

Астрономия, часть 1.

В первой части астрономии мы познакомимся с видимым движением звёзд и Солнца, научимся определять координаты звёзд на карте и на небе, пользоваться некоторыми астрономическими приборами – квадрантом, солнечными часами и астролябией.

Другие разделы астрономии: небесную механику и движение планет, движение Луны, законы Кеплера, баллистику межпланетных перелётов, а также астрофизику, галактическую и внегалактическую астрономию мы сейчас рассматривать не будем, оставим на более старшие классы.

§ 1. Географические координаты на Земле. Экваториальные координаты звёзд на небе. Кажущееся движение звёзд на разной широте.

Географические координаты на Земле.

Вам уже известно, что Земля имеет форму шара. Строго говоря, это не совсем так, но для наших учебных целей мы будем считать Землю идеальным шаром. Земля, как и большинство объектов в космосе, вращается. В любом вращающемся твёрдом теле можно выделить ось вращения – такую прямую, точки которой имеют нулевую скорость. Точки пересечения оси вращения с поверхностью тела называются полюсами.

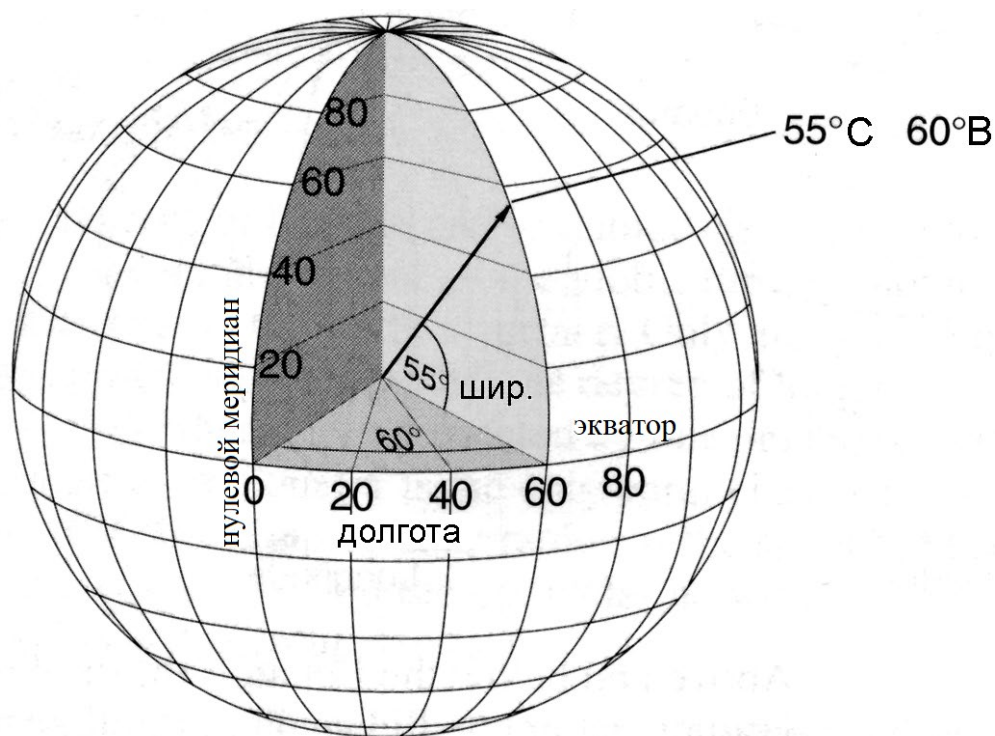
Северный полюс – это тот полюс, при взгляде на который из космоса мы видим вращение Земли против часовой стрелки. Южный полюс, соответственно, это тот, глядя на который мы видим вращение Земли по часовой стрелке.

Северный и южный полюсы – это две особые точки на Земле. Координатная сетка на поверхности Земли строится с опорой на полюсы.

Перпендикулярно земной оси проводятся плоскости. Линии пересечения этих плоскостей с поверхностью Земли представляют из себя окружности



разных радиусов, они называются параллелями. Самая большая параллель называется экватором. Каждая параллель соответствует своей географической широте. На рисунке показано как отсчитывается широта: на экваторе широта равна нулю, к северу от экватора постепенно увеличивается от 0 до 90°, к югу тоже увеличивается от 0 до 90°. Чтобы отличить точку северного полушария от симметричной ей точки южного, при указании географической широты необходимо сообщить не только число, но и сказать северная это или южная широта.



Второе семейство линий на поверхности Земли – это меридианы. Меридиан – это линия, тоже представляющая из себя окружность, соединяющая полюсы. В отличие от параллелей, среди которых можно выделить одну особую (экватор), все меридианы равны между собой. Нет никакого физического признака, по которому один меридиан отличается от другого, поэтому нулевой меридиан, от которого ведётся отсчёт, просто назначен по договорённости. На Земле это меридиан, проходящий через обсерваторию в городке Гринвич, пригороде Лондона.

Каждый меридиан соответствует своей географической долготе. Гринвичский меридиан имеет долготу 0°, на восток от нулевого отсчитывается восточная долгота, которая может быть от 0° до 180°, на запад – западная, тоже от 0° до 180°. При указании географической долготы точки вы должны не только сообщить число, но и сказать является ли долгота восточной или западной.

Например, географические координаты Жуковского: $55,6^\circ$ северной широты и 38° восточной долготы. Сокращённо записываем так: $55,6^\circ$ с.ш., 38° в.д.

Зная географические координаты любого объекта на Земле, вы можете легко найти его на карте или на глобусе.

Упражнение 1.1:

Пользуясь географической картой мира [карта мира физическая.jpg](#) определите какие объекты находятся по указанным координатам:

а) озеро, 54° с.ш., 108° в.д.

б) остров, 8° с.ш., 81° в.д.

в) остров, 42° ю.ш., 145° в.д.

г) остров, 55° ю.ш., 70° з.д.

Сверьтесь с ответами на последней странице.

Экваториальные координаты звёзд на небе.

Если мы продолжим земную ось дальше в обе стороны в бесконечность, то теперь эту же прямую мы будем называть осью мира. Это в самом деле очень точное название, потому что мы, если примем удобную для нас систему отсчёта относительно Земли (помните из физики принцип относительности Галилея, согласно которому мы можем выбирать любую удобную для нас систему отсчёта?), то в такой системе отсчёта будем считать Землю неподвижной, а вся окружающая вселенная движется относительно нас, в данном случае движение вращательное.

В древние времена так и думали. Система мира, в которой Земля неподвижна и находится в центре вселенной, а весь мир вращается вокруг неё, называется геоцентрической («гея» - Земля), её предложил Клавдий Птолемей во II веке нашей эры в своём трактате «Альмагест». Несмотря на ошибочность такого представления, это не помешало Птолемею и другим астрономам Древнего Мира и Средневековья составить довольно точные каталоги звёзд и совершить верные открытия.

В XVI веке Николай Коперник в работе «О вращении небесных сфер» впервые предложил гелиоцентрическую систему («гелиос» - Солнце), в которой в центре мира (тогда понятие вселенной было почти равносильно Солнечной системе) находится Солнце, а Земля – лишь одна из планет, вращающихся вокруг Солнца.

Итак, ось мира – это продолжение Земной оси в бесконечность в обе стороны. Бесконечно удалённые от нас точки на оси мира называются северным и южным полюсами мира. Земля – крохотная пылинка в огромных просторах космоса, поэтому любую прямую, параллельную земной оси, мы тоже можем считать осью мира. На огромном расстоянии от нас в 450 световых лет, на продолжении оси мира на север, почти точно на этой прямой находится Полярная звезда (α Малой Медведицы). В северном полушарии нам повезло – Полярная звезда служит удобным ориентиром, который не только указывает на север, но и показывает широту места наблюдения. В южном полушарии на оси мира, к сожалению, нет яркой звезды, но примерное направление на юг показывает созвездие Южный Крест.

И земная ось, и наш взгляд на Полярную звезду – это почти одна и та же прямая, поэтому мы можем считать их совпадающими, это и есть ось мира.

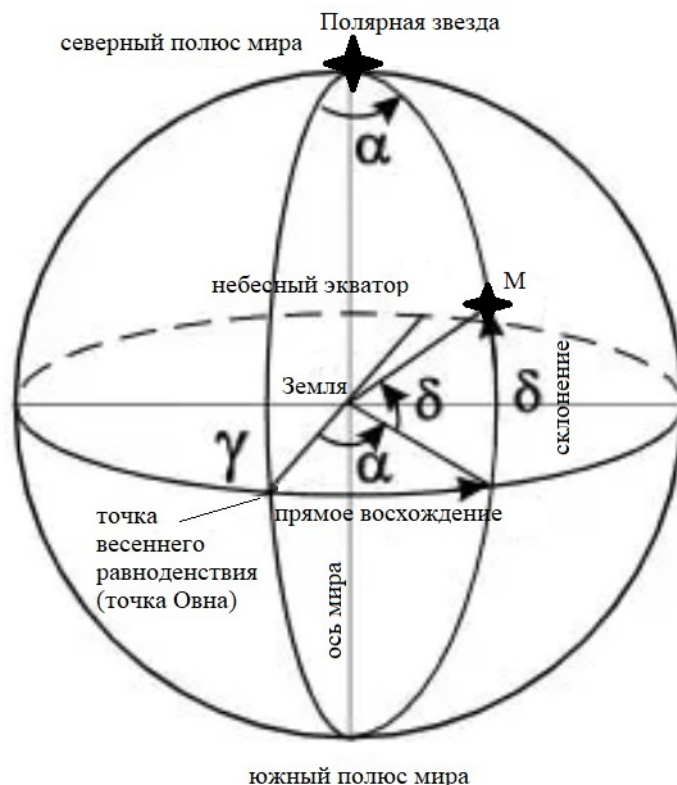
Аналогично географической системе координат, мы проводим перпендикулярно оси мира плоскость, проходящую через центр Земли. Распространим эту плоскость в бесконечность во все стороны, и получим небесный экватор.

Опираясь на ось мира и небесный экватор вводим систему небесных координат, которая называется экваториальной системой координат. (Точнее, второй экваториальной. Существует ещё первая экваториальная система, но мы не будем её использовать).

В центре экваториальной системы координат находится Земля. Ось мира – продолжение земной оси, плоскость небесного экватора совпадает с плоскостью земного экватора. В северном полюсе мира находится Полярная звезда.

Аналог земной широты на небе называется склонением. Склонение принято обозначать греческой буквой δ . Склонение – это угол, отсчитываемый от небесного экватора в направлении на полюсы.

В отличие от широты, склонение не называют северным или южным, вместо этого ему присваивается знак плюс или минус. На север считается знак $+$, на юг знак $-$, поэтому при



указании склонения вам не нужно называть северное оно или южное. Вместо этого просто указываете знак.

Аналог земной долготы называется **прямым восхождением**, обозначается буквой α . Так же как и на Земле, где все меридианы физически равноправны, на небе нет физически особенного направления вдоль небесного экватора, поэтому нулевое направление принято по договорённости, и таковым выбрано направление на точку весеннего равноденствия (также называемую точкой Овна). На звёздных картах точка весеннего равноденствия обозначается знаком Овна, похожим на букву γ . Точка Овна имеет склонение 0° и прямое восхождение 0 часов.

Про точку весеннего равноденствия мы поговорим позже, когда будем рассматривать движение Солнца, эклиптику и зодиак. Для ориентировки на небе, примерно на направлении нулевого прямого восхождения на небе находится звезда Каф (β Кассиопеи).

Если смотреть с Земли на северный полюс мира, то есть на Полярную звезду, то отсчёт прямого восхождения ведётся по часовой стрелке. Если наоборот, смотреть на южный полюс мира, то отсчёт прямого восхождения получается против часовой стрелки.

Традиционно прямое восхождение измеряют не в привычных градусах, а в часах. Окружность небесного экватора разбита по углам на 24 часа. Прямое восхождение считается от 0 часов (в точке Овна) до 24 часов (тоже точка Овна, но через полный оборот). Это непривычно, но в данном случае часы являются не единицей измерения времени, а единицей измерения углов. Полная окружность, которая обычно составляет 360° , в прямом восхождении составляет 24 часа.

Вам, должно быть, уже понятно, что в северном полушарии видимое нам движение звёзд представляет из себя вращение небесной сферы вокруг северного полюса мира - Полярной звезды. Полярная звезда неподвижна. Все остальные звёзды описывают вокруг неё окружности тем большего радиуса, чем ближе они к небесному экватору, то есть чем меньше их склонение. Это вращение происходит против часовой стрелки. В южном полушарии видимое вращение небесной сферы происходит наоборот, по часовой стрелке вокруг южного полюса мира.

Звёзды в экваториальных координатах занимают постоянные положения, и сетка экваториальных координат вращается вместе со звёздами. Это полностью аналогично тому, как географические объекты на Земле имеют постоянные координаты, и координатная сетка меридианов и параллелей вращается вместе с Землёй.

По традиции всё небо разбито на участки, называемые созвездиями. Всего имеется 89 участков и 88 созвездий. Одно из созвездий, Змеи, разорвано на две части созвездием Змееносца (мифологический Змееносец разрывает Змею на две части), отсюда и получается один дополнительный участок. Обычно самая яркая звезда созвездия обозначается буквой α , следующая по яркости β , потом γ , и так далее в порядке греческого алфавита. Лишь немногие, наиболее яркие звёзды, имеют ещё и собственные имена. Получается, что такие звёзды имеют два обозначения: по названию созвездия и собственное имя.

Например, звезда Бетельгёйзе также обозначается как α Ориона, а Антáрес также обозначается как α Скорпиона. Чтобы однозначно понять о какой звезде идёт речь, достаточно назвать одно, любое из обозначений.

Из всех звёзд на небе выбраны 58 наиболее ярких и легко узнаваемых, они называются штурманскими, или навигационными. Даже в наше время они используются для астронавигации, особенно в космосе. Астронавигация - определение положения по звёздам, является более точным методом, чем использование магнитного компаса и инерциальных систем.

Упражнение 1.2:

Найдите на карте звёздного неба [карта звездного неба.jpg](#) северный полюс мира и Полярную звезду; небесный экватор и координатную сетку склонений и прямых восхождений. Эта карта составлена таким образом, что звёзды, находящиеся внутри красной окружности экватора, принадлежат северной части неба, они имеют положительное склонение δ , а вне окружности экватора – отрицательное склонение δ , они принадлежат южной полусфере. Обратите внимание, что отсчёт прямого восхождения ведётся по часовой стрелке, начиная с точки весеннего равноденствия γ (точки Овна).

По данным координатам определите звезду.

- а) Например: прямое восхождение 13 часов 25 минут, склонение -11° . Это звезда Спика (α Девы).
- б) прямое восхождение 18 часов 37 минут, склонение $+39^\circ$.
- в) прямое восхождение 6 часов 45 минут, склонение -17° .
- г) прямое восхождение 14 часов 15 минут, склонение $+19^\circ$.
- д) прямое восхождение 19 часов 50 минут, склонение $+9^\circ$.

Сверьтесь с ответами на последней странице.

Кажущееся движение звёзд на разной широте.

Ещё раз повторим кажущееся нам с Земли движение звёзд. Всё звёздное небо, как единая цельная хрустальная сфера вращается вокруг оси мира. Мы находимся в центре этой небесной сферы. Каждая звезда на небесной сфере имеет своё постоянное положение, определяемое её экваториальными координатами – склонением δ и прямым восхождением α . Траектории движения звёзд кажутся нам концентричными окружностями (то есть окружностями с общим центром). Экваториальная система координат вращается вместе со звёздным небом.

В северном полушарии этим общим центром всех окружностей является северный полюс мира, в котором по удачному совпадению находится Полярная звезда. Вращение неба вокруг Полярной звезды происходит против часовой стрелки.

В южном полушарии общим центром является южный полюс мира, в котором нет заметной звезды, что затрудняет отыскание полюса. Вращение неба в южном полушарии вокруг южного полюса мира происходит по часовой стрелке.

Эта фотография сделана ночью с большой выдержкой, на ней хорошо видны траектории звёзд – дуги концентричных окружностей. В центре видна точка - Полярная звезда, значит фотография сделана в северном полушарии.



Видно, что некоторые звёзды, расположенные ближе к полюсу, никогда не уходят за горизонт – это незаходящие звёзды, на этой широте они видны всегда, в любую ночь в любое время. У других звёзд часть окружности уходит под горизонт – это восходящие-заходящие звёзды. Существуют также звёзды, расположенные ближе к противоположному полюсу мира, их окружности полностью находятся ниже горизонта – невосходящие звёзды, на нашей широте мы их не можем увидеть, они заслоняются Землёй.

Примем к сведению пока без доказательства важный факт: высота полюса мира как раз соответствует географической широте нашего места наблюдения.

На экваторе широта $\varphi = 0^\circ$, поэтому оба полюса мира – и северный, и южный, находятся на горизонте, Полярная звезда находится на горизонте.

На северном полюсе широта $\varphi = 90^\circ$, Полярная звезда находится в зените, то есть прямо над головой, небесная сфера вращается вокруг зенита.

На широте Жуковского $\varphi \approx 55,6^\circ$ Полярная звезда находится на высоте $\approx 55,6^\circ$ над горизонтом.

Упражнение 1.3.

а) В каком месте Земли могла быть сделана эта ночная фотография?



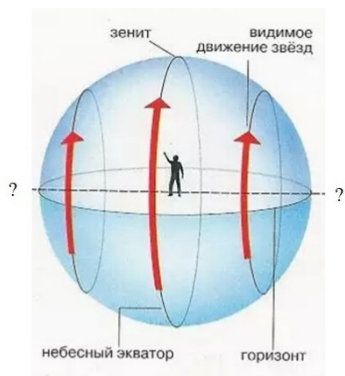
б)



На схеме показано видимое вращение неба на полюсе. Некоторые звёзды являются незаходящими, некоторые невосходящими. Восходяще-заходящих звёзд на полюсе нет.

На каком полюсе находится наблюдатель, на северном или на южном?

в)



На схеме показано вращение неба на экваторе. Все звёзды являются восходяще-заходящими. Невосходящих и незаходящих звёзд нет.

С какой стороны на рисунке находится северный, и с какой стороны южный полюс?



На схеме показано вращение неба на средней широте. Часть звёзд незаходящие, часть невосходящие, часть восходяще-заходящие.

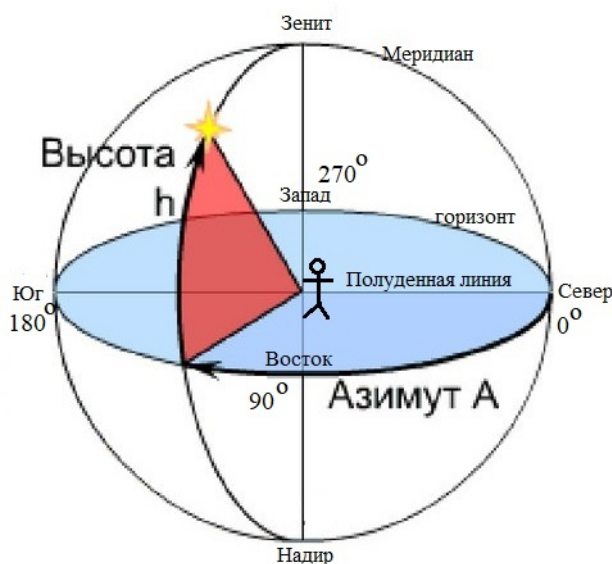
В каком полушарии находится наблюдатель, в северном или в южном?

§ 2. Азимутальные координаты. Измерение азимутальных координат. Суточное и годичное вращение небесной сферы. Подвижная карта звёздного неба.

Азимутальные координаты.

Экваториальные звёздные координаты, с которыми мы познакомились выше, имеют то преимущество, что каждая звезда занимает в них постоянное положение, поэтому экваториальные координаты удобны для составления карт и каталогов, ими вообще удобно пользоваться.

Но экваториальные координаты имеют и недостаток - они вращаются вместе со звёздным небом, поэтому мы не можем просто посмотрев на небо измерить координаты какой-либо звезды – в разные моменты времени она может оказаться в совершенно разных местах своей траектории-окружности.



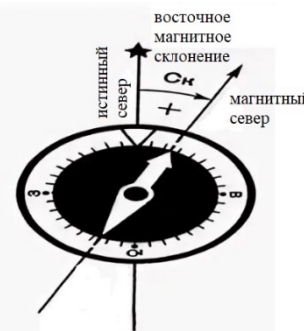
Проводя наблюдения за звёздами, мы можем измерить только высоту звезды над горизонтом и её азимут, то есть угол между проекцией звезды на горизонт и направлением на север. Эти два параметра составляют азимутальную (или местную) систему координат.

В центре азимутальной системы координат находится наблюдатель. Прямо над ним находится точка, называемая зенит, а противоположно зениту (то есть прямо внизу под

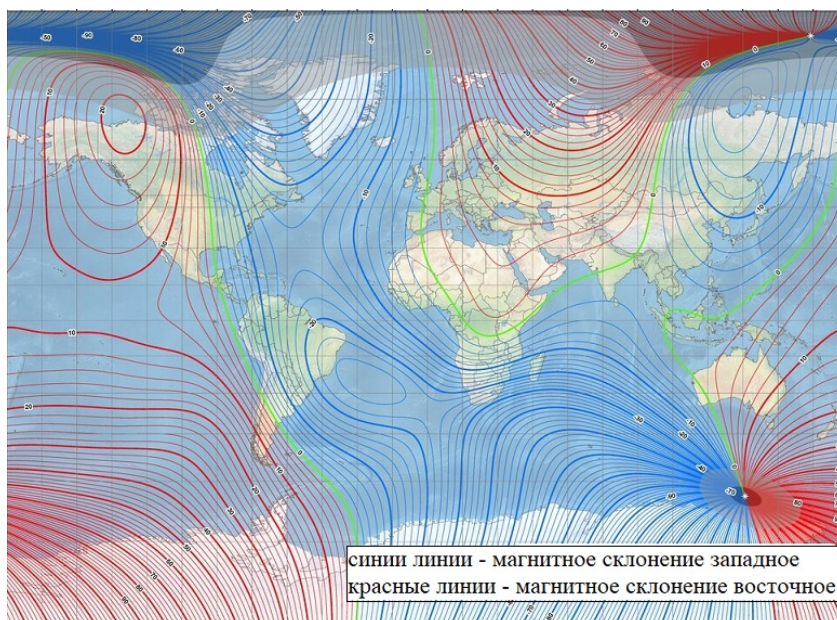
землѣй) – точка надир. Зенит, наблюдатель и надир лежат на одной прямой, представляющей из себя отвесную линию.

Перпендикулярно отвесной линии мы имеем плоскость, уходящую на горизонт. В плоскости горизонта мы выделяем направления на север, восток, юг и запад.

Важно: нельзя путать истинный север (географический и астрономический) с магнитным (определяемым с помощью магнитного компаса). Направления на истинный и на магнитный север не совпадают, иногда довольно значительно. Разница между этими направлениями называется магнитным склонением. В Жуковском магнитное склонение составляет примерно 12° к востоку – то есть стрелка магнитного компаса указывает не на истинный географический север, а повёрнута на 12° восточнее.



Магнитные полюса Земли находятся в постоянном движении. Изучение горных пород показало, что в геологической истории Земли по меньшей мере 14 раз происходила инверсия магнитного поля, то есть северный и южный магнитные полюса менялись местами. Последний раз это произошло 780 тысяч лет назад. В настоящее время северный магнитный полюс движется в Северном Ледовитом океане от Канады в сторону полуострова Таймыр со скоростью 40 км в год, в связи с чем магнитное склонение в Жуковском постепенно увеличивается со скоростью около 2° за столетие.



Азимут, обычно обозначаемый буквой A , — это угол, отсчитываемый от севера по часовой стрелке. Таким образом, направление на север имеет азимут 0° , восток 90° , юг 180° , запад 270° .

До недавнего времени в астрономии было принято отсчитывать азимут от юга, и вы ещё можете встретить такую систему в книгах, однако сейчас астрономия перешла на привычный отсчёт азимута от севера, как в географии. Будьте внимательны при использовании справочников, в зависимости от года издания там может оказаться одна либо другая система. Мы будем пользоваться новой, то есть считать азимут от севера.

Высота h – это угол между звездой и горизонтом. Высота измеряется в градусах от 0° до 90° . Ноль градусов – это высота горизонта, 90° - высота зенита.

В азимутальной системе координат выделяют ещё несколько линий:

Небесный меридиан (или просто меридиан) – окружность, проходящая по небесной сфере с севера на юг через зенит и надир. Земной географический меридиан лежит точно под небесным меридианом и проходит через точку, где находится наблюдатель.

Полуденная линия – линия в плоскости горизонта, проходящая с севера на юг через наблюдателя. Фактически это линия «север-юг» на местности.

Мы не можем наблюдать часть небесной сферы, находящуюся ниже горизонта, так как она закрыта поверхностью Земли. Для наблюдения нам доступна только часть, находящаяся в данный момент выше горизонта.

Измерение высоты и азимута.



Для измерения высоты звезды в практической работе мы будем использовать квадрант. Квадрант представляет из себя четверть круга с угловой разметкой по краю. К центру на нити подвешен груз, что даёт отвесную линию. Необходимо совместить звезду с обеими диоптриями (отверстиями) и считать показания по отвесу.



Буссоль

Азимут определяется с помощью буссоли – прибора, похожего на компас. Сначала буссоль выставляют по магнитной стрелке с учётом магнитного склонения, для чего буссоль сначала ориентируют ровно на магнитный север, затем корпус прибора поворачивают против часовой стрелки на 12° , таким образом обеспечивается учёт восточного склонения 12° . Далее необходимо заметить в какую точку горизонта проецируется интересующая нас звезда, повернуть визир на соответствующий угол и считать показания по шкале.

Измеренные высота и азимут звезды послужат нам исходными данными для последующего вычисления экваториальных координат.

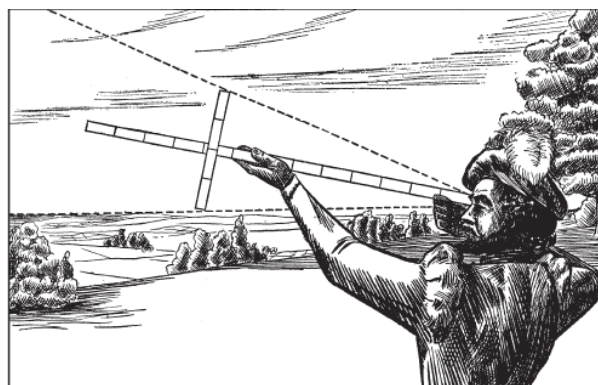
Принцип действия других угломерных приборов Древнего Мира и современности понятен из следующих рисунков.



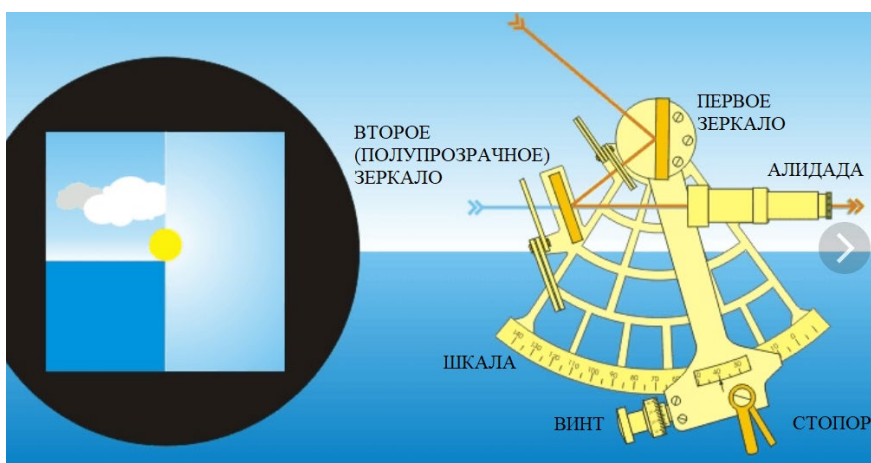
Квадрант большого радиуса, встроенный в здание в обсерватории Тихо Браге.

Луч от светила попадал на шкалу через окно в стене.

Стационарным квадрантом высота светила могла измеряться только в момент его прохождения через меридиан (этот момент называется кульминацией), поэтому кроме измерения высоты одновременно обязательно фиксировался момент времени.



Посох святого Якова.



Секстант. При измерении высоты Солнца первое зеркало прикрывается затемняющим свето-фильтром. Вращением винта осуществляется поворот рычага с первым зеркалом относительно корпуса со шкалой. Второе зеркало полупрозрачное — оно одновременно отражает

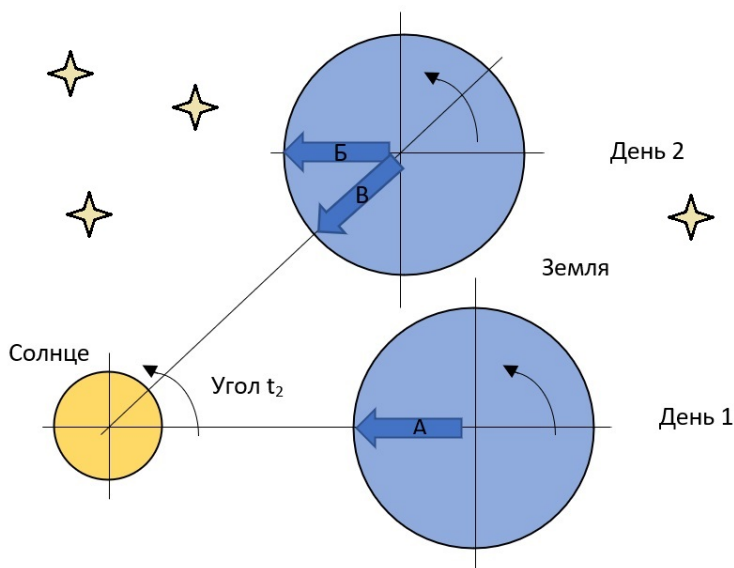
луч от первого зеркала и пропускает прямой луч. Необходимо наблюдая светило в алидаду и вращая винт добиться совмещения звезды (или центра Солнца) с линией горизонта, затем застопорить механизм и считать показания по шкале.

Суточное и годичное вращение небесной сферы.

Для выполнения предстоящей практической работы по определению координат звёзд, нам необходимо разобрать ещё один теоретический вопрос – о суточном и годичном вращении небесной сферы.

Земля, помимо собственного вращения вокруг своей оси, ещё движется вокруг Солнца. Направление собственного вращения и вращения вокруг Солнца совпадают. (Вообще говоря, по законам физики направления собственного вращения планеты и вращения относительно Солнца могут быть ориентированы произвольно, но конкретно для Земли для наших целей мы пока будем считать, что направления совпадают).

Рассмотрим схему, на которой показаны оба вращения. Пусть это будет вид на северный полюс, тогда оба вращения мы видим против часовой стрелки. Отметим положение А, в котором некоторая точка Земли находится в первый день – стрелка смотрит на Солнце, в точке полдень. После того, как Земля совершит полный оборот вокруг своей оси, (то есть в системе отсчёта Земли небесная сфера повернётся ровно на 360°), точка на Земле окажется в положении Б. В этот момент все звёзды займут на небе точно те же положения, какие были в момент А, все будут находиться на тех же азимутах и высотах, окружности траекторий всех звёзд замкнутся.

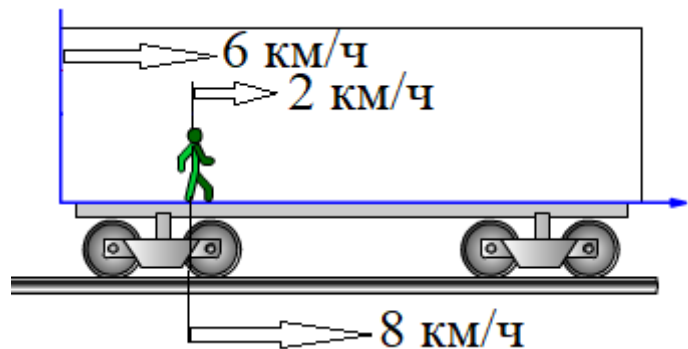


Однако в этот момент сутки ещё не закончились, потому что мы живём не по звёздному календарю, а по солнечному, и наши часы идут по солнечному времени. Полдень в нашей точке ещё не наступил, потому что Земля сдвинулась и теперь оказалась в новом месте. Чтобы отмеченная нами точка на Земле заняла такое же положение относительно Солнца, то есть чтобы стрелка опять смотрела на Солнце, необходимо чтобы Земля довернулась в положение В, а это займёт некоторое дополнительное время. Получается, что солнечные сутки немного длиннее звёздных.

На сколько именно длиннее? Обозначим этот угол дополнительного поворота t_2 . В году содержится 365 дней, следовательно, t_2 составляет $\frac{360^\circ}{365 \text{ дней}}$, что чуть меньше 1° . По времени это составляет $\frac{24 \text{ часа} \cdot 60 \text{ минут}}{365 \text{ дней}} \approx 4 \text{ минуты}$.

Таким образом, полное движение небесной сферы складывается из двух движений: собственного (суточного) вращения Земли, которое даёт один оборот в сутки, плюс годичного вращения относительно Солнца – один оборот в год, что в сутки составляет примерно 4 минуты. В результате сложения этих двух движений за сутки небесная сфера поворачивается примерно на 361° (не на 360°).

Это сложение движений похоже на ситуацию, когда человек идёт в движущемся вагоне. Тогда его скорость относительно земли складывается из скорости поезда, плюс собственной скорости человека относительно вагона.



При переводе координат звезды из азимутальной системы в экваториальную нам будет удобно посчитать отдельно суточное вращение, отдельно годичное вращение, и потом их просто сложить.

Подвижная карта звёздного неба.

Чтобы наглядно представить суточное и годичное движение небесной сферы, используем подвижную карту звёздного неба (её также ещё называют «планисферой»). Возьмите распечатанный лист в кабинете, или самостоятельно скачайте по ссылке [подвижная карта звездного неба.pdf](#) и распечатайте.

Вырежьте накладной круг по наружному контуру, потом, чтобы не сбиться, обведите карандашом линию нашей широты – это линия $\varphi = 55^\circ$, и потом по этой линии вырежьте отверстие. Край получившегося отверстия – это линия горизонта. Часть карты, которую мы будем видеть через отверстие, соответствует видимой части неба, то есть находится выше горизонта.

Найдите по краю карты календарные метки месяцев, а по краю накладного круга - часовые метки времени. Кроме того, найдите у отверстия накладного круга азимутальные метки: север, восток, юг, запад.

Чтобы увидеть положение звёздного неба относительно сторон света в данный день в данное время, вращайте накладной круг до совпадения нужных меток даты и времени.

Например, мы хотим увидеть как выглядит звёздное небо 30 января в 22 часа. Найдите на краю карты календарную метку границы января и февраля. Вращайте накладной круг до совпадения часовой метки 22 часа накладного круга с календарной меткой на карте. В границах горизонта мы увидим, что в этот день в это время Сириус находится на юге, Вега на севере, Арктур на северо-востоке, Капелла близко к зениту.

Чтобы узнать как повернётся небо за следующие два часа, нам нужно повернуть карту на два часа против часовой стрелки, удерживая при этом накладной круг (то есть горизонт) неподвижно. Это неудобно, ведь проще вращать накладной круг на неподвижной карте. Согласно принципу относительности, чтобы получить то же движение, мы удерживаем карту на месте и вращаем накладной круг по часовой стрелке. Следите за метками.

После поворота накладного круга на два часа мы увидим, что Сириус сместился на юго-запад, Вега сдвинулась к северо-востоку, Арктур теперь находится на востоке, а Капелла спустилась с зенита на запад.

Подвижная карта звёздного неба не позволяет делать численные измерения, но показывает направление вращения и примерное положение звёзд. С её помощью выполните следующее упражнение:

Упражнение 2:

а) с какой стороны света (север, восток, юг или запад) видны 1 ноября в 23 часа Альтаир и Процион?

б) в какое время 10 февраля Вега находится на севере?

в) в какой день Фомальгаут находится на юге в 1 час ночи?

г) вращением накладного круга на полный оборот определите какие из отмеченных на карте звёзд на нашей широте являются незаходящими.

§ 3. Совмещение экваториальной и азимутальной систем координат.

Основные линии и точки небесной сферы



Рассмотрим на одном чертеже экваториальную и азимутальную системы координат. Точка M — наша звезда. Сейчас вы уже можете найти основные объекты обеих систем координат.

Экваториальная (голубая) имеет: небесный экватор $EQWQ'$, ось мира $P_N P_S$, северный P_N и южный P_S полюсы мира, полуденную линию NS , меридиан $NP_N ZQS$.

Азимутальная (красная) имеет: горизонт $NESW$, отвесную линию ZZ' , зенит Z , надир Z' , и здесь мы также видим полуденную линию и меридиан.

Вам сейчас пока ещё сложно представить переход из одной системы в другую, поэтому пока будем просто следовать алгоритму. Смысл шагов алгоритма вам станет понятнее после выполнения практической работы. Звезду M держим неподвижной, а поворачивать будем небесную сферу.

Выполнив измерения мы получим азимутальные координаты звезды — азимут A и высоту h . Хотим получить экваториальные координаты — склонение δ и прямое восхождение α .

Переход выполним в два действия:

1. Сначала повернём азимутальную сетку таким образом, чтобы зенит перешёл в северный полюс мира. Для этого небесная сфера будет повернута вокруг прямой «восток-запад».

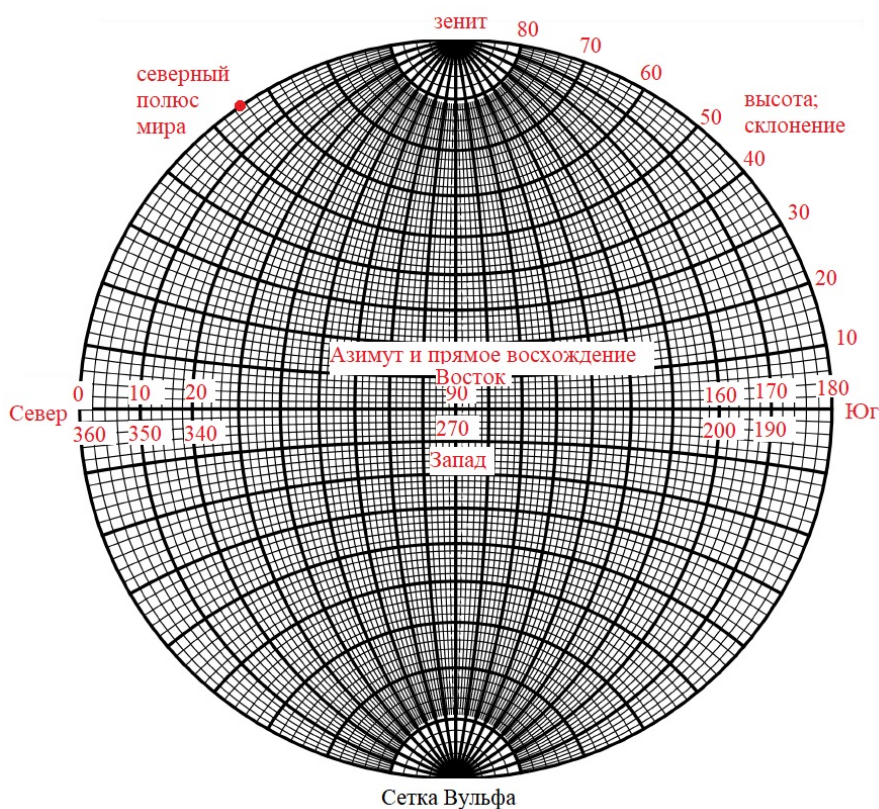
2. Вторым действием провернём сферу вокруг полюса мира на такой угол, чтобы точка Овна оказалась направлена вниз. В результате получим ответ.

Поехали! Для первого поворота используем сетку Вульфа.

Интересный факт: Георгий Викторович Вульф был в московском университете профессором кристаллографии, и к астрономии не имел никакого отношения. В кристаллографии нужно решать точно такую же геометрическую задачу по повороту координатных осей внутри кристалла, для чего Г.В. Вульф использовал сетку, впоследствии заимствованную астрономами. Мы сейчас воспользуемся этим изобретением. Магию, на которой работает эта сетка, сейчас разбирать не будем.

Построение выполняется на кальке, наложенной поверх сетки. Центр сетки и калька протыкаются и скрепляются общей иглой, чтобы можно было крутить кальку вокруг центра сетки.

На кальке поверх сетки отмечаем карандашом пять меток: точки зенита, надира, севера, востока, и на нашей широте 55° отмечаем северный полюс мира.



Работаем с сеткой в координатах азимута и высоты. Обратите внимание, что горизонтальная азимутальная линия имеет двойную проекцию: обе дуги - север-восток-юг, и обратная юг-запад-север отображаются на одну общую среднюю горизонтальную линию сетки. Если азимут нашей звезды больше 180° , то продолжаем отсчёт, идя справа налево как показано на рисунке. Аккуратно отмечаем на кальке карандашом положение звезды.

Поворачиваем кальку вокруг центра сетки по часовой стрелке так, чтобы теперь полюс мира занял верхнее положение. Зенит при этом уедет вправо по окружности.

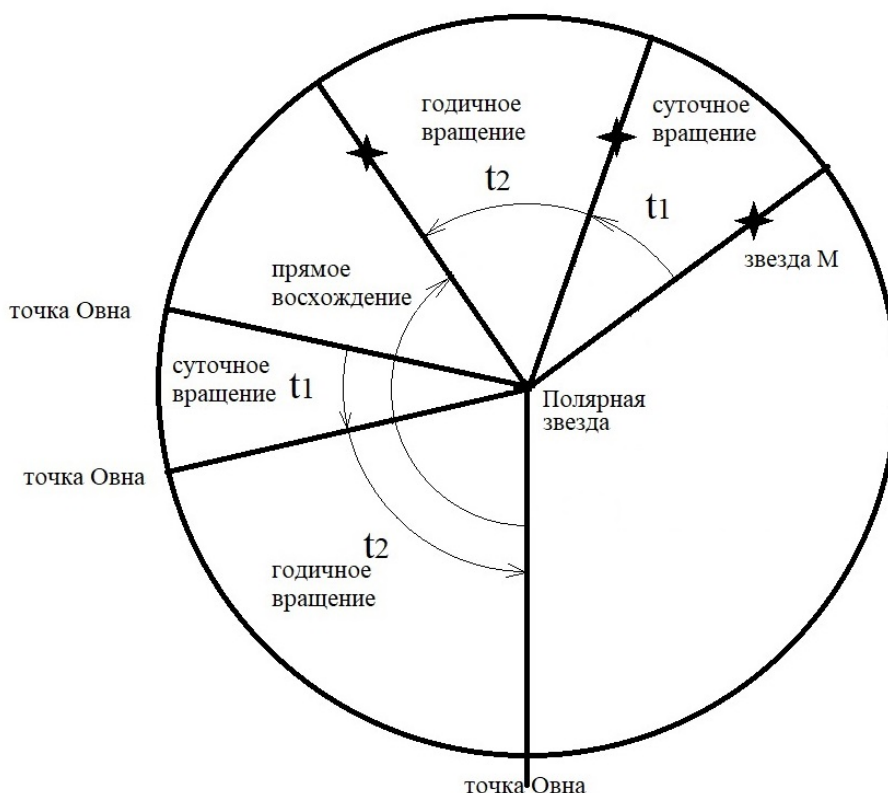
Теперь работаем с сеткой в координатах прямого восхождения и склонения. Считываем по сетке полученные координаты звезды. Прямое восхождение может иметь два возможных значения, выписываем оба, пусть они будут α_1 и α_2 , потом выберем из них подходящее по смыслу значение.

Готово. Склонение звезды δ уже получено, а для получения прямого восхождения переходим ко второму действию – повороту небесной сферы вокруг оси мира, то есть фактически вокруг Полярной звезды. Не забываем, что прямое восхождение измеряется в часах, поэтому нам нужно будет перевести градусы в часы, для чего умножим α на 24 часа и разделим на 360° .

Сейчас как раз нужно вспомнить, что вращение неба состоит из суточного и годичного, но для начала нужно получить истинное (местное солнечное) время.

Например, текущее московское время по часам t часов. Из этого времени вычитаем 0,47 часа (для Жуковского) и получаем истинное местное время t_0 .

(С поясным и истинным временем мы разберёмся уже очень скоро, пока просто примите этот факт к сведению).



Точка Овна, от которой на координатной сетке отсчитывается прямое восхождение, с достаточной для нас точностью находится под северным полюсом мира (то есть под Полярной звездой) в полночь в день весеннего равноденствия 21 марта. Сейчас мы повернём небесную сферу на углы суточного t_1 и годового t_2 вращения, чтобы совместить точку Овна с вертикалью.

Определяем количество часов истинного времени после полуночи, назовём его t_1 . Если измерение проведено до полуночи, то количество часов до полуночи берём со знаком минус. Так мы определили необходимый поворот небесной сферы на суточное вращение, величина измеряется в часах.

Считаем количество дней, прошедших после дня весеннего равноденствия 21 марта. Пусть это будет число d дней. Переводим количество дней в часы:

$$t_2 = \frac{d \cdot 24 \text{ часа}}{365 \text{ дней}}$$

Поворачиваем небесную сферу на суточное и годовое вращение и получаем прямое восхождение:

$$\alpha = \alpha_1 + t_1 + t_2, \text{ и}$$

$$\alpha = \alpha_2 + t_1 + t_2$$

Из двух полученных значений α выбираем то, которое подходит по звёздному каталогу.

§ 4. Практическое занятие. Определение экваториальных координат звезды.

Практическое занятие выполняется в тёмное время суток при достаточно чистом небе, чтобы были видны звёзды. Каждый ученик получает для определения координат свою звезду.

Используя квадрант и буссоль либо компас, определите азимутальные координаты звезды. Зная текущее время, дату, географические координаты места наблюдения и используя сетку Вульфа по алгоритму §3 найдите экваториальные координаты звезды. Сравните полученные результаты со звёздным каталогом.

При выполнении практической работы используйте заранее подготовленный рабочий лист (см. следующую страницу), следуйте алгоритму рабочего листа.

Сетку Вульфа достаточно иметь одну на класс. Скачать ей можно по этой ссылке: [сетка Вульфа.pdf](#)

Практическая работа «Определение координат звезды».

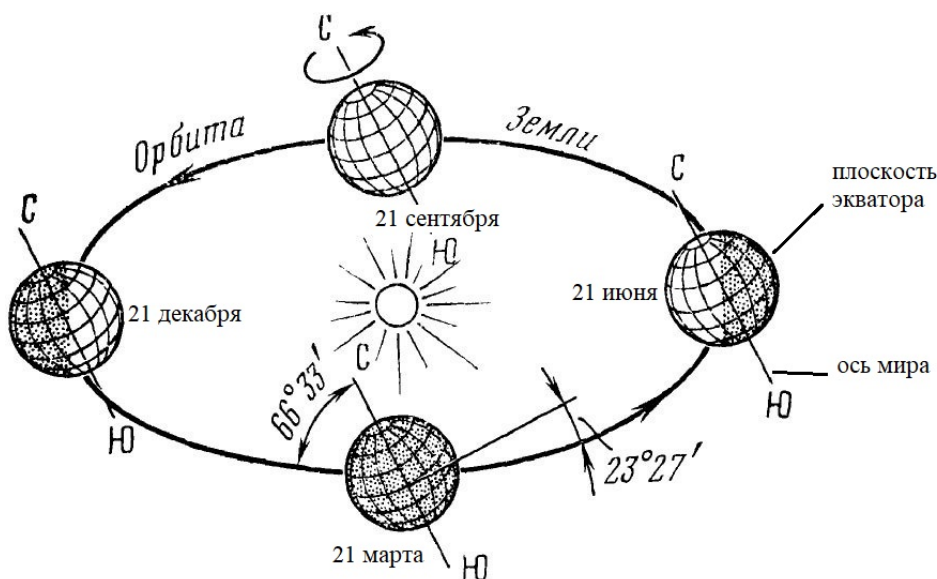
Выполняет: _____

Звезда:	
Координаты места наблюдения (Жуковский):	$\varphi = 55,6^\circ$ с.ш. $\lambda = 38^\circ$ в.д.
Дата измерения:	
Время по часам (московское), час:	$t =$
Истинное время, час:	$t_0 = t - 0,47 =$
Количество часов после полуночи, час: (если до полуночи, то знак минус)	$t_1 = t_0,$ если после полуночи $t_1 = t_0 - 24,$ если до полуночи $t_1 =$
Количество дней после 21 марта, d:	$d =$
Поворот небесной сферы на годичное вращение t_2 , час:	$t_2 = \frac{d \cdot 24 \text{ часа}}{365 \text{ дней}} =$
Высота звезды (измерение квадрантом), градусов	$h =$
Азимут звезды (измерение буссолью), градусов	$A =$
Отметить звезду на сетке Вульфа, повернуть кальку и получить параметры $\delta^\circ, \alpha_1^\circ, \alpha_2^\circ$	$\delta =$ $\alpha_1 =$ $\alpha_2 =$
Перевести α_1 и α_2 в часы, добавить повороты t_1 и t_2 и получить прямое восхождение, час:	$\alpha_1 = \frac{\alpha_1 \cdot 24 \text{ часа}}{360^\circ} + t_1 + t_2 =$ $\alpha_2 = \frac{\alpha_2 \cdot 24 \text{ часа}}{360^\circ} + t_1 + t_2 =$
Проверка. Координаты звезды по каталогу: Из двух значений α_1 и α_2 выберите подходящее	$\delta =$ $\alpha =$

§ 5. Движение Солнца. Эклиптика. Зодиак. Северный и южный тропики, северный и южный полярные круги.

Движение Солнца.

Ранее мы говорили, что собственное вращение Земли направлено в ту же сторону, что и вращение Земли вокруг Солнца. Это верно лишь приблизительно. Пришло время уточнить, что оси собственного вращения Земли и вращения Земли вокруг Солнца на самом деле не параллельны друг другу, а имеют между собой постоянный угол $23^{\circ}27'$, что примерно равно $23,5^{\circ}$.



На схеме показаны четыре положения Земли в процессе её годичного вращения вокруг Солнца. Поскольку по сравнению с межзвёздными расстояниями не только Земля, но и вся солнечная система имеет ничтожно малые размеры, движение Земли вокруг Солнца пренебрежимо мало для наблюдателя, живущего в другой звёздной системе. Поэтому мы считаем, что во всех положениях Земли ось мира и плоскость небесного экватора остаются прежними. Это значит, что в любое время года земная ось всегда остаётся направленной на Полярную звезду, и плоскость экватора тоже остаётся постоянной.

Наклон земной оси служит причиной таких природных явлений, как смена времён года, разная продолжительность дня зимой и летом, полярный день и полярная ночь.

Ранее мы также поняли, что при видимом вращении небесной сферы положение звёзд каждый день немного сдвигается, примерно на $\frac{1}{365}$ окружности, причём небесная сфера опережает Солнце. Рассмотрим удобную экваториальную систему координат, которая связана со звёздами, в ней Солнце

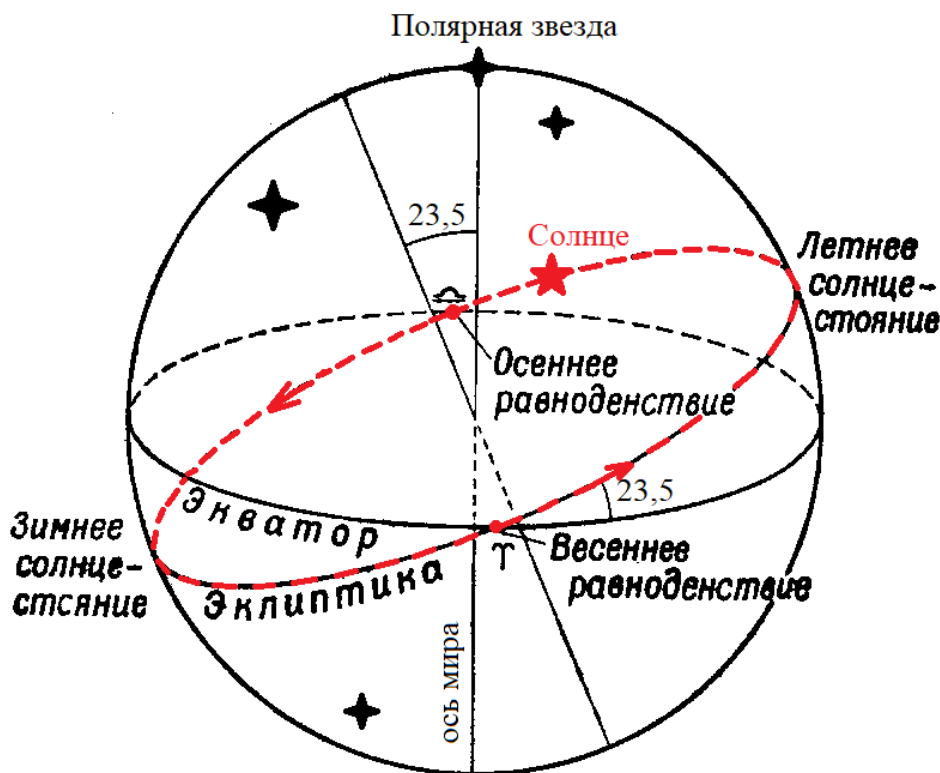
относительно звёзд отстаёт в своём движении. Это достаточно очевидно: раз звёзды вращаются быстрее Солнца, значит Солнце вращается медленнее звёзд. Этот эффект приводит к тому, что кажущееся годовое движение Солнца в экваториальной системе координат направлено против направления вращения звёзд.

Получается, что Солнце не занимает на небесной сфере постоянное положение с конкретными координатами, как остальные звёзды, а каждый день сдвигается на небе в направлении, противоположном направлению вращения небесной сферы, на $\frac{1}{365}$ своего пути.

Если бы наклон земной оси, те самые $23,5^\circ$, отсутствовал, то Солнце двигалось бы по небесному экватору, но из-за наличия этого наклона видимый путь Солнца также наклонён. Пока с достаточной для нас точностью мы будем считать этот путь окружностью. Эта окружность называется эклиптикой.

На схеме показано взаимное расположение экватора, эклиптики, оси мира, и годовое движение Солнца по эклиптике среди остальных звёзд, которые на небесной сфере неподвижны. Эклиптика пересекает экватор в точке весеннего равноденствия (точка Овна) и при обратном движении Солнца – в точке осеннего равноденствия (точка Весов). Точки летнего и зимнего солнцестояния – наиболее удалённые от экватора точки эклиптики.

Плоскость эклиптики соответствует плоскости орбиты Земли.

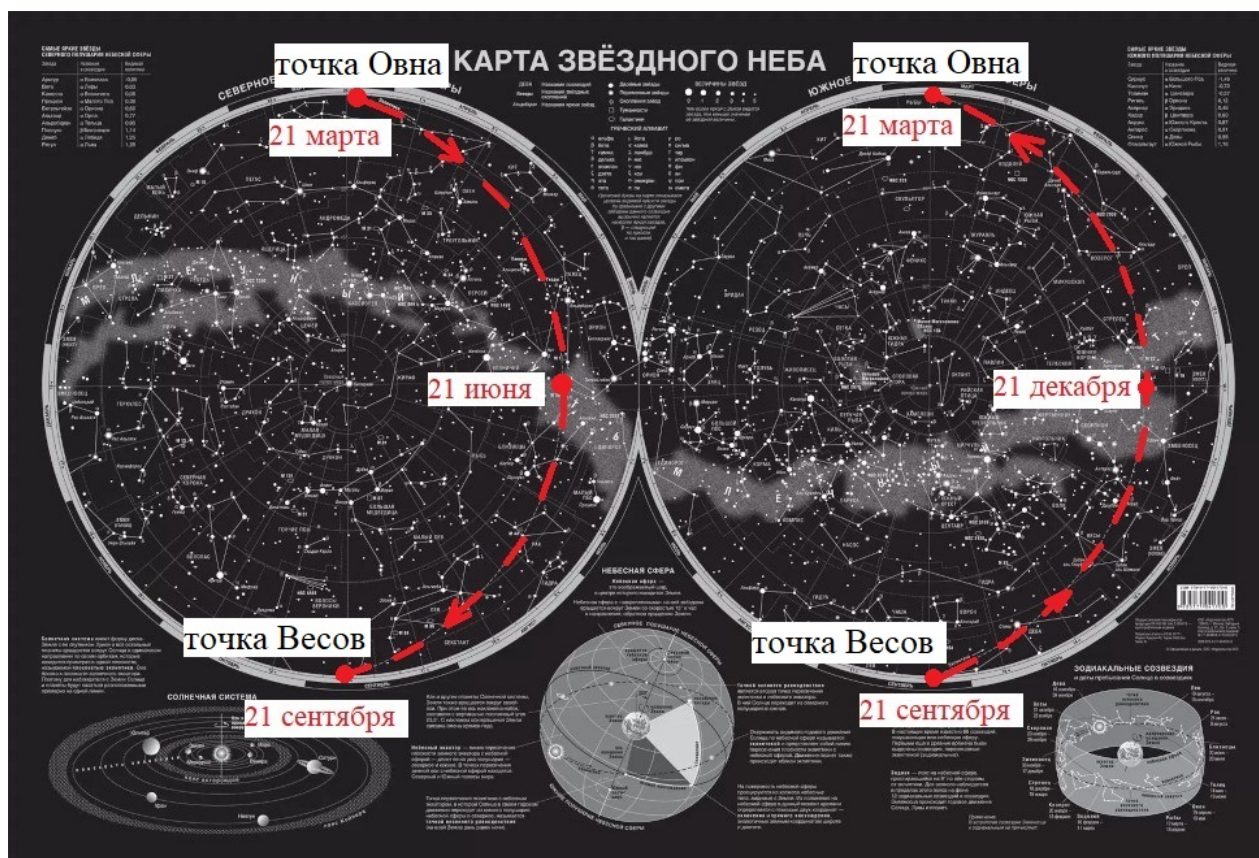


Эклиптика.

Итак, эклиптика – это видимый путь Солнца в годичном движении на небесной сфере среди звёзд. Солнце проходит круг эклиптики ровно за год, то есть примерно по $\frac{1}{365}$ части круга в день. Наклон этого круга, то есть его несовпадение с небесным экватором происходит из-за наклона земной оси.

В небесной механике плоскостью эклиптики называют плоскость, в которой лежит орбита Земли при её движении вокруг Солнца. В этой же плоскости движутся все планеты солнечной системы и большинство других объектов, практически мы можем считать, что солнечная система плоская.

Рассмотрим полную карту звёздного неба в виде северного и южного полушарий, на ней красной пунктирной линией показана эклиптика и стрелками указано направление движения Солнца. В северном полушарии мы наблюдаем вращение неба против часовой стрелки, а Солнце по эклиптике движется по часовой стрелке. В южном полушарии наоборот, небо вращается по часовой стрелке, а Солнце движется против часовой стрелки.



На эклиптике выделяются четыре особые точки:

День весеннего равноденствия, примерно 21 марта. В этот день Солнце входит в северное полушарие, пересекает небесный экватор в точке Овна, и имеет

координаты: склонение $\delta = 0^\circ$, прямое восхождение $\alpha = 0$ часов. В этот день продолжительность дня и ночи равны. Мы наблюдаем восход Солнца точно на востоке и заход точно на западе. Этот день считается началом астрономической весны. Точка Овна, как вы помните, в экваториальной системе является отсчётной точкой для задания прямого восхождения. Начиная с дня весеннего равноденствия продолжительность дня становится больше продолжительности ночи, склонение Солнца δ становится положительным и продолжает увеличиваться.

Через четверть года Солнце прибывает в точку летнего солнцестояния.

День летнего солнцестояния, примерно 21-22 июня. В этот день склонение Солнца δ достигает максимального значения $23,5^\circ$, а прямое восхождение α составляет 6 часов. День имеет максимальную длительность, а ночь самая короткая в году.

Начиная с дня летнего солнцестояния склонение Солнца начинает убывать, день начинает сокращаться. Через четверть года Солнце приходит в точку осеннего равноденствия.

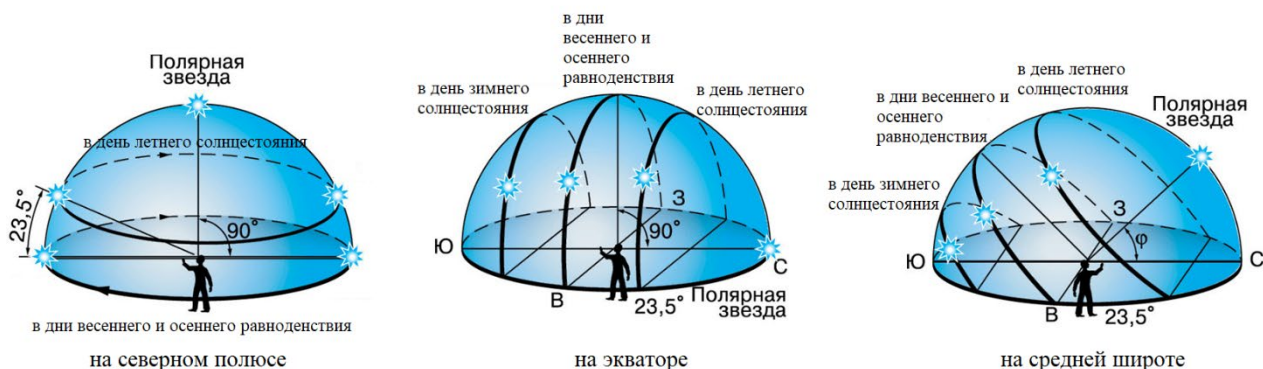
День осеннего равноденствия, примерно 21 сентября. Начинается астрономическая осень. Координаты Солнца в этот день: $\delta = 0^\circ$, $\alpha = 12$ часов. Эта точка на карте также называется точкой Весов. В этот день продолжительность дня и ночи равны, Солнце восходит точно на востоке и садится точно на западе. В этот день Солнце покидает северное полушарие и переходит в южное. Склонение δ становится отрицательным.

Ещё через четверть года Солнце приходит в точку зимнего солнцестояния.

День зимнего солнцестояния, примерно 21-22 декабря. В этот день склонение Солнца δ достигает минимального значения $-23,5^\circ$, а прямое восхождение α составляет 18 часов. День имеет минимальную длительность, а ночь самая длинная в году.

Начиная с дня зимнего солнцестояния склонение Солнца начинает возрастать, день начинает удлиняться. Через четверть года Солнце приходит в точку весеннего равноденствия (точку Овна), переходит из южного полушария в северное, круг замыкается и начинается следующий год.

На схеме показано видимое движение Солнца в разные дни на разных широтах.



На северном полюсе в день летнего солнцестояния Солнце описывает круг на постоянной высоте $23,5^\circ$, потом высота начинает уменьшаться. Имеет место полярный день. В дни весеннего и осеннего равноденствия Солнце идёт по кругу прямо по горизонту. В день зимнего солнцестояния Солнце описывает такой же круг под горизонтом, имеет место полярная ночь.

На экваторе в дни осеннего и весеннего равноденствия Солнце восходит на востоке, садится на юге, описывает по небу круг через зенит. В дни зимнего и летнего солнцестояния Солнце описывает круги соответственно к югу и к северу от зенита, проходя на расстоянии $23,5^\circ$ от зенита.

В средних широтах Солнце описывает наклонные круги как показано на схеме. Максимальное удаление Солнца в дни летнего и зимнего солнцестояний от траектории дней равноденствия составляет $23,5^\circ$.

Зодиак.

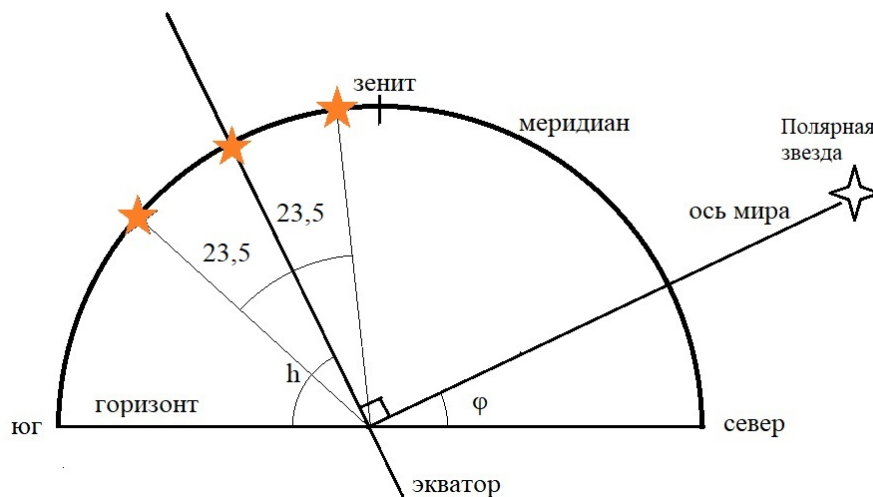
Слово «зодиак» может вам показаться созвучным со словом «зоопарк». И действительно, оба этих слова имеют один корень, «зоо» - животное.

По традиции, дошедшей до нас из Древнего Мира, эклиптика проходит через 12 созвездий, часть из которых (но не все) носят названия животных, поэтому эти созвездия называют зодиакальными. Солнце проходит через зодиакальные созвездия в следующем порядке: Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог, Водолей, Рыбы. Границы зодиакальных созвездий проведены таким образом, чтобы Солнце находилось в каждом из них равное время, по $\frac{1}{12}$ года.

Несмотря на то, что астрология была одним из видов обыкновенного шарлатанства, традиция такого именования созвездий дошла до нашего времени и используется в астрономии и поныне.

Упражнение 5.

Разрежем небесную сферу по меридиану. На рисунке показано положение Солнца на меридиане, то есть в полдень, в дни зимнего солнцестояния, равноденствий, и летнего солнцестояния.



а) Зная, что небесный экватор перпендикулярен оси мира; наклон земной оси составляет $23,5^\circ$ к плоскости эклиптики, выведите формулы, по которым можно вычислить высоту Солнца h в полдень на известной широте φ в дни равноденствий и в дни зимнего и летнего солнцестояний.

б) Используя полученные формулы найдите высоту Солнца в полдень в дни равноденствий, зимнего и летнего солнцестояний в Жуковском (широта $\varphi = 55,6^\circ$).

Северный и южный тропики. Северный и южный полярные круги.

Заметим, что из решения упражнения 5 следует, что на широте Жуковского Солнце никогда не бывает в зените. Максимальная высота, на которую поднимается Солнце $h = 59,7^\circ$ происходит в полдень в день летнего солнцестояния.

На схеме движения Солнца мы видим, что на экваторе Солнце в зените бывает, это происходит только в полдень только в дни равноденствий.

Вопрос: на какой географической широте φ_T Солнце находится в зените в полдень в день летнего солнцестояния? На этот вопрос легко ответить используя полученную формулу

$$h = 90^\circ - \varphi + 23,5^\circ, \text{ где } \varphi - \text{ географическая широта.}$$

Подставим вместо h высоту зенита 90° :

$$90^\circ = 90^\circ - \varphi_T + 23,5^\circ$$

$$\text{и получим } \varphi_T = 23,5^\circ.$$

Широта $23,5^\circ$ называется тропиком. В северном полушарии мы имеем северный тропик, также называемый тропиком Рака, а в южном полушарии – южный тропик, или тропик Козерога.

В поясе широт между северным и южным тропиками Солнце бывает в зените два раза в год. За пределами тропического пояса Солнце не бывает в зените никогда.

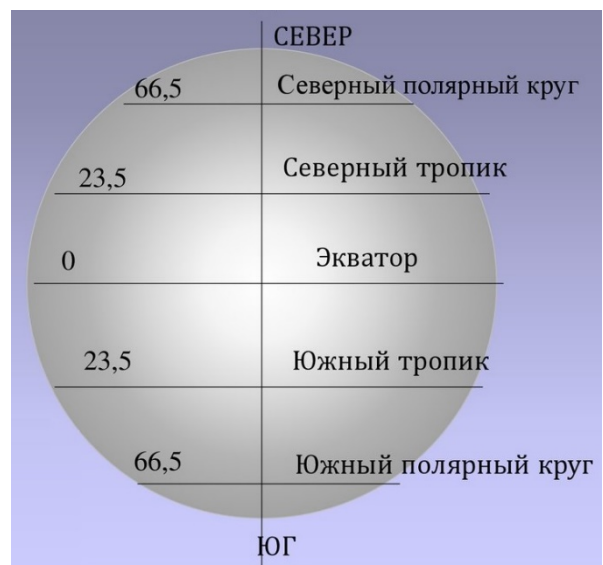
А на какой географической широте φ_n наблюдаются полярная ночь и полярный день? Это та широта, на которой Солнце в день зимнего солнцестояния не восходит из-за горизонта, то есть имеет высоту $h = 0$. Опять используем формулу.

$$h = 90^\circ - \varphi - 23,5^\circ$$

$$0^\circ = 90^\circ - \varphi_n - 23,5^\circ$$

Получим $\varphi_n = 90^\circ - 23,5^\circ = 66,5^\circ$. Широта $66,5^\circ$ называется полярным кругом.

На Земле имеются северный и южный полярный круги. На широтах, больших чем полярные круги, наблюдается явление полярной ночи и полярного дня. В поясе между полярными кругами этого явления не бывает.



§ 6. Истинное и поясное время. Солнечные часы.

Истинное и поясное время.

Мы живём по солнечному календарю и по солнечному времени. Сутки – это один наблюдаемый оборот Солнца вокруг нас. (Не звёзд! Помним, что оборот небесной сферы с неподвижными звёздами происходит на 4 минуты быстрее, чем оборот Солнца). В нашей системе счёта времени выделяются два момента: когда Солнце пересекает меридиан днём (верхняя кульминация), в этот момент оно имеет наибольшую высоту – это истинный местный солнечный полдень. Второй момент – когда Солнце пересекает меридиан ночью (нижняя кульминация), в этот момент Солнце находится под горизонтом и имеет наименьшую высоту, это истинная полночь.

Сутки разбиваются на 24 равных часа. Сутки начинаются в полночь, это время 0 часов, а в полдень время получается 12 часов.

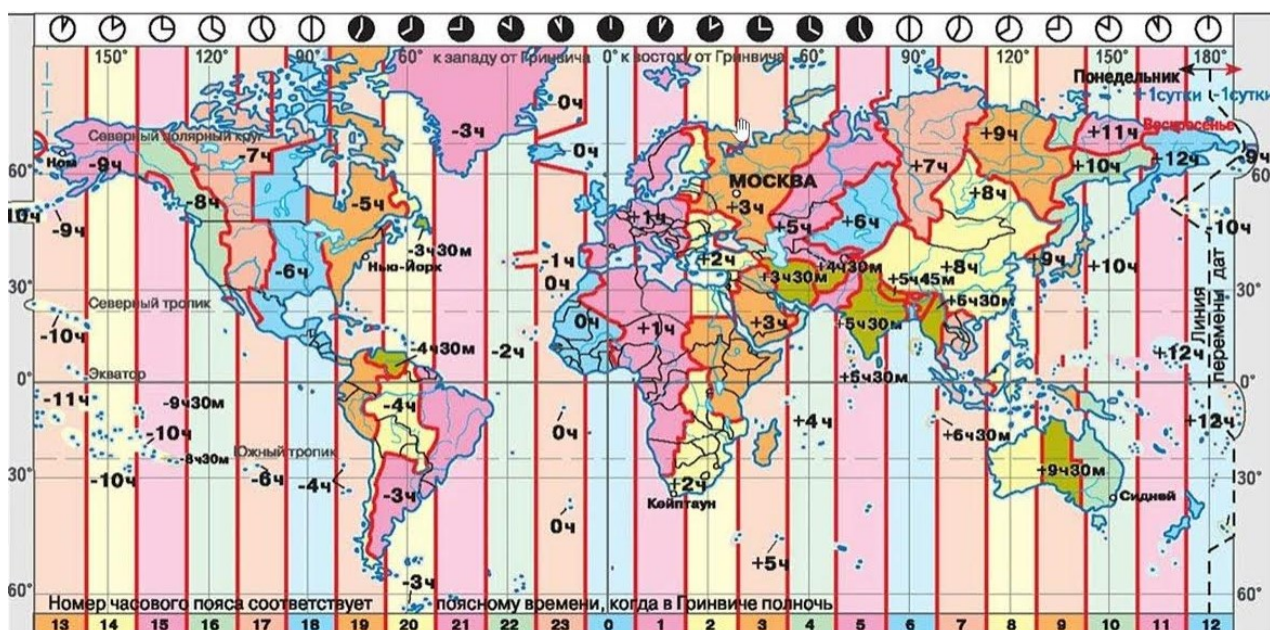
В Древнем Море и в Средние века сутки делились на часы неравномерно. Ночь делилась на 12 равных ночных часов, день – на 12 равных дневных часов. Из-за того, что продолжительность дня и ночи зимой и летом разная, получалась разная продолжительность дневных и ночных часов. От этой системы неравномерных часов перешли к современной с равной продолжительностью всех часов только в XVII-XVIII веках, после изобретения и введения в обиход механических маятниковых часов, которые имеют равномерный ход.

Вспомним, что вращение Земли происходит против часовой стрелки, если смотреть на северный полюс, поэтому получается, что на более восточной долготе полдень (равно как и полночь) наступает раньше, чем на более западной. Всем известно, что в Японии и Китае день наступает раньше, чем у нас, а в Англии и Франции позже.

Получается, что на каждом меридиане своё истинное время. Раменское находится восточнее Жуковского, а Малаховка западнее, поэтому истинный полдень наступает в Раменском раньше, а в Малаховке позже, чем в Жуковском.

Запомним этот факт: истинный полдень и истинная полночь определяются движением Солнца, поэтому на каждом меридиане истинное время своё. Даже если два меридиана находятся на расстоянии одного шага, на них будет немного разное истинное время.

С развитием сети железных дорог и телеграфа, ради удобства единого расписания и счёта времени в разных городах, в конце XIX века была придумана система поясного времени. В России система часовых поясов была установлена в 1919 году. По этой системе вся Земля разбивается на часовые пояса с шагом в один час. Разбиение происходит не точно по меридианам, а с учётом границ стран и регионов.



Казалось бы, часовых поясов на Земле должно быть 24, но в реальности их больше, потому что некоторые страны, в том числе такие крупные, как Индия и Иран, установили для себя пояса с дробной разностью времени от Гринвича.

Мы живём в московском часовом поясе, который отличается от Гринвича на +3 часа. Знак плюс указывает на то, что у нас время больше, чем в Гринвиче. Например, когда у нас 16 часов, в Гринвиче ещё только 13 часов. Это логично, потому что мы находимся на более восточном меридиане.

Россия расположена в одиннадцати часовых поясах. На практике это означает, что как только Солнце садится на западе нашей страны в Калининграде, оно почти сразу же восходит на востоке на Чукотке. С учётом полярного дня, летом над Россией никогда не заходит Солнце.

Вблизи 180 градуса долготы проведена линия перемены дат. Отсчёт новых суток (новой даты) начинается с этой линии. Она тоже не проходит точно по 180 меридиану, а изгибается в соответствии с государственными границами. Полуостров Чукотка, несмотря на то что географически находится в западном полушарии, по системе часовых поясов относится к тому же часовому поясу, что и Камчатка. С разных сторон линии перемены дат имеет место не просто разное время, а и разные даты: к западу на один день больше, чем к востоку.

Каждому часовому поясу удобно сопоставить свой опорный меридиан. Для нулевого часового пояса логично, что опорный меридиан тоже нулевой, то есть гринвичский.

Так как окружность составляет 360° , а сутки 24 часа, то каждый опорный меридиан отстоит от соседнего опорного меридиана на $\frac{360^\circ}{24 \text{ часа}} = 15^\circ$.

Следовательно, опорный меридиан московского времени (гринвич +3 часа) отстоит от гринвичского на $3 \cdot 15^\circ = 45^\circ$, поэтому московское поясное время в точности равно истинному времени на меридиане 45° восточной долготы. Географически же Москва находится западнее, а именно, на 38° в.д., поэтому истинное время в Москве меньше поясного: когда на опорном меридиане московского времени 45° Солнце уже достигло кульминации, то есть наступил полдень, на географическом меридиане 38° в.д. полдень ещё не наступил.

На каждом меридиане разница между поясным и истинным временем является постоянной величиной.

Наши часы и телефоны показывают поясное время, а солнечные часы – истинное. Найдём разницу между поясным и истинным временем в Жуковском. Эта разница соответствует разнице опорного меридиана московского времени и географического меридиана Жуковского. $45^\circ - 38^\circ = 7^\circ$. Так как 15° соответствуют одному часу, то семь градусов соответствуют примерно получасу, (если точнее, то $\frac{7}{15} \approx 0,47$ часа, но округлим до 0,5 часа). Из-за того, что географический меридиан Жуковского находится западнее опорного, солнечные часы в Жуковском отстают от поясного времени, или, иначе говоря, у нас поясное время опережает истинное. Например, когда в Жуковском обычные часы показывают 15:30 московского времени, истинное время будет примерно 15:00 (вычитаем полчаса), а когда мы видим по солнечным часам время 10:00, то это означает, что московское поясное время 10:30 (добавляем полчаса).

Упражнение 6.

Гуляя по Сингапуру вы нашли в парке солнечные часы, которые показывают местное истинное время 16:30. Какое время в этот момент показывают ваши часы, идущие по московскому времени?

Чтобы ответить на этот вопрос, найдём на карте [карта мира физическая.jpg](#) Сингапур и определим его географическую долготу. Она составляет примерно 105° в.д. Долгота опорного меридиана московского времени 45° , значит Сингапур находится на $105^\circ - 45^\circ = 60^\circ$

восточнее опорного меридиана московского времени. Применяем соотношение $15^\circ = 1 \text{ час}$, получим $\frac{60^\circ}{15} = 4 \text{ часа}$. Москва находится западнее Сингапура, поэтому 4 часа нужно вычесть из местного истинного времени. Получаем ответ: $16:30 - 4 = 12:30$.

а) Решите такую же задачу, но теперь вы находитесь в Калькутте и местные солнечные часы показывают истинное время 14:00. Какое время показывают ваши часы, идущие по московскому времени?

б) та же задача, теперь город Каир, местное истинное время 10:30.

в) Вы попали на остров. Московское время на ваших часах 13:00, а солнечные часы показывают истинное время 17:20. В этом месте ночью Полярная звезда видна на высоте 20° над горизонтом. Определите ваши координаты, и по карте [карта мира физическая.jpg](#) какой это остров.

г) Группа туристов заблудилась где-то в Сибири и вышла к берегу большой реки. Руководитель группы измерением высоты Полярной звезды над горизонтом определил, что группа находится на широте 55° с.ш. Затем он сделал из подручных материалов солнечные часы и заметил, что когда солнечные часы показали истинное время 11:50, его наручные часы, идущие по московскому времени, показали 10:00.

На берегу какой реки оказались туристы? (Ишим? Иртыш? Обь? Енисей? Ангара? Лена?)

Солнечные часы.

Солнечные часы имеют очень давнюю историю, уходящую корнями по всей видимости, в неолит. Для нас солнечные часы представляют интерес как прибор, с помощью которого мы можем проследить движение Солнца.

Вопреки распространённому мнению о том, что солнечные часы служат для определения времени, на самом деле с их помощью решается не одна эта задача, а как минимум три:

1. По известным направлению на север и географической долготе места – определяем поясное время.
2. По известным направлению на север и поясному времени – определяем географическую долготу места наблюдения.
3. По известным долготе места и поясному времени – определяем направление на север.

Классическая конструкция солнечных часов содержит гно́мон (что значит «отбрасывающий тень») и размеченный циферблат. Гномон может представлять из себя стержень или треугольник, в последнем случае нас интересует только край тени, отбрасываемый соответствующей наклонной стороной треугольника.

Гномон в часах классической конструкции направлен на полюс мира, в северном полушарии это означает – на Полярную звезду. Поэтому гномон должен иметь угол наклона от горизонта, равный широте места наблюдения, а по азимуту ориентирован на север.

Наиболее простая конструкция циферблата у экваториальных часов - таких часов, у которых плоскость циферблата параллельна плоскости экватора. При этом получается, что циферблат перпендикулярен гномону.



Преимуществом экваториальных часов является то, что разметка циферблата выполняется простым разбиением окружности на 24 равных часа.

В механических часах циферблат разбит на 12 равных часов, но в них ведь часовая стрелка делает два оборота за сутки, а Солнце в солнечных часах совершает один оборот.

Экваториальные часы, однако, имеют и существенный недостаток. Вы помните, что лишь летом, точнее в период между днём весеннего равноденствия и днём осеннего равноденствия, Солнце в своём движении по эклиптике находится в северном полушарии, то есть выше плоскости небесного экватора, то есть выше плоскости циферблата. Поэтому только в эти шесть месяцев гномон может отбрасывать тень на циферблат, а в остальные шесть месяцев не может, потому что Солнце находится с задней стороны циферблата.

Когда мы смотрим на циферблат, наш взгляд направлен не на северный полюс мира, а в противоположную сторону. Фактически мы смотрим на юг, поэтому движение тени от гномона происходит не против, а по часовой стрелке. Именно это направление, как копирование хода тени от гномона в солнечных часах, было использовано при создании первых механических часов, и с тех пор оно закрепилось в конструкции часов всех типов.

В предстоящей практической работе мы будем пользоваться горизонтальными солнечными часами, то есть такими, у которых циферблат горизонтален.



Горизонтальные солнечные часы работают в любое время, когда видно Солнце, однако разметка их циферблата неравномерная, что немного усложняет конструкцию. Расчёт углов, под которыми нужно проводить часовые метки на горизонтальных солнечных часах, достаточно прост, но мы пока не будем его подробно разбирать, поскольку мы ещё не проходили тригонометрию.

Для интересующихся формула: $\text{tg}(u) = \text{tg}(t) \cdot \sin(\varphi)$, где u – угол, под которым нужно наносить метку на циферблат, t – время от 12 часов, выраженное в градусах, из расчёта $15^\circ = 1$ час, φ – широта места наблюдения.

Солнечные часы используются в ландшафтном дизайне и как элементы архитектуры. В качестве элемента дизайна по художественным и компоновочным соображениям чаще делают вертикальные солнечные часы.



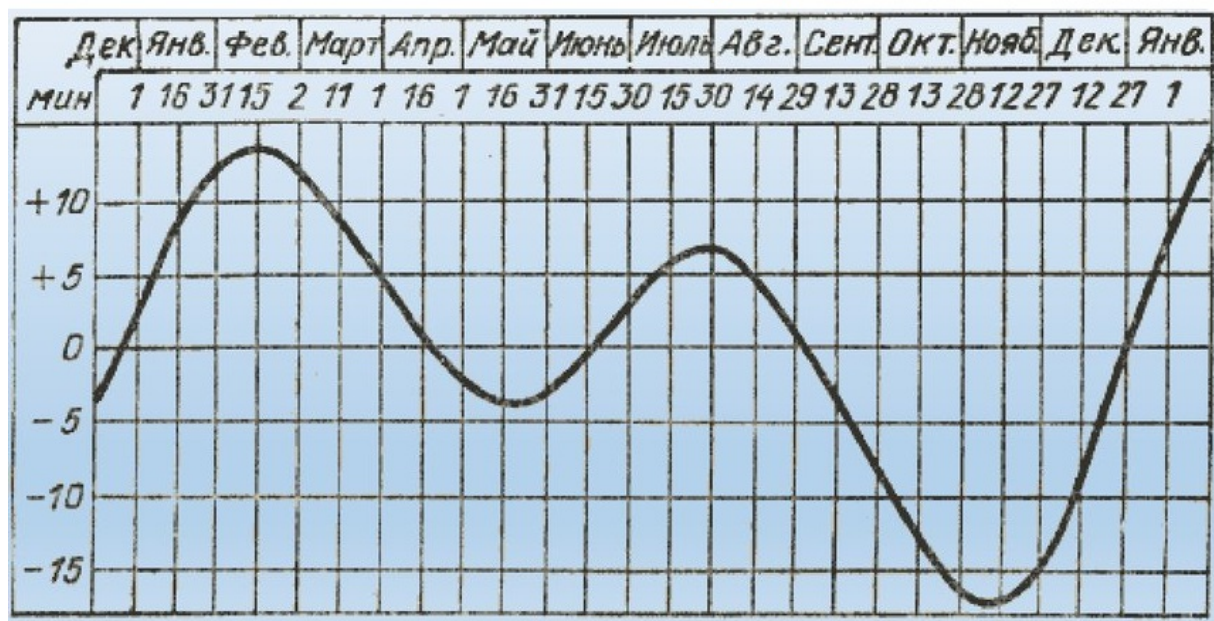
Полуденные часы – означает, что циферблат обращён на юг. Недостатком вертикальных солнечных часов является ограничение времени их работы: оно составляет 12 часов в сутки, а остальное время Солнце находится с обратной стороны циферблата. Полуденные часы работают с 6 до 18 часов, потом Солнце уходит за циферблат. Утренние часы ориентированы на восток, они работают с восхода Солнца до полудня. Вечерние часы, ориентированные на запад – с полудня до захода Солнца. Часы, ориентированные на север, могут работать в ранние утренние часы до 6 утра и в вечерние после 18 часов, они называются полуночными.

В любом случае гномон солнечных часов классической конструкции должен быть направлен на полюс мира.

Пока мы считаем движение Солнца по небесной сфере равномерным, этой точности для нас пока достаточно. На самом деле скорость движения Солнца по эклиптике не постоянная, что на первый взгляд может показаться вообще странным и даже нарушающим закон сохранения момента импульса. Этот эффект возникает сразу по двум причинам: во-первых, орбита Земли вокруг Солнца является не окружностью, а эллипсом (см. первый и второй законы Кеплера), а во-вторых, геометрическое влияние оказывает наклон земной оси. Для учёта неравномерности скорости движения Солнца вносят поправку, которая называется уравнением времени. Мы сейчас не будем его учитывать в практической работе, потому что максимальное значение уравнения времени имеет порядок 15 минут, а обычно в среднем составляет около 5 минут. Ожидаемая погрешность наших измерений больше, чем уравнение времени.

Поправка уравнения времени в данный день одинакова на всём Земном шаре в любом месте.

Уравнение времени. Такую поправку в минутах нужно добавить к показаниям солнечных часов в соответствующий день года



§ 7. Практическая работа с солнечными часами.

Практическое занятие выполняется в солнечную погоду, вне здания, вдали от металлических конструкций, чтобы минимизировать искажения магнитного поля.

Алгоритм действий сейчас должен быть вам полностью понятен.

Вспомним, что долгота Жуковского 38° в.д., что на 7° (то есть на $\frac{7}{15}$ часа $\approx$ полчаса) западнее опорного меридиана московского времени 45° , поэтому истинное местное солнечное время, показываемое солнечными часами, на полчаса меньше поясного, поэтому к показаниям солнечных часов следует прибавить полчаса.

Вспомним, что магнитное склонение в Жуковском составляет 12° к востоку. Можем округлить его до 10° .

Определите цену деления шкалы солнечных часов ($\frac{1}{4}$ часа = 15 минут).

Задача 1. По известным направлению на север и долготе места определить поясное время.

1. Установите солнечные часы горизонтально.
2. Используя магнитный компас ориентируйте солнечные часы на магнитный север.
3. Поверните солнечные часы на запад (то есть против часовой стрелки) на $10-12^\circ$, чтобы учесть магнитное склонение.
4. Считайте показания солнечных часов.
5. Добавьте к ним полчаса.
6. Сравните полученное значение с показаниями ваших часов.

Задача 2. По известным направлению на север и поясному времени определить географическую долготу места наблюдения.

1. Установите солнечные часы горизонтально.
2. Используя магнитный компас ориентируйте солнечные часы на магнитный север.
3. Поверните солнечные часы на запад (то есть против часовой стрелки) на $10-12^\circ$, чтобы учесть магнитное склонение.
4. Считайте показания солнечных часов.
5. Посмотрите текущее время по своим часам.
6. Посчитайте разницу между показаниями солнечных и обычных часов, выразите это число в часах.
7. Переведите полученную разницу времени в градусы долготы из расчёта $15^\circ = 1$ час.

8. Вычтите полученные градусы из долготы опорного меридиана московского времени 45° в.д.
9. Сравните полученное значение с долготой Жуковского (38° в.д.).

Задача 3. По известной долготы места и поясному времени определить направление на север.

1. Используем ранее посчитанную разницу времени между показаниями солнечных и обычных часов: это полчаса.
2. Посмотрите время по вашим часам, это московское время. Вычтите из него полчаса и получите истинное время места наблюдения.
3. Установите солнечные часы горизонтально.
4. Вращайте солнечные часы так, чтобы они стали показывать вычисленное в п.2 истинное время. Теперь гномон указывает на географический (истинный) север.
5. Проверьте найденное направление магнитным компасом. Стрелка магнитного компаса должна указывать примерно на $10-12^{\circ}$ восточнее, чем найденное солнечными часами направление на истинный север.

§ 8. Астролябия.

Примерно в IV - III веке до нашей эры древними греками были исследованы геометрические свойства стереографической проекции. Первым исследователем этого вопроса был, насколько нам известно, либо Евдокс, либо Аполлоний. Подробно геометрические свойства этой проекции описаны уже знакомым нам Клавдием Птолемеем в сочинении «Планисферий» во II веке нашей эры.

Астролябия, замечательное изобретение Древнего Мира, основанное на стереографической проекции небесной сферы на плоскость экватора с центром проекции в южном полюсе Земли, явилась первым компьютером, созданным нашей цивилизацией. Компьютеры, как вы знаете, бывают не только электронными, но и основанными на других принципах. Астролябия была механическим специализированным компьютером, предназначенным конкретно для астрономических вычислений.

После падения Рима, когда в Европе наступили Тёмные века, искусство рассчитывать и изготавливать астролябии было подхвачено и развито арабами, затем спустя века, в эпоху Возрождения астролябии вернулись в Европу. Астролябия оставались абсолютно необходимым прибором для моряков,

паломников, караванщиков, астрономов и других людей, нуждавшихся в навигации и определении времени, вплоть до XVIII века. Ещё Пётр I использовал астролябию для навигации. Астролябии вышли из употребления после изобретения более точных приборов - секстанта и маятниковых часов.

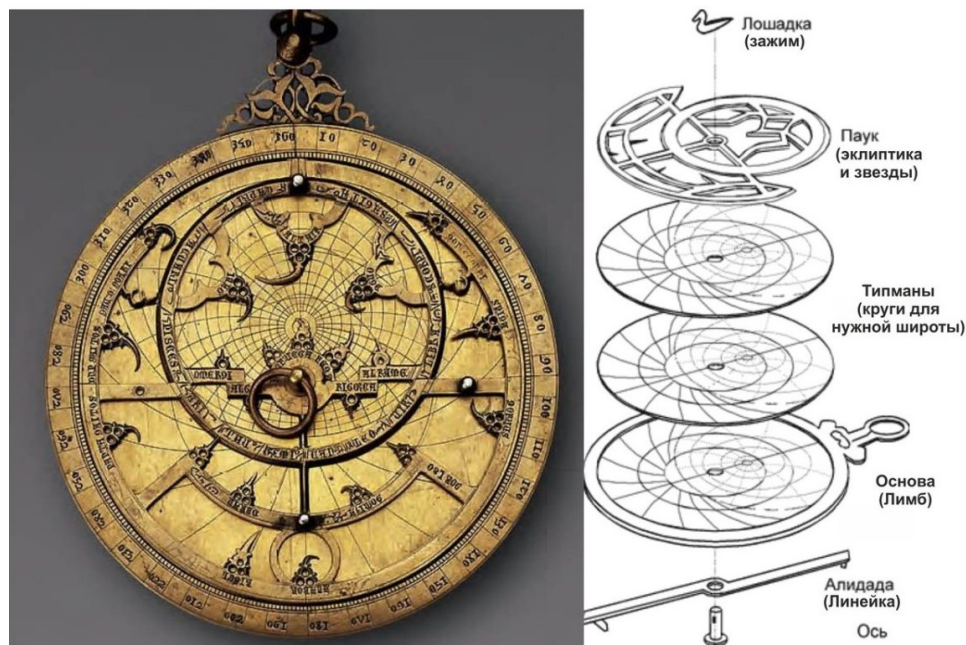
Имя изобретателя астролябии нам неизвестно, но считается, что ставшую классической конструкцию разработал Теон Александрийский в IV веке нашей эры.

Мы будем работать с астролябией классической конструкции. Обычно астролябии изготавливались из бронзы, с высокой точностью, являлись одновременно и приборами, и предметами искусства. Наша сделана из картона, и не столь точна, но тем не менее она решает все основные задачи, которые решались её древними предшественницами.



Нам пока ещё не по силам разобраться в проективной геометрии, лежащей в основе работы астролябии, поэтому этот параграф мы изучим только как пользователи древней магии.

Конечно, сейчас астрономические расчёты выполняются с высокой точностью специально разработанными для этого компьютерными программами, но покрутив астрольбию своими руками вы сможете наглядно увидеть движение звёзд и Солнца, их взаимосвязь с календарём и временем.



Астрольбия состоит из трёх основных деталей: основа, паук и алидада.

Основа имеет сверху кольцо, удерживая за которое мы обеспечиваем вертикальное положение астрольбии при измерении высоты светила. В основу обычно вкладывалось несколько сменных тимпанов – дисков, размеченных азимутами и альмукантаратами (кругами равной высоты). Для каждой широты был свой тимпан, поэтому путешественник, переходя на другую широту должен был пересобрать основу, установив сверху тимпан нужной широты. У нас нет сменных тимпанов, а единственный, для широты Жуковского, вклеен в основу.

Паук (также иногда называемый ретё) представляет из себя карту звёздного неба. На нём острыми уголками отмечены звёзды, каждая звезда подписана. На нашем пауке отмечено 13 звёзд, и есть ещё одна неподписанная, в самом центре, это Полярная звезда, вокруг которой вращается небо.

Также на пауке имеется круг эклиптики с календарной разметкой. Мы помним, что Солнце в течение года проходит среди звёзд путь, называемый эклиптической. По разметке эклиптики мы можем определить где Солнце находится в данный день среди звёзд.

Алидада предназначена, во-первых, для определения высоты светила, и во-вторых, служит линейкой при последующем вычислении.

Рассмотрим последовательность решения задачи определения времени по Солнцу. Астролябия не знает долготы Жуковского, поэтому может дать только истинное время, а мы потом добавим к нему полчаса.

1. Удерживая астролябию подвешенной за кольцо и вращая алидаду, определяем высоту Солнца.

Техника безопасности: при наблюдении Солнца мы не смотрим через диоптрии, а смотрим только на тень, отбрасываемую диоптриями.

2. Находим на эклиптике сегодняшнюю дату – это сегодняшнее положение Солнца на небесной сфере. Запоминаем это положение условной меткой.
3. Вращаем паук так, чтобы установить метку Солнца на нужный альмукантарат, то есть нужно вращением паука поставить метку Солнца на астролябии в такое положение, которое соответствует текущей высоте Солнца на небе.

Таких положений имеется два: до полудня и после полудня. Нам нужно немного ориентироваться во времени и из двух вариантов выбрать правильный. Либо, второй способ: посмотреть на метки азимута на основе, и тоже выбрать правильный вариант.

Как только вы поставили паук в нужное положение, вы синхронизировали астролябию с текущим положением небесной сферы.

4. Вращая алидаду как линейку, ставим её на метку Солнца на эклиптике.
5. По наружной шкале основы считываем текущее истинное время. Плюс полчаса, и мы получаем московское поясное время.

Теперь решим задачу определения времени по звёздам. Для начала нужно выбрать из числа имеющихся на пауке, звезду, по которой будем производить измерение.

1. Измеряем астролябией высоту звезды. Звезду наблюдаем непосредственно через диоптры.
2. Вращаем паук так, чтобы эта звезда встала на нужный альмукантарат, то есть на нужную высоту. Опять-таки, таких положений имеется два, нужно выбрать правильный вариант. Если сомневаетесь, то можно измерить высоту двух звёзд, это даст однозначное положение паука. Либо сориентируйтесь по азимуту.
3. Вращаем алидаду как линейку, и ставим её на метку Солнца на сегодняшнюю дату. (Не на звезду! Мы ведь живём по солнечному времени, а не по звёздному!)
4. По наружной шкале основы считываем текущее истинное время.

Астролябия позволяет решать любую задачу следующего типа: если из трёх данных: время, дата, положение светила вам известны любые два, то вы находите третье, которое неизвестно. А также с помощью астролябии можно находить, например, такие параметры, как высоту кульминации конкретного светила, азимут восхода и захода.

Общий алгоритм решения любой задачи с помощью астролябии состоит из двух шагов:

1. Сначала по известным данным нужно синхронизировать астролябию с небесной сферой, то есть установить паук в необходимое положение.
2. Считать искомое неизвестное значение.

Не забываем, что астролябия работает по истинному времени, поэтому там, где нужно, учитываем разницу истинного времени с поясным.

Выполните с помощью астролябии следующие упражнения. Будем сравнивать ответы с расчётом по астрономической программе [Stellarium](#).

Упражнение 8.1, по звёздам.

В этом упражнении считаем, что мы находимся в Жуковском, время приведено московское. Не забываем, что астролябия даёт истинное время, поэтому учитывайте полчаса разницы.

- а) Найдите высоту и азимут звезды Ригель 20 декабря в 3:00.
- б) 10 сентября Вега имеет высоту 33° и азимут 292° . Определите время.
- в) 10 января Сириус находится на высоте 15° в восточной части неба. Определите время и азимут на Сириус.
- г) На какой высоте кульминирует Прокцион? В какое время это происходит 1 января?
- д) На каком азимуте восходит Альтаир? В какое время это происходит 15 мая?
- е) Регул находится на высоте 30° в западной части неба, время на часах 3:30. Определите дату наблюдения и азимут на Регул.
- ж) 10 августа Капелла и Арктур находятся на одинаковой высоте. Определите их высоту, время, азимут на Капеллу и азимут на Арктур.
- з) 20 марта Денеб находится в восточной части неба на высоте 45° . Определите время и азимут на Денеб.

Упражнение 8.2, по Солнцу.

- а) В какое время и на каком азимуте восходит Солнце 1 июня?
- б) На какой высоте Солнце находится в 12:30 15 апреля?
- в) Солнце заходит на азимуте 285° . Определите дату и время.
- г) В какие даты осенью и весной Солнце кульминирует на высоте 30° ?
- д) 1 мая Солнце находится на азимуте 225° . Определите высоту Солнца и время.
- е) 10 марта утром Солнце находится на высоте 15° . Определите время и азимут на Солнце.
- ж) В какое время и на каком азимуте садится Солнце 1 ноября?
- з) Найдите в какой день кульминация Солнца происходит на наибольшей высоте, и определите эту высоту. Сравните результат с формулой упр.5.

Ответы и решения:

- 1.1. а) оз.Байкал, б) о.Шри-Ланка, в) о.Тасмания, г) о.Огненная Земля.
- 1.2. б) Вега (α Лиры), в) Сириус (α Большого Пса), г) Арктур (α Волопаса), д) Альтаир (α Орла).
- 1.3. а) Фотография сделана вблизи экватора. По траекториям звёзд можно понять, что один из полюсов мира находится низко над горизонтом, а другой немного под горизонтом. Фотоаппарат направлен на запад или на восток. Использован широкоугольный объектив.
б) Наблюдатель находится на северном полюсе, потому что вращение неба для него происходит против часовой стрелки.
в) Северный полюс на схеме находится справа, потому что при виде на него вращение неба наблюдается против часовой стрелки. Южный полюс находится слева, потому что при виде на него вращение неба наблюдается по часовой стрелке.
г) наблюдатель находится в южном полушарии, потому что вращение неба вокруг видимого ему полюса мира происходит по часовой стрелке.
2. а) Альтаир на западе, Процион на востоке;
б) около 21 час;
в) 10-20 августа;
г) незаходящие: Вега, Капелла, Денéб, Дúбхе.
5. а) формулы:
Для дней равноденствия $h = 90^\circ - \varphi$
Для дня зимнего солнцестояния $h = 90^\circ - \varphi - 23,5^\circ$
Для дня летнего солнцестояния $h = 90^\circ - \varphi + 23,5^\circ$
б) в Жуковском: в дни равноденствия $h = 34,4^\circ$,
в день зимнего солнцестояния $h = 10,9^\circ$,
в день летнего солнцестояния $h = 57,9^\circ$

6. а) примерно 11:00 (долгота Калькутты 90° в.д.);

б) примерно 11:30 (долгота Каира около 31° в.д.).

в) истинное время больше московского, значит вы находитесь восточнее опорного меридиана московского времени 45° в.д. Разница между истинным и московским временем составляет $17:20 - 13:00 = 4$ часа 20 минут, или $4\frac{1}{3} = \frac{13}{3}$ часа. Пользуясь соотношением $1 \text{ час} = 15^\circ$ узнаём, что наша долгота на $\frac{13}{3} \cdot 15 = 65^\circ$ восточнее опорного меридиана московского времени. Следовательно, ваша долгота равна $45^\circ + 65^\circ = 110^\circ$ в.д. Высота Полярной звезды равна географической широте места наблюдения, следовательно ваша широта 20° с.ш. По карте определим, что это остров Хайнань.

г) измерением времени руководитель группы нашёл, что они находятся на $11:50 - 10:00 = 1$ час 50 минут $= 1\frac{50}{60} = 1,83$ часа восточнее опорного меридиана московского времени 45° . Так как 15° долготы $= 1$ час, то их долгота равна $45^\circ + 1,83 \cdot 15^\circ = 72,45^\circ$ в.д. $\approx 73^\circ$ в.д. По карте точка с координатами 55° с.ш., 73° в.д. соответствует берегу крупной реки Иртыш.