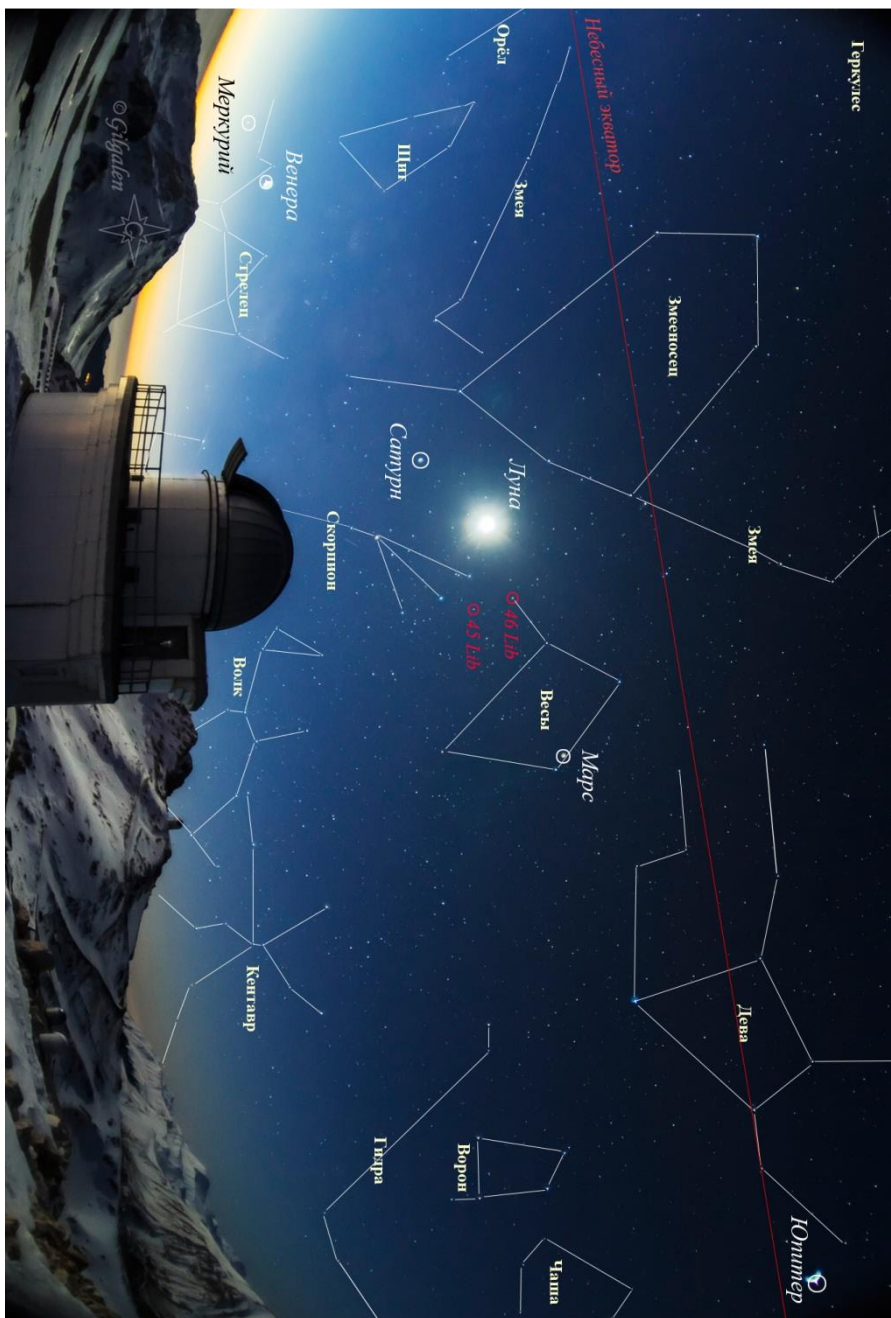


Рис. 2.5 Созвездия и планеты над ТЮБИТАК.

Стрелец, Змееносец, Змея, Щит, Волк, Весы, Гидра, Ворон, Чаша, Кентавр, части созвездий Орёл и Геркулес.

2. Снимок был сделан во время парада планет, на нём можно различить: Венеру, Марс, Юпитер и Сатурн. Меркурий, расположенный вблизи горизонта, теряется в лучах зари.

3. Оценим угловой масштаб снимка по вертикали. Для этого выберем две звезды вблизи центра кадра (где нелинейные искажения, вносимые линзой объектива, минимальны), у которых прямые восхождения равны. Тогда разность склонений этих звёзд равна угловому расстоянию между ними. Рассмотрим, например, звёзды 45 Lib и 46 Lib (рис. 2.5), их экваториальные координаты указаны в таблице 4 (с помощью электронного планетария можно выбрать любую другую пару звёзд, удовлетворяющую указанным выше условиям).

Разность склонений этих звёзд 45 Lib и 46 Lib:

$$\Delta\delta = -16^{\circ}44' - (-20^{\circ}10') \approx 3.5^{\circ}.$$

Высота кадра примерно в 22.2 раза больше расстояния между 45 Lib и 46 Lib, следовательно, поле зрения объектива по вертикали $\varphi = 3.5^{\circ} \cdot 22.2 \approx 78^{\circ}$.

Таблица 4

Звезда	Прямое восхождение	Склонение
46 Lib	15 ^h 54 ^m	-16° 44'
45 Lib	15 ^h 53 ^m	-20° 10'

Изображение очень далеких объектов (звёзд) получается в фокальной плоскости объектива, где при наведении на резкость должна располагаться матрица фотоаппарата (рис. 2.6).

Из $\triangle OAB$ $tg \frac{\varphi}{2} = \frac{h/2}{F}$, где h -

высота матрицы по вертикали, F - фокусное расстояние объектива. Тогда фокусное расстояние объектива

$$F = \frac{h/2}{tg \frac{\varphi}{2}} = \frac{24\text{мм}/2}{tg \frac{78^{\circ}}{2}} \approx 15 \text{ мм}$$

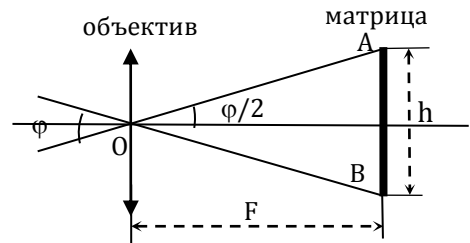


Рис. 2.6. Ход лучей через объектив фотоаппарата.

4. Исходя из п.3, объектив является короткофокусным и, судя по изображению башни телескопа, обладает значительной дисторсией (абберацией), т.е. коэффициент линейного увеличения по центру кадра и по его краям различен. Скорее всего это объектив типа "Рыбий глаз" ("фишай"). По краям кадра искажения сильнее, чем в центре. При сильно открытой диафрагме яркие звезды засвечивают несколько соседних пикселей, а абберации по краям кадра искажают их, превращая в "птичек".

5. Определим сначала размер пикселя матрицы фотоаппарата. Площадь матрицы $24\text{мм} \cdot 36\text{мм} = 864\text{мм}^2$. Всего на матрице 24 мегапикселя, \Rightarrow считая пиксель квадратным, определим его сторону:

$$a = \sqrt{\frac{864 \text{ мм}^2}{24 \cdot 10^6}} \approx 0.006 \text{ мм или } 6 \text{ мкм.}$$

Будем считать, что звезда на фотографии является точкой, если её изображение не выходит за пределы одного пикселя. В реальности звёзды, особенно яркие, засвечивают и соседние пиксели.

Получается, что на фотографии звезда не получится треком, если пройдет за время выдержки по матрице расстояние не более ширины пикселя.

По полю кадра сильнее всего будут смещаться звёзды, лежащие на небесном экваторе (со склонением 0°). Остальные звёзды будут смещаться по матрице с меньшей линейной скоростью, т.к. их движение происходит не по большому кругу небесной сферы (как у звёзд на небесном экваторе), а по малым кругам (рис. 2.7), при этом скорость смещения звезды уменьшается в $(1/\cos \delta)$ раз.

Определим угол β , на который должна сместиться звезда на небе, чтобы на матрице ее перемещение было равно ширине

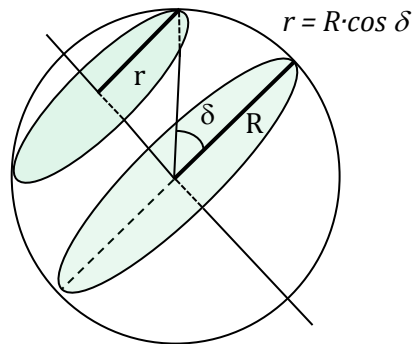


Рис. 2.7. Радиус суточных параллелей на различных склонениях на глобусе небесной сферы.

пикселя a :

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{a/2}{F},$$

где F - фокусное расстояние объектива, равное 15 мм (пояснение см.

п. 3), т.к. угол β мал, то $\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \approx \frac{\beta}{2} [\text{рад}]$,

получаем $\beta = \frac{a}{F}$.

$$\beta = \frac{0.006 \text{ мм}}{15 \text{ мм}} = 0.0004 \text{ рад} = 0.023^\circ$$

Звёзды на небесном экваторе движутся со скоростью

$$\frac{360^\circ}{23ч56мин} \approx 15\% / \text{час}$$

и угол $\beta = 0.023^\circ$ преодолению за 5.5 секунды - это и есть время выдержки, при котором звёзды будут на кадре точками.

Примечание: реальное максимально возможное время выдержки, при котором еще не наблюдается треков звёзд, будет больше, т.к. звёзды занимают не один пиксель и вне экваториальной области имеют меньшую скорость смещения по полю кадра.

Задача №2.4 Звёздное небо в горах Турции

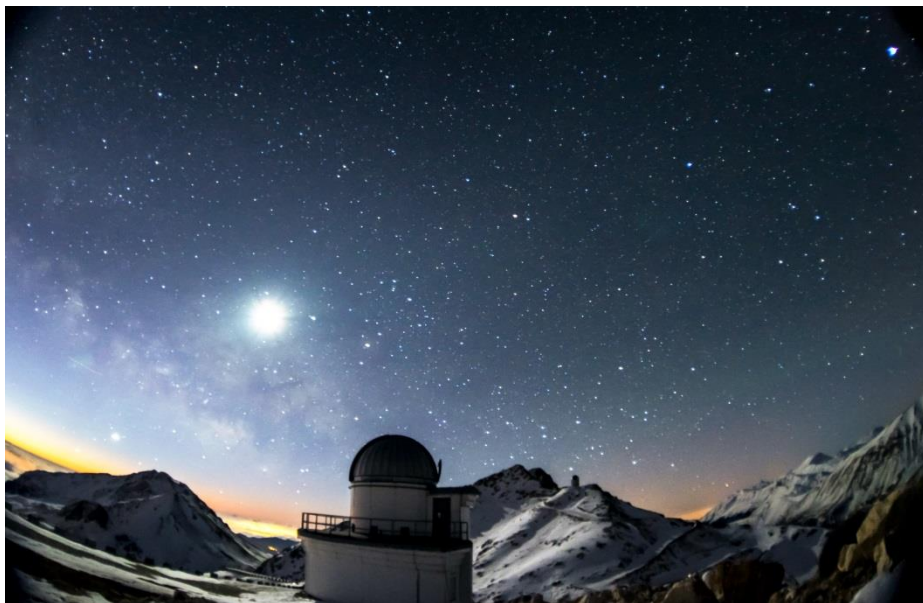


Фото 2.4. Звёздное небо в горах Турции.

Перед вами фотография звёздного неба, сделанная в Турецкой национальной обсерватории ТЮБИТАК. Снимок выполнен с той же точки, на ту же фотокамеру с тем же объективом, что и фото 2.3 (задача №2.3), но в другой день февраля 2016 года.

Определите по снимку:

1. примерное расположение линии эклиптики;
2. дату, когда был сделан снимок.

Почему Луна на фотографии круглая, хотя снимок сделан перед рассветом и Луна должна иметь форму серпа?

Использовать электронный планетарий или звёздные карты при ответе на вопросы нельзя, но можно воспользоваться решением задачи №2.3.

Решение.

1. Наклонение орбит Луны, всех больших планет Солнечной системы и большинства их спутников к плоскости эклиптики невелико. Поэтому, с точностью до $5-10^\circ$, можно считать, что плавная линия (на небесной

сфере это будет большой круг), проведенная через эти светила, а также точку под горизонтом, где сейчас находится Солнце, и есть эклиптика (см. рис. 2.8).

Так как эклиптика на небесной сфере обозначена яркими "маркерами" (планетами и Луной), а небесный экватор - нет, эклиптическая система небесных координат была в древности более распространена, чем экваториальная. В частности, первый звёздный каталог, созданный Гиппархом, состоящий из 1022 звёзд и опубликованный в «Альмагесте» Птолемея, был создан в эклиптической системе координат.

2. Расположение созвездий относительно линии гор примерно одинаково как на фото 2.3, так и на фото 2.4, следовательно, оба снимка получены в одно и то же время суток (перед рассветом).

Для определения даты снимка обратим внимание на Луну. Она находится восточнее, т.е. фото 2.4 сделано позже, чем фото 2.3. Оценим смещение Луны за время, прошедшее между двумя снимками: она продвинулась на угловое расстояние примерно вдвое большее, чем угловое расстояние между звёздами β и π Скорпиона, составляющее около 6° . Т.е. Луна прошла относительно звёзд примерно $12-13^\circ$, что соответствует смещению за один день. Получается, что фото 2.4 сделано через сутки, т.е. 4 февраля 2016.

Луна – довольно яркий объект по сравнению со звёздами. Для того, чтобы звёзды на фотографии хорошо проработались, необходимо было сделать достаточно длительной выдержку (секунды) по сравнению с выдержкой, нужной для проработки деталей лунного диска (доли секунды). За продолжительное время экспозиции яркий лунный свет «пересветил» не освещенную Солнцем часть лунного диска, превратив «серп» в «круг».



Рис. 2.8. Конфигурации созвездий и положение эклиптики.

Задача №2.5 Небо над планетарием

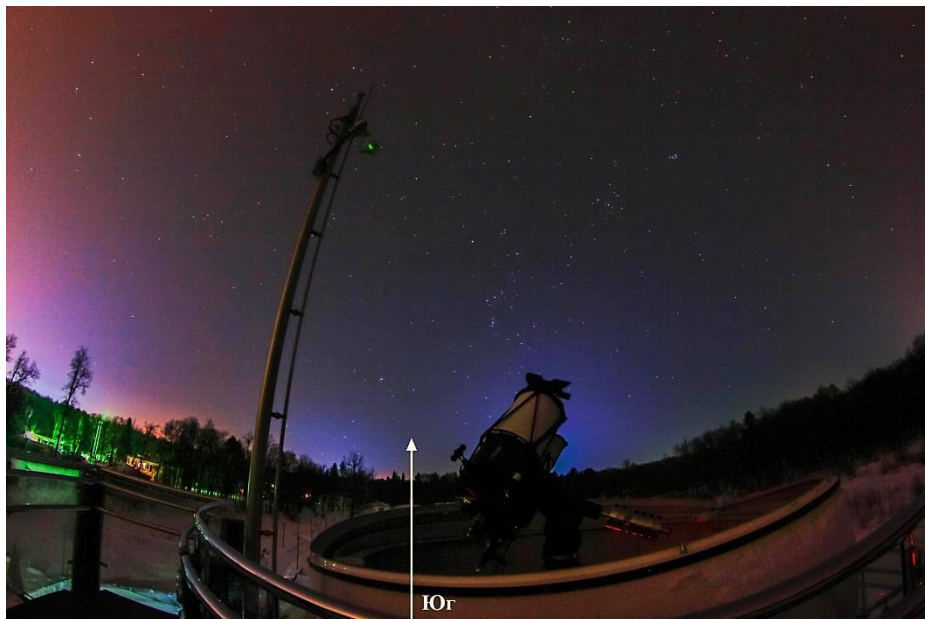


Фото 2.5. Небо над планетарием.

На предоставленной фотографии, сделанной в 21 час местного среднего солнечного времени с крыши планетария КФУ обсерватории им. В.П. Энгельгардта, расположенной недалеко от Казани, показан вид звёздного неба в южной стороне горизонта.

По фотографии определите:

1. какие созвездия попали в поле зрения камеры;
2. в каком месяце был сделан кадр;
3. широту обсерватории;

При решении задачи можно воспользоваться электронным планетарием или звёздными картами.

Решение.

1. Основные конфигурации созвездий, попавших в поле зрения кадра, показаны на рисунке 2.9.

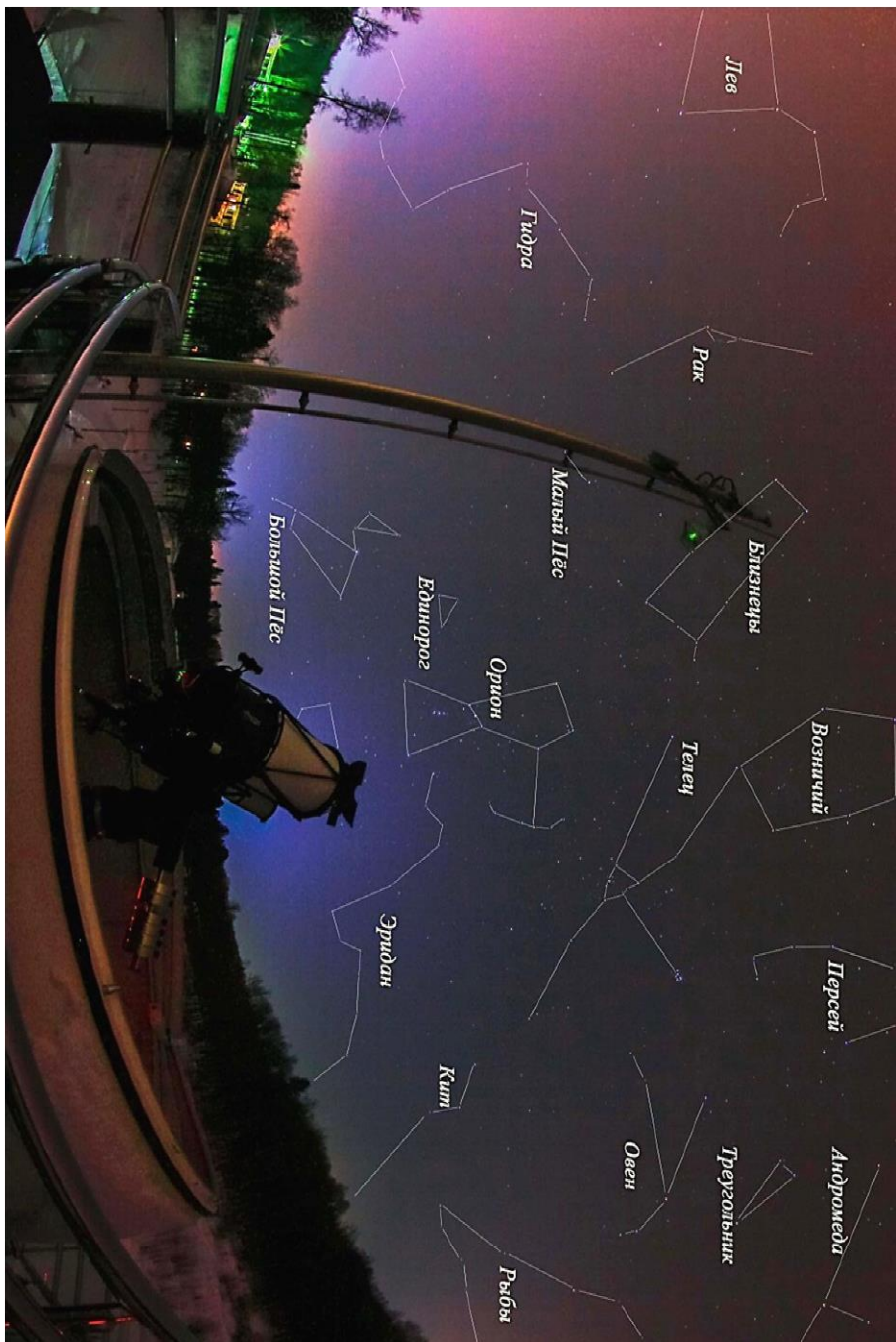


Рис. 2.9. Конфигурации созвездий.

2. Почти в центре кадра располагается созвездие Ориона, находящееся вблизи верхней кульминации (по условию камера направлена в сторону юга). Находиться вблизи верхней кульминации в 21 час по местному времени Орион может в конце января - начале февраля.

Для оценки условий видимости (даты кульминации в указанное время) можно воспользоваться следующими соображениями. Прямое восхождение Ориона около 5-6 часов. Это зимнее созвездие, поэтому за отправную точку возьмем день зимнего солнцестояния. Прямое восхождение Солнца на эту дату 18^h , т.е. созвездие с прямым восхождением $18^h - 12^h = 6^h$ проходит верхнюю кульминацию в местную среднюю солнечную полночь. В нашем случае кульминация наступает на три часа раньше, это будет соответствовать дате на $\frac{180 \text{ мин}}{4 \frac{\text{мин}}{\text{сутки}}} = 45 \text{ суток}$ позже (каждый день момент кульминации

смещается в более раннюю сторону на $3^m 56^s \approx 4^m$). 1.5 месяца от зимнего солнцестояния это примерно 8 февраля для прямого восхождения 6^h и 1 февраля для 5.5^h (которое можно принять как среднее значение для Ориона). Учтя неопределенность, с которой мы вспомнили координаты созвездия, получим результат ± 10 дней от этой даты, т.е. двадцатые числа января - первая декада февраля.

3. Ближе всего к небесному меридиану из ярких объектов, расположенных вблизи центра кадра (где искажения объектива наименьшие), расположены звёзды созвездия Орион: Бетельгейзе и Саиф (рис. 2.10). Прямые восхождения этих звезд (таблица 5) различаются на 8^m , что сравнимо с погрешностью измерений, поэтому можно для определения углового масштаба снимка ($^\circ/\text{см}$) найти разность склонений этих звезд:

$$\Delta \delta = +7^\circ 24' - (-9^\circ 40') \approx 17^\circ.$$

Расстояние на снимке от Бетельгейзе до горизонта в 2.5 раз больше расстояния между Бетельгейзе и Саифом, \Rightarrow угловая высота Бетельгейзе над горизонтом $17^\circ \cdot 2.5 = 42.5^\circ$ (оценка приближенная, т.к. дисторсия объектива различна на разных участках снимка (особо сильная по краям), что приводит к различию углового масштаба на различных участках кадра).

Учитывая, что Бетельгейзе находится вблизи верхней кульминации, её высота над горизонтом равна $h_g = 90^\circ - \varphi + \delta$, \Rightarrow

$$\varphi = 90^\circ - h_g + \delta = 90^\circ - 42.5^\circ + 7.5^\circ = 55^\circ$$

Примечание: для оценки широты можно использовать и звезду μ Близнецов, находящуюся ближе к небесному меридиану (т.е. к верхней кульминации), однако, эта звезда расположена ближе к краю, где оптические искажения сильнее, чем в центре кадра, поэтому точность оценки по обеим звёздам с учётом вводимых допущений примерно одинаковы.

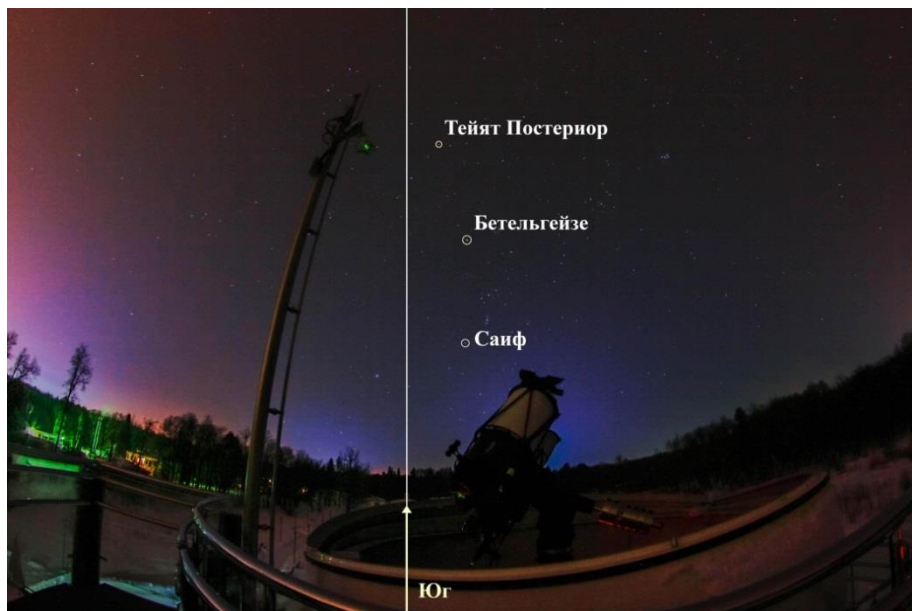


Рис. 2.10. Положения небесного меридиана и некоторых ярких звёзд.

Таблица 5

Звезда	Прямое восхождение	Склонение
Бетельгейзе (α Ориона)	$5^{\text{h}} 56^{\text{m}}$	$+7^{\circ} 24'$
Саиф (к Ориона)	$5^{\text{h}} 48^{\text{m}}$	$-9^{\circ} 40'$
Тейят Постериор (μ Близнецов)	$6^{\text{h}} 23^{\text{m}}$	$+22^{\circ} 30'$

Задача №2.6 Жёлтая палатка



Фото 2.6. Вид звездного неба с горы Пастухова.

Вам предложено увеличенное изображение кадра, полученного 19 июля на Казанской летней астрошке, проходившей на Северокавказской астрономической станции КФУ. Снимок сделан с вершины г. Пастухова, имеющей высоту 2733м и широту $43^{\circ}36'$. Фото выполнено в 23 часа местного времени на приёмник (матрицу) размером 18x24 мм с объективом, имеющим фокусное расстояние 20 мм. Камера была установлена на штативе и ориентирована на юг. При этом нижний край кадра опущен на 2° относительно линии видимого горизонта. Радиус Земли принять равным 6371 км.

1. Что за размытая структура значительной протяженности (не менее четверти стороны снимка) расположена вблизи центра кадра?
2. Какой яркий объект, отсутствующий на звездных картах, есть на снимке?
3. Определите экваториальные координаты α , δ центра кадра.
4. Какой из снимков - данный в этой задаче или в задаче №2.3 - сделан раньше?

Решение.

1. Структура, расположенная почти в центре кадра – Млечный Путь, в направлении на центр Галактики. На средних широтах эта часть Млечного Пути никогда не поднимается высоко над горизонтом и потому такое зрелище недоступно.

2. Это планета Сатурн (рис. 2.11).

Планеты Меркурий и Венера наблюдаться в 23 часа на юге не могут, Марс обладает красноватым оттенком (похож на Антарес), на кадре же планета белая, следовательно, это либо Юпитер, либо Сатурн. Юпитер в противостоянии имеет звёздную величину около -2.7^m , звёздная величина Антареса около 0.9^m , планета на фотографии по яркости сравнима с Антаресом, \Rightarrow это Сатурн (его звёздная величина в противостоянии около 0.5^m).

3. Определим поле зрения φ кадра по высоте. Изображение очень далёких объектов получается в фокальной плоскости объектива, где при наведении на резкость должна располагаться матрица фотоаппарата (рис. 2.6).

$$\text{Из } \triangle OAB \text{ } \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{h/2}{F}, \text{ откуда поле зрения кадра по высоте}$$

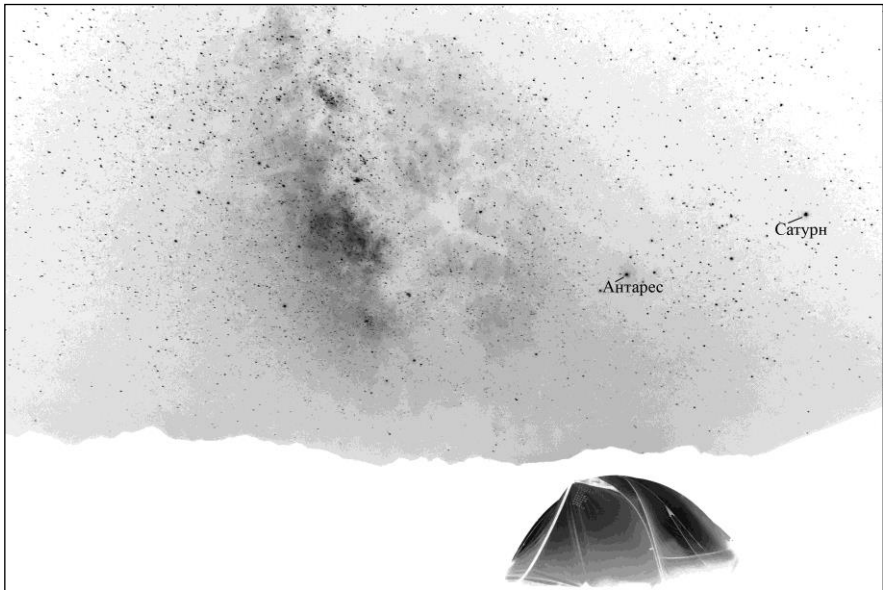


Рис. 2.11. Сатурн и Антарес.

$$\varphi = 2 \operatorname{arctg} \frac{18 \text{мм}}{2 \cdot 20 \text{мм}} = 48.5^\circ$$

Центр кадра находится на $(48.5^\circ/2) - 2^\circ = 22.3^\circ$ (учтя погрешности измерений) над горизонтом.

Высота кульминации небесного экватора на широте г. Пастухова

$$90^\circ - \varphi = 90^\circ - 43.6^\circ = 46.4^\circ,$$

т.е. склонение центра снимка $(22.3^\circ - 46.4^\circ) = -24.1^\circ$ (рис. 2.12).

Примечание: реальная точность измерений около $1-2^\circ$, итоговое значение от -22° до -26° .

Учтём изменение уровня горизонта за счёт высоты горы Пастухова (рис. 2.13).

Пусть h - высота горы, R - радиус Земли, α - понижение уровня горизонта.

Из $\triangle ABO$ и теоремы синусов получаем $\frac{R}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{R+h}{\sin 90^\circ}, \Rightarrow$

$$\cos \alpha = \frac{R}{R+h} \Rightarrow \alpha = \arccos \frac{6371 \text{км}}{6371 \text{км} + 2.733 \text{км}} = 1.7^\circ$$

В итоге, зенитное расстояние горизонта $z = 91.7^\circ$, что изменяет склонение центра кадра до -25.8° .

Примечание: значение понижения уровня горизонта за счёт высоты горы сравнимо с погрешностью измерения.

Определим теперь прямое восхождение центра кадра.

За год - 365 дней - прямое восхождение Солнца изменяется от 0^h до 24^h (от 0° до 360°), причём неравномерно, однако, можно оценить среднюю скорость изменения прямого восхождения

$$\begin{aligned} 360^\circ/365 \text{дней} &= 0.98^\circ/\text{день} = \\ &= 0.066^h/\text{день}. \end{aligned}$$

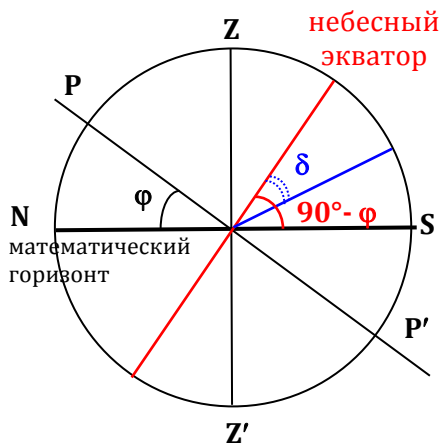


Рис. 2.12. К расчету высоты верхней кульминации светил.

С дня летнего солнцестояния, когда прямое восхождение Солнца составляло 6^h , до 19 июля (даты съёмки) прошло 28 дней, следовательно, прямое восхождение Солнца на дату снимка

$$28 \text{ дней} \cdot 0.066^h/\text{день} + 6^h = 7.8^h = 7^h50^m.$$

Пренебрегая уравнением времени (не сказано, какое местное время дано в задаче – среднее или истинное), получим, что в полночь кульминировала точка с прямым восходом 19^h50^m , а в момент снимка – 18^h50^m , по условию камера направлена на юг, это и есть искомая координата (значение от 18^h40^m до 19^h не является ошибкой).

4. Кадр из данной задачи был сделан раньше, чем из задачи № 2.3. Сатурн наблюдается в южной части неба вблизи полуночи, следовательно, планета находится в противостоянии и движется в прямом направлении. На данной фотографии Сатурн находится выше "клевши" Скорпиона, на другом кадре - ниже, \Rightarrow планета сместилась по эклиптике к востоку.

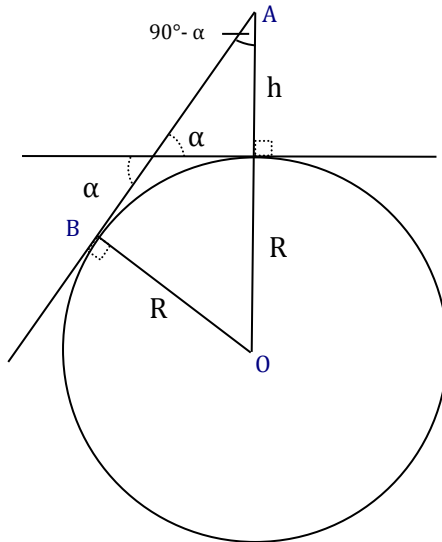


Рис. 2. 13. К расчёту понижения уровня горизонта.

Задача №2.7 Луна и звёзды

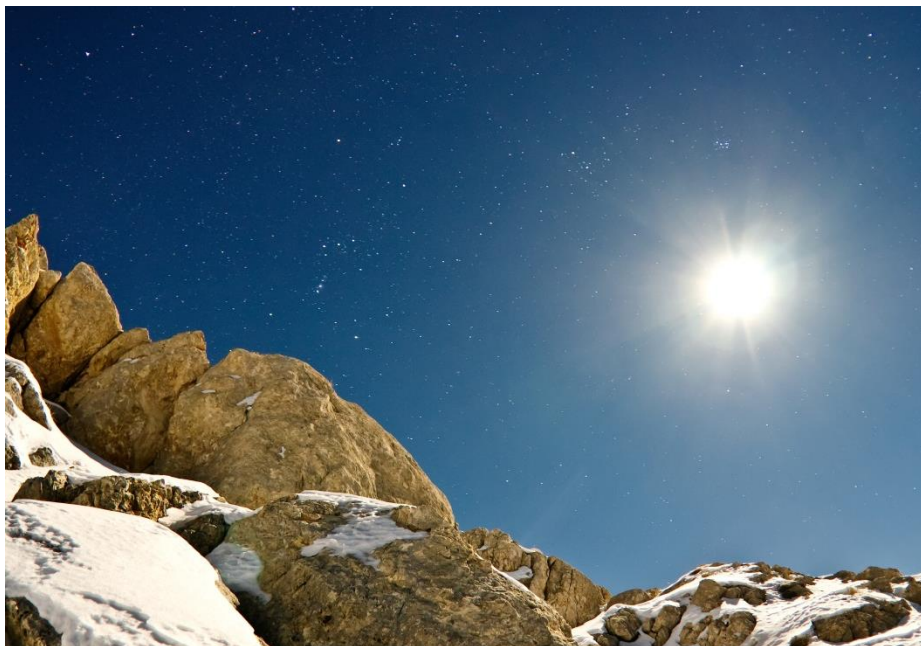


Фото 2.7. Луна и звёзды.

Перед вами фотография Луны и ярких звёзд, выполненная на широкоугольный объектив за двое суток до полнолуния. Основание кадра параллельно линии горизонта.

По фотографии определите, обосновав свой ответ:

1. где был выполнен этот снимок: в горах или на равнине;
2. в каком месяце был сделан кадр;
3. в каком полушарии (Северном или Южном) велась съёмка;
4. в какую (примерно) сторону света был направлен фотоаппарат при съёмке.

Решение.

1. Снимок сделан в горах (на высоте 2500 м над уровнем моря). На равнине сделать такой кадр не представляется возможным, поскольку рассеянный более плотной, чем в горах, атмосферой свет от Луны засветит находящиеся рядом слабые звёзды. А на фото 2.7 выше Луны

различимы Плеяды, имеющие яркость примерно 4^m , и более слабые звезды $5-6^m$.

Примечание: наличие камней на снимке ещё не говорит о том, что он получен в горах, поскольку подобный рельеф возможен и на уровне моря, например, в Карелии или на Кольском полуострове.

2. На фотографии Луна находится на границе созвездий Овна и Тельца (это можно увидеть, отождествив характерные конфигурации скоплений Плеяды, Гиады и контур созвездия Ориона), т.е. имеет прямое восхождение около 3-4 часов.

Не зная на память координат ярких звёзд, к этому выводу можно прийти, вспомнив, что во время летнего солнцестояния, когда Солнце находится в созвездии Близнецов, оно имеет прямое восхождение $\alpha = 6^h$. На месяц раньше у Солнца, располагавшегося в созвездии Тельца, было прямое восхождение на 2^h меньше, т.е. около 4^h .

На снимке Луна располагается чуть ниже созвездия Тельца, т.е. прямое восхождение можно оценить как $\alpha_{\zeta} = 3.5^h \pm 30^m$ (можно подтвердить вычислениями, используя масштаб снимка).

По условию задачи до полнолуния осталось 2 дня. За сутки Луна проходит по небесной сфере относительно звёзд 13° , или, в среднем, 52^m по прямому восхождению. Т.е. за двое суток Луна сместится примерно на $1^h 44^m$ и в момент полнолуния её прямое восхождение будет $(3^h 30^m \pm 30^m) + 1^h 44^m = 5^h 15^m \pm 30^m$.

Учитывая, что в момент полнолуния прямые восхождения Луны и Солнца отличаются на 180° ($\alpha_{\odot} = \alpha_{\zeta} + 12^h$), то $\alpha_{\odot} = 17^h 15^m \pm 30^m$.

В день зимнего солнцестояния прямое восхождение Солнца $\alpha_{\odot} = 18^h$.

Солнце смещается по прямому восхождению в среднем на 2^h в месяц, т.е. до 22 декабря осталось примерно 12 дней. Получается, что снимок сделан примерно 10 декабря, погрешность ответа составляет около 7 дней.

Мы получили неплохой результат - в действительности снимок сделан 12 декабря 2016 года.

Примечание: снег на камнях не является аргументом в пользу времени года, потому что в горах на высотах 2 км и выше снег и лёд могут сохраняться круглый год.

3. Снимок выполнен в Северном полушарии, т.к. созвездие Ориона располагается "ногами вниз" относительно горизонта и камней на переднем плане. В Южном полушарии созвездие Ориона было бы

расположено "вниз головой" и рельеф (камни) был бы со стороны Бетельгейзе, а не Ригеля.

В действительности снимок выполнен в Турецкой национальной обсерватории ТЮБИТАК.

Примечание: дата снимка (декабрь) и снег не могут являться аргументом в пользу Северного полушария по той же причине, что и в ответе на вопрос 2.

4. Поскольку созвездие Ориона ("туловище охотника") практически перпендикулярно небесному экватору, то в Северном полушарии Орион в южной части неба "стоит вертикально", в юго-восточной стороне горизонта "наклонен влево", в юго-западной - "наклонен вправо", на востоке и на западе практически "лежит на боку".

На фото 2.7, выполненном в Северном полушарии, Орион немного наклонён вправо, к западу, т.е. он уже прошёл через небесный меридиан. Получается, что центр кадра соответствует направлению на юго-запад.

Авторы фотографий и параметры съёмки

номер фото	автор	Параметры съёмки				
		фотоаппарат	ISO	выдержка, с	диафрагменное число	фокусное расстояние объектива
Рис. 1.2.	Жучков Р.Я.	SONY NEX-7	100	1/3.7	1/5	
Фото 1.1.	Типикина Е.Н.	Canon 400D	400	1/160	1/8	68мм
Фото 1.2.	Типикина Е.Н.	Canon 400D	100	1/15	1/10	2000мм*
Фото 1.3.	Типикина Е.Н.	Canon 400D	1600	1/2	1/2.8	200мм
Фото 1.4.	Типикина Е.Н.	Canon 400D	100 100 100 200	1/100 1/50 1/40 1/20	1/10	750мм*
Фото 1.5.	Жучков Р.Я.	Panasonic DMC-FZ30	80	1/640	1/4.5	89мм, кадрирование по ширине
Фото 1.6.-1	Жучков Р.Я.	Panasonic DMC-FZ30	80	5	1/3.6	27мм
Фото 1.6.-2	Жучков Р.Я.	Panasonic DMC-FZ30	80	0.8	1/3.7	89мм
Фото 1.7.	Жучков Р.Я.	SONY NEX-7	800	3.2	1/6.3	200мм
Фото 1.8.	Типикина Е.Н.	Canon 400D	100	1/80	1/7.1	300мм
Фото 1.9.	Жучков Р.Я.	Зенит-21	200	по 5 с каждая экспозиция	1/4	135 мм
Фото 1.10.	Луценко Дима+Типикина Е.Н.	Canon 400D	1600	1/2	1/2.8	200мм
Фото 1.11.	Жучков Р.Я.	SONY NEX-7	100	1/6	1/4.5	31мм
Фото 1.12.	Баруздин Михаил, Мязин Михаил	Canon 40D	400	1/10	1/10	600мм*
Фото 1.13.	Типикина Е.Н.	Canon 400D	100	1/400	1/10	2000мм*
Фото 1.14.	Типикина Е.Н.	Canon 400D	100	1/2000	1/10	247мм, кадрирование
Фото 1.15-1.	Жучков Р.Я.	SONY NEX-7	100	1/320	1/13	200мм
Фото 1.15-2.	Жучков Р.Я.	SONY NEX-7	100	1/320	1/13	200мм
Фото 1.16-1.	Типикина Е.Н.	Canon 70D	100	1/5000	1/6.3	200мм наложение нескольких фото

Фото 1.16-2.	Жучков Р.Я.	SONY NEX-7	100	1/320	1/13	200мм
Фото 1.17.	Типикина Е.Н.	Canon 400D	100	1/4000 (частные фазы) 1/20 (полная фаза)	1/40 (частные фазы) 1/6.3 (полная фаза)	300 мм наложение нескольких фото
Рис. 1.44	Типикина Е.Н.	Canon 400D	100	1/5	1/6.3	300мм
Фото 2.1.	Жучков Р.Я.	SONY ILCE-7M2	4000	20	1/4	16мм
Фото 2.2.	Жучков Р.Я.	SONY ILCE-7M2	2500	30	1/4	16мм
Фото 2.3.	Жучков Р.Я.	SONY ILCE-7M2	1000	10	1/2.8	16мм
Фото 2.4.	Жучков Р.Я.	SONY ILCE-7M2	2000	20	1/4	16мм
Фото 2.5.	Головкин С.Ю.	Canon 60D	200	25	1/8	8мм
Фото 2.6.	Жучков Р.Я.	SONY NEX-7	1600	25	1/3.5	18мм
Фото 2.7.	Жучков Р.Я.	SONY ILCE-7M2	1000	30	1/4	16мм

* фотографии сделаны в прямом фокусе телескопа

Некоторые термины и понятия

ВЫДЕРЖКА – время, в течение которого свет воздействует на матрицу или плёнку фотоаппарата (промежуток времени, в течение которого открыт затвор фотоаппарата). Выдержка выражается в долях секунды: 1/2000, 1/1000, 1/500, 1/250 и т.д., длительные выдержки выражают в секундах, реже в минутах.

ДИАФРАГМА – устройство, ограничивающее прохождение света через объектив. Величина светового потока характеризуется диафрагменным числом [1].

ДИАФРАГМЕННОЕ ЧИСЛО – значение знаменателя текущего относительного отверстия объектива. Классический ряд диафрагменных чисел образуется рядом значений в виде геометрической прогрессии со знаменателем $\sqrt{2}$ (например, 1; 1.4; 2; 2.8; 4; 5.6). При переходе от одного значения диафрагменного числа к соседнему освещённость изменяется в два раза [1]. Шкала диафрагменных чисел современных цифровых фотоаппаратов имеет и промежуточные значения.

КРОП-ФАКТОР (K_f) – (от англ. crop - обрезать, factor – множитель) коэффициент, показывающий, во сколько раз размеры матрицы (чаще диагональ) меньше размеров стандартного плёночного кадра формата 36x24 мм. Матрицы с кроп-фактором 1 называют полнокадровыми и обозначают FF (от англ. full – полный и frame - кадр).

ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ОТВЕРСТИЕ ОБЪЕКТИВА – отношение диаметра светового отверстия объектива d к величине главного фокусного расстояния F : $A = \frac{d}{F}$.

Относительное отверстие выражается в виде дроби с числителем 1 и знаменателем k , равным отношению фокусного расстояния F к диаметру светового отверстия объектива d : $k = \frac{F}{d}$ [2].

РЫБИЙ ГЛАЗ («*Fisheye*»), от англ. *fish-eye*) – сверхширокоугольный объектив с углом поля зрения около 180° (и выше) и неисправленной дисторсией периферийной области изображения. Обладает высокой глубиной резкости.

ЭКВИВАЛЕНТНОЕ ФОКУСНОЕ РАССТОЯНИЕ (ЭФР) – условная характеристика системы «объектив - приёмник света (плёнка, матрица)», показывающая угол обзора этой системы.

ЭФР равно фокусному расстоянию объектива, создающему на кадре плёнки размером 24×36 мм (или «полнокадровой» цифровой матрице с кроп-фактором 1) такой же угол обзора по диагонали кадра, что и данный объектив на используемом с ним светочувствительном элементе (например, матрице меньшего размера, чем «полный кадр»).

Для определения ЭФР следует фактическое фокусное расстояние объектива F умножить на кроп-фактор матрицы K_f : $ЭФР = F \cdot K_f$

ЭКСПОЗИЦИЯ – количественная мера излучения, воздействующего на матрицу фотоаппарата за время освещения. Экспозиция H равна произведению освещённости E матрицы и времени t , в течение которого она подвергается облучению: $H = E \cdot t$ [2].

Интенсивность света регулируется величиной диафрагмы, а время – выдержкой. Для видимого излучения экспозиция выражается в лк×с (люкс-секунда).

ЭКСПОПАРА – сочетание значений выдержки и диафрагмы (диафрагменного числа).

ТРОПИЧЕСКИЙ ГОД – промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра истинного Солнца через точку весеннего равноденствия [5].

Средняя продолжительность тропического года 365.2421897 средних солнечных суток.

ISO (International Organization for Standardization) – Международная организация по стандартизации. Единицы ISO в фотографии применяют для обозначения светочувствительности фотоприёмников.

В цифровой фотографии светочувствительность матрицы увеличивается за счёт усиления сигнала со светочувствительных элементов (пикселей) электронным блоком, при этом усиливается не только «полезный» сигнал, но и помехи. Поэтому чем более высокое значение чувствительности используется, тем выше «цифровой шум».

Список литературы

по фотографии

1. Большая энциклопедия цифровой фотографии/Дмитрий Миронов. – М.: Эксмо, 2012. – 328 с.:ил. ISBN 978-5-699-54901-6
2. Краткий справочник фотолобителя /Сост. и общ. ред. Н.Д. Панфилова и А.А. Фомина. – 4-е изд., доп. –М.: Искусство, 1985. – 386 с., ил.
3. Ночная и вечерняя фотосъёмка/ Ли Фрост. Полное руководство. – М.: Арт-Родник, издание на русском языке, 2007. ISBN 978-5-9794-0013-6
4. <http://prophotos.ru/>- журнал о фототехнике и фотографии (статьи «Основы астрофотографии для начинающих»
<http://prophotos.ru/lessons/14203-astrofotografiya-dlya-nachinayuschih>, «Астрофотография: 5 важнейших качеств»
<http://prophotos.ru/lessons/4728-astrofotografiya> и др.)

по астрономии

5. Кононович Э. В. Мороз В.И. Общий курс астрономии: Учебное пособие/под ред. В.В. Иванова. Изд. 2-е, испр. М.: Едиториал УРСС, 2004. – 544 с. (Классический университетский учебник) ISBN 5-354-00866-2
6. Дагаев М.М. Лабораторный практикум по курсу общей астрономии. – М.: государственное издательство «Высшая школа», 1963.
7. <http://www.startrails.de/html/software.html> - описание работы в программе Startrails
8. <http://www.adobe.com/ru/products/photoshopfamily.html> - семейство продуктов Adobe Photoshop для обработки изображений

Учебное пособие

Жучков Роман Яковлевич
Типикина Екатерина Николаевна

АСТРОФОТОГРАФИЯ В ЗАДАЧАХ

Дизайн обложки
А.В. Чернова

Подписано в печать 28.02.2017.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Формат 60x84 1/16. Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. .
Тираж экз. Заказ

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательства Казанского университета

420008, г. Казань, ул. Профессора Нужина, 1/37
тел. (843) 233-73-59, 233-73-28