

И. С. Пандул

ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

применительно к решению
инженерно-геодезических
задач



ПОЛИТЕХНИКА

Электронный аналог печатного издания: Пандул И. С. Геодезическая астрономия применительно к решению инженерно-геодезических задач. — СПб.: Политехника, 2010. — 324 с.: ил.

УДК 528.288
ББК 26.11
П16



ПОЛИТЕХНИКА
ИЗДАТЕЛЬСТВО
Санкт-Петербург 2011

www.polytechnics.ru

Пандул И. С.
П16 Геодезическая астрономия применительно к решению инженерно-геодезических задач / И. С. Пандул. — СПб.: Политехника, 2011. — 324 с.: ил.
ISBN 978-5-7325-0982-3

В предлагаемой книге кратко, общедоступно и вместе с тем строго научно рассмотрены основы сферической тригонометрии, системы небесных координат, вопросы измерения времени и факторы, изменяющие координаты светил. Изложены методы и способы определения широт, долгот и азимутов. Приведены подробные примеры вычислений. Многолетний опыт преподавания курса геодезической астрономии показал, что методика изложения материала в книге себя оправдала.

Книга рассчитана на специалистов геодезического профиля, географов и геологов, а также студентов и аспирантов специальности «Прикладная геодезия». Она будет полезна всем, кому по роду своей деятельности приходится заниматься вопросами геодезической астрономии.

УДК 528.288
ББК 26.11

ISBN 978-5-7325-0982-3

© Издательство «Политехника», 2011

ПРЕДМЕТ АСТРОНОМИИ И ПОРЯДОК ИЗУЧЕНИЯ ЗВЕЗДНОГО НЕБА

1.1. АСТРОНОМИЯ И ЕЕ СВЯЗЬ С ГЕОДЕЗИЕЙ

Астрономия — наука о происхождении, развитии, физическом строении и взаимном расположении небесных тел. Это одна из самых древних наук.

На заре развития человеческого общества, примерно 25 тысячелетий назад, в эпоху палеолита, зародились первые ростки астрономии, тесно связанной с повседневной жизнью человека. Еще раньше люди заметили, что от восхода и захода Солнца зависит смена дня и ночи, а смена времен года сопровождается различным расположением звезд на небосводе. Кочевые племена занимались охотой и бортничеством. Охота зависела от сезонных миграций животных, поэтому насущной потребностью была способность ориентирования¹ на местности и во времени по Солнцу, Луне и звездам. Примерно 12 тыс. лет назад наши предки перестали довольствоваться плодами собирательства и охоты и начали переходить к скотоводству и земледелию. Человек ощутил необходимость определения сроков посева и жатвы, измерения длительных промежутков времени. Так возникла потребность в календаре. Звездное небо и видимые небесные явления стали служить первыми ориентирами и эталонами времени. Для изучения взаимного расположения звезд и движения Солнца, Луны и планет люди стали производить астрономические наблюдения.

Яркие звезды на небе всегда привлекали к себе взгляды и сердца людей. Некогда люди считали небо хрустальной сферой. Сформулируем понятие слова «небо» с точки зрения астронома-наблюдателя.

Небо — часть космического пространства, видимая сквозь атмосферу Земли. Ночное небо представляется нам в виде свода, усеянного звездами. Сводчатость неба объясняется психофизиологическим свойством глаза — относить на одно и то же расстояние все предметы (в данном случае звезды), которые лежат за пределами глазомерной оценки.

¹ Термин «ориентирование» (от лат. oriens — восток) связан с расположением стран света. С первобытных времен восток был почитаемой стороной: с востока появлялось Солнце — источник жизни на Земле.

Уже 5 тыс. лет назад древние астрономы обладали довольно большой суммой знаний, используемых во время длительных путешествий по суше и плаваний по морям. Эти знания и опыт легли в основу *геодезической астрономии*. В итоге многовекового развития и особенно достижений нашего времени современная астрономия превратилась в широко разветвленную науку, одним из разделов которой является геодезическая астрономия.

Геодезическая астрономия занимается вопросами астрономической ориентации на земле: определением географических координат точек земной поверхности и азимутов направлений, изучением приборов, с помощью которых выполняются эти определения, а также разработкой рациональных методов наблюдений светил и математической обработки полученных результатов.

Геодезическая астрономия тесно смыкается с высшей геодезией и преследует следующие основные цели:

1) установление исходных геодезических данных (φ , λ и A начального направления в некотором пункте, принимаемом за исходный);

2) определение формы и размеров Земли;

3) контроль угловых измерений в триангуляции и полигонометрии с помощью азимутов Лапласа $A_r = A + (L - \lambda) \sin \varphi$, которые практически не зависят от геодезических измерений;

4) создание обоснования для мелкомасштабных съемок (масштаба 1 : 1 000 000 и мельче) в неисследованных районах и т. д.

Теория астрономических методов наблюдений базируется на положениях и закономерностях сферической астрономии.

Сферическая астрономия изучает математические методы решения задач, связанных со взаимным расположением светил; она устанавливает системы небесных координат, а также решает вопросы измерения времени, которое само по себе тоже является координатой.

Курс геодезической астрономии состоит из двух основных разделов: 1) сферической астрономии; 2) полевой астрономии, главной задачей которой является определение географических координат точек земной поверхности и азимутов определенных направлений.

Задачами курса являются следующие:

1) научить студента, будущего инженера-геодезиста, самостоятельному производству астрономических наблюдений по определению широт, долгот, азимутов направлений и времени с точностью, необходимой при выполнении инженерных изысканий;

2) дать в этой области достаточную ориентировку, чтобы будущие инженеры-геодезисты могли найти общий язык с астрономами-геодезистами и при необходимости могли выдать заказ на производство первоклассных астрономических работ, а иногда и самостоятельно выполнить такие работы после небольшой дополнительной подготовки;

3) подготовить студентов к изучению курсов картографии и космической геодезии.

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ СВЕТИЛ

Все наблюдаемые светила подразделяют на два вида.

Светила 1-го вида — тела нашей Солнечной системы и искусственные спутники Земли (ИСЗ). Светила 2-го вида — звезды (*звезды — самосветящиеся небесные тела, видимые вследствие огромной отдаленности как светящиеся точки*). В свою очередь, среди светил 2-го вида различают визуальные (или геодезические) и телескопические. Телескопические звезды можно наблюдать только с помощью телескопов. Нас интересуют геодезические звезды, которые можно наблюдать визуально или с помощью простейших зрительных труб — теодолитов.

Все эти звезды относятся к единой сложной звездной системе — Галактике, имеющей форму гигантской двояковыпуклой линзы диаметром более 100 тыс. световых лет¹ и наибольшей толщиной около 10 тыс. световых лет. В плане она имеет вид спирали. Млечный Путь — ее экваториальная область, наиболее богатая звездами. Название «Галактика» в переводе с греческого означает млечный, молочный.

Звезды в Галактике распределены неравномерно, многие из них образуют звездные скопления. В центре Галактики в одном и том же объеме пространства их в миллион раз больше, чем в районе расположения Солнца. Ядро Галактики является динамическим центром системы и наблюдается на небе как большое яркое скопление звезд Млечного Пути в созвездии Стрельца. Вокруг этого центра обращаются все звезды Галактики, в том числе и Солнце.

Солнечная система расположена вблизи экваториальной плоскости Галактики, ближе к ее окраине, примерно на расстоянии 30 тыс. световых лет от центрального скопления.

¹ Световой год — расстояние, которое свет проходит за один год; составляет 9,46 трлн км ($9,46 \cdot 10^{12}$ км), что примерно в 63,24 тыс. раз превосходит среднее расстояние от Земли до Солнца (146,6 млн км).

Сама Галактика тоже движется во Вселенной¹, где кроме нее существует бесчисленное множество звездных систем (других галактик). Возраст Галактики — 12–14 млрд лет, масса — $2 \cdot 10^{44}$ г, что соответствует 1011 масс Солнца. По статистическим данным, в Галактике около 250 млрд звезд, но лишь меньше 1 % этого количества доступно наблюдателям в современные телескопы. Визуально же над горизонтом одновременно можно увидеть всего около 2 тыс. наиболее ярких звезд.

Еще в глубокой древности люди заметили, что звезды не меняют своего положения относительно друг друга. Конечно, такой покой и постоянство звездного неба только кажущиеся. Все в мировом пространстве находится в движении. С разными истинными скоростями движутся звезды в разные стороны, одновременно обращаясь вокруг центра Галактики. Аналогично в рое мошкары каждая мошка движется в произвольном направлении, а сам рой перемещается поступательно, уносимый ветром. Движения звезд, складываясь, должны изменять картину звездного неба. Но звезды находятся на таком огромном расстоянии от нас, что видимые изменения происходят в промежутки времени, исчисляемые десятками тысячелетий, и для ряда поколений землян незаметны.

Для удобства ориентирования люди выделили на небе характерные группы звезд, так называемые созвездия. Светила, входящие в созвездия, объединены искусственно, как они проецируются на небосводе в данном направлении. Это видимые группировки звезд, на самом деле далеких друг от друга. Лучевые расстояния между ними очень большие и всегда различные. Созвездия занимают определенные участки неба и носят названия по воображаемому сходству с фигурами людей, предметов, животных или воображаемых существ. В 1928 г. по решению Международного астрономического союза (МАС) границы созвездий установлены по дугам небесных меридианов и параллелей. Всего на небе 88 созвездий; с территории России видно 51 созвездие, но часть из них состоит из слабых звезд и только около 30 созвездий выделяются своими контурами.

Внутри созвездий отдельные звезды обозначают буквами греческого алфавита. Первыми буквами алфавита обозначают наиболее яркие звезды (в порядке убывания яркости,

¹ Вселенная — весь мир, бесконечный во времени и пространстве, безгранично разнообразный по тем формам, которые принимает материя в процессе своего развития.

хотя из этого правила есть исключения). Наиболее примечательные звезды имеют еще и собственные имена. Например, α Малой Медведицы — Полярная; α Большой Медведицы — Дубхе; ζ Большой Медведицы — Мицар; α Волопаса — Арктур и т. д. Собственные имена имеют немногим более 230 звезд. Знание главных созвездий необходимо для ориентирования по звездам. Астрономы и геодезисты должны их знать для того, чтобы иметь возможность производить наблюдения. Полезно знать расположения 20–25 созвездий и выделять среди них 30–40 ярких звезд.

Характеристикой видимой яркости или блеска звезд служит *видимая звездная величина*, которая определяется видимым блеском звезды, т. е. освещенностью, создаваемой на поверхности Земли. К истинным размерам звезд звездная величина отношения не имеет. Во II веке до н. э. греческий астроном Гиппарх разделил звезды на группы (величины), отнеся к 1-й самые яркие, а к 6-й — наиболее слабые, визуально видимые звезды. Таким образом, чем меньше яркость звезды, тем больше ее звездная величина m (m — первая буква слова «magnitudo» — величина).

Гиппарх разделил звезды по их блеску, так чтобы звезды 1^m казались настолько ярче звезд 2^m , настолько те кажутся ярче звезд 3^m и т. д. Это деление сохранилось до наших дней и является одной из важных характеристик звезд. Оно основано на свойстве человеческого глаза воспринимать геометрические отношения яркости как арифметические. Это свойство не только зрения, но и других наших органов чувств. Установлено, что отношение блеска двух звезд при одной и той же разности звездных величин постоянно (закон Вебера—Фехнера), а сами звездные величины изменяются как логарифмы их блеска. Блеск звезд 6^m в 100 раз слабее блеска звезд 1^m , а при различии в одну звездную величину отношение блеска составляет 2,5119, логарифм которого равен 0,4. Это значит, что звезда 1^m в 2,5 раза ярче звезды 2^m , а та, в свою очередь, в 2,5 раза ярче звезды 3^m и т. д. Звезды в 2,5 раза более яркие, чем звезды 1^m , имеют нулевую (0^m) звездную величину.

Для звезд промежуточного блеска применяют дробные величины. Например, звезда Полярная (α Малой Медведицы) имеет звездную величину $+2,12^m$; Вега (α Лиры) — $+0,14^m$. Еще более яркие светила имеют отрицательные значения звездной величины. Самая яркая звезда Сириус (α Большого Пса) $-1,58^m$; Луна в полнолуние $-12,71^m$; Солнце в зените $-26,58^m$. Это блеск 88 млн звезд первой вели-

чины. Для сравнения укажем, что $+6^m$ соответствует яркости света стандартной свечи, помещенной на расстоянии почти 11 км, что находится на пороге человеческого зрения. Телескопические звезды — звезды $+7^m$ и слабее. Современный телескоп, установленный около станции Зеленчукской Ставропольского края, позволяет фотографировать звезды до $+28^m$, которые в 100 млрд раз слабее звезд 1^m ! Их блеск соответствует свету стандартной свечи, удаленной на 274 тыс. км.

1.3. ЗВЕЗДНОЕ НЕБО. ПОРЯДОК ИЗУЧЕНИЯ СОЗВЕЗДИЙ И ОТЫСКАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЯРКИХ ЗВЕЗД

Из всех картин, развертывающихся перед нашими глазами, самая величественная — картина звездного неба, доступная наблюдению в любой точке Земли. Один древний

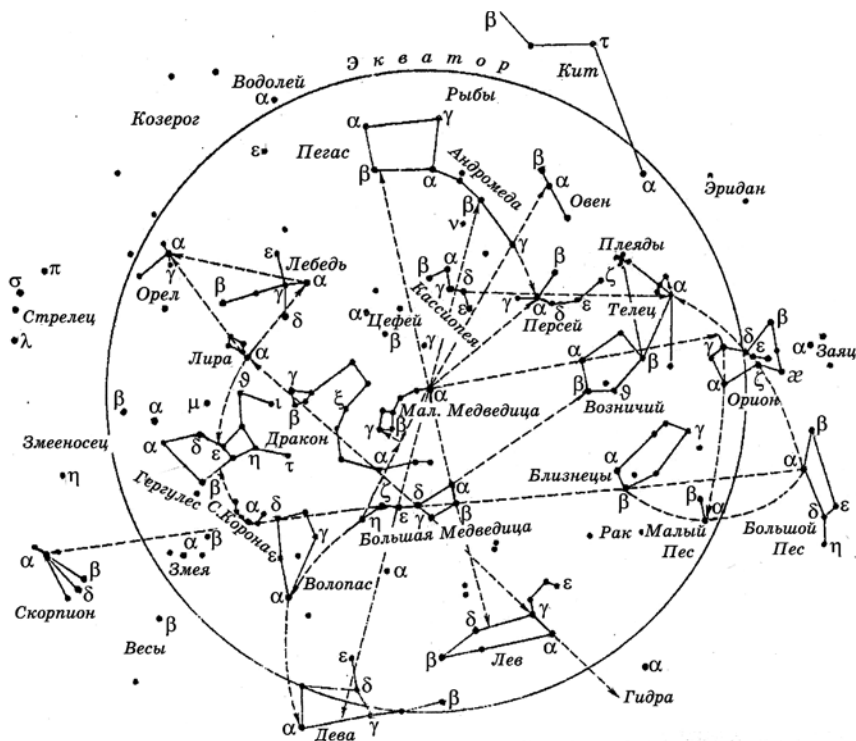


Рис. 1. Карта звездного неба Северного полушария

мудрец говорил, что если бы звезды были видны только из одного какого-то участка Земли, то люди бы шли из далеких стран, чтобы полюбоваться, — столь красивое зрелище представляют они.

Видимая картина звездного неба в разное время суток и в различные дни года неодинакова. Некоторые созвездия не заходят за горизонт и видны каждую безоблачную ночь. Это близполюсные созвездия. Другие восходят над горизонтом, постепенно поднимаются, достигая наибольшей высоты на юге, а потом опускаются и заходят за горизонт. Рассмотрим последовательно главнейшие из этих созвездий, видимые в южной части неба около полуночи весной, летом, осенью и зимой (рис. 1). Для этого воспользуемся методом прямых линий, суть которого будет ясна из нижеследующего.

1.3.1. БЛИЗПОЛЮСНЫЕ СОЗВЕЗДИЯ

1. Большая Медведица. Семь ярких звезд этого созвездия образуют характерную фигуру ковша и хорошо известны всем. Каждая из этих звезд имеет свое имя: α — Дубхе, β — Мерак, γ — Фекда, δ — Мегрец, ϵ — Алиот, ζ — Мицар, η — Бенетнаш. Кроме этих звезд в созвездие входят и другие, менее яркие, звезды. Среди ярких звезд Большой Медведицы обращает на себя внимание звезда зеленоватого цвета — Мицар ($2,17^m$). Весной по вечерам Большая Медведица расположена высоко, вблизи зенита, и ручка ковша направлена к востоку.

2. Малая Медведица. Если мысленно соединить звезды β и α Большой Медведицы прямой линией и продолжить ее, то, отложив на ней расстояние, в 5 раз превышающее расстояние между этими звездами, мы встретим звезду желтоватого цвета — Полярную (α Малой Медведицы, $2,12^m$). Кстати, расстояние между β и α Большой Медведицы составляет $5,3^\circ$. Это число полезно запомнить. Полярная расположена менее чем в 1° от Северного полюса мира. Если соединить прямой линией звезды Бенетнаш (η Большой Медведицы, $1,91^m$) и Полярную, то примерно посередине этой линии, слева, увидим две сравнительно яркие звезды Малой Медведицы: β — Кохаб ($2,24^m$) и γ — Феркад ($3,14^m$). Семь звезд Малой Медведицы тоже напоминают ковш, только повернутый в обратную сторону относительно ковша Большой Медведицы.

3. Кассиопея. Если провести прямую линию через звезды Алиот (ϵ Большой Медведицы, $1,68^m$) и Полярную и продолжить ее примерно на такое же расстояние, то встретим созвездие Кассиопеи, пять звезд которой образуют характерные очертания буквы W, растянутой в длину по Млечному Пути. Наиболее яркие звезды этого созвездия: α — Шедар ($2,47^m$); β — Шаф ($2,42^m$); δ — Рукба ($2,80^m$).

4. Дракон. Между созвездиями Большой и Малой Медведиц длинной лентой причудливо извивается созвездие Дракона, голова которого находится недалеко от Веги (α созвездия Лиры).

1.3.2. ВЕСЕННИЕ СОЗВЕЗДИЯ

5. Лев. Отложив вниз по прямой, соединяющей α и β Большой Медведицы, 7 раз расстояние между этими звездами, найдем созвездие Льва, яркие звезды которого образуют фигуру, несколько напоминающую удлинненную трапецию. Наибольший блеск имеет голубовато-белая звезда α , находящаяся в правом нижнем углу трапеции, в передней лапе Льва, — Регул ($1,34^m$) — «звезда царей». Она расположена почти на прямой линии, соединяющей δ и γ Большой Медведицы. Регул отстоит от Фекды (γ Большой Медведицы, $2,54^m$) на расстоянии, в 1,5 раза большем, чем расстояние от нее до Полярной звезды. Более слабые звезды над Регулом и звездой γ образуют гриву Льва. Вторая яркая звезда β созвездия Льва — Денебола ($2,23^m$) — по-арабски «звезда в хвосте льва». Она расположена в левом нижнем углу упомянутой трапеции. Обе звезды хорошо видны зимой и весной.

6. Гидра. По линии δ — γ Большой Медведицы, продолженной через Регул на расстояние, равное примерно половине отстояния Регула от Фекды, находится растянутое длинной полосой созвездие Гидры. Его единственная яркая звезда α — Альфард ($2,16^m$). По-арабски «альфарад» и означает «единственный».

7. Волопас. На дугообразном продолжении ручки ковша Большой Медведицы находится блестящая светло-оранжевая звезда α созвездия Волопаса — Арктур ($0,24^m$). По-гречески «арктур» — «охотник за медведями». Из всех звезд северного неба она раньше всех становится видимой после заката Солнца. Остальные яркие звезды этого созвездия образуют очень заметный ромб неправильной формы. Арктур виден весной и летом всю ночь. Осенью он появляется

вечером в западной части неба и очень скоро уходит за горизонт, а утром снова восходит в восточной половине неба. Зимой Арктур прекрасно виден во второй половине ночи.

8. Северная Корона. Рядом с созвездием Волопаса видны семь звезд созвездия Северной Короны. Они имеют характерную форму венца, обращенного концами к северу. В середине венца находится наиболее яркая звезда α — Гёмма ($2,31^m$), что в переводе с древнегреческого значит «жемчужина».

9. Дева. Продолжив по дуге направление от Бенетнаша за Арктур примерно на такое же расстояние, встретим яркую звезду голубоватого цвета Спика ($1,25^m$) — α созвездия Девы («спика» в переводе с латинского — «колос»). Созвездие Девы можно также найти, если продолжить направление от Полярной через Алиот на расстояние, в 2 раза превышающее расстояние между этими звездами. Спика — весенняя звезда, но она хорошо видна и зимой после полуночи.

1.3.3. ЛЕТНИЕ СОЗВЕЗДИЯ

10. Скорпион. Если провести прямую линию через Мицар и Гемму и продолжить ее за Северную Корону на расстояние, примерно в 2 раза большее, чем расстояние от Мицара до Геммы, мы найдем красновато-оранжевую яркую звезду Антарес ($1,22^m$) — α созвездия Скорпиона. Антарес (соперник Марса — греч.) хорошо виден в юго-западной части горизонта весной после полуночи и летом до полуночи. Особенно хорошо видна эта звезда в южных частях России.

11. Лира. Если мысленно соединить γ и δ Большой Медведицы и продолжить эту прямую линию от Фекды на расстояние, примерно в 2 раза большее, чем расстояние от нее до Полярной, то можно найти очень яркую голубовато-белую звезду Вега ($0,14^m$) — α созвездия Лиры. Рядом с Вегой четыре слабые звезды образуют характерный маленький параллелограмм. Для широт более 52°N Вега — незаходящая звезда.

12. Орел. За созвездием Лиры, далее по линии γ — δ Большой Медведицы, при пересечении ее с белесоватой полосой Млечного Пути, расположено созвездие Орла, напоминающее фигуру птицы в парении. α созвездия Орла — желтовато-белая звезда Альтаир ($0,81^m$). По-арабски «ал-таир» озна-

чает «летающий». Альтаир — звезда летнего неба, но она видна также весной во второй половине ночи, осенью до полуночи и зимой (в первой половине зимы сразу же после наступления темноты, во второй половине — перед рассветом).

13. Лебедь. Рядом с двумя предыдущими созвездиями вдоль Млечного Пути вытянулась крестообразная фигура созвездия Лебеда, напоминающая распростершую крылья летящую птицу. В вершине креста находится голубоватая звезда Денеб ($1,33^m$) — α созвездия Лебеда. Для широт более 45°N это незаходящая звезда. Вега, Альтаир и Денеб образуют хорошо приметный почти прямоугольный *Большой летний треугольник*.

14. Геркулес. Между созвездиями Лиры и Северной Короны большое пространство занимает созвездие Геркулеса, восемь звезд которого образуют неправильную, но весьма заметную фигуру из двух трапеций с общей стороной (см. рис. 1).

1.3.4. ОСЕННИЕ СОЗВЕЗДИЯ

15. Андромеда. Продолжив линию, соединяющую Полярную с серединой фигуры W созвездия Кассиопеи, на такое же расстояние дальше, мы встретим созвездие Андромеды. Прямые линии, проведенные через Полярную от звезд δ и ζ Большой Медведицы, ограничивают центральные фигуры Кассиопеи и Андромеды (на рис. 1 эти линии не показаны). Три звезды второй величины — α , β и γ Андромеды — лежат почти на равных расстояниях на одной прямой, благодаря чему созвездие легко узнать. α Андромеды — Альферац ($2,15^m$) находится в углу квадрата Пегаса, но не принадлежит ему. γ Андромеды — Аламак ($2,28^m$). Альферац и Аламак видны летом, осенью и зимой в первой половине ночи. Весной они видны перед рассветом.

В этом созвездии в $1,5^\circ$ восточнее звезды ν находится знаменитая большая спиральная туманность Андромеды. Это внегалактическая туманность, расстояние до которой составляет примерно 2 млн световых лет. При хорошей прозрачности атмосферы она видна в виде маленького, слабо мерцающего звездного облачка. Ее легко отыскать невооруженным глазом.

16. Пегас. От созвездия Андромеды легко перейти к созвездию Пегаса, яркие звезды которого — α , β и γ — совместно с α Андромеды составляют так называемый *Большой*

шой четырехугольник Пегаса. Наиболее яркие звезды созвездия Пегаса: α — Марка́б ($2,57^m$) и β — Шеа́т ($2,1 - 3,0^m$) — лежат на продолжении прямой, проходящей через β и α Большой Медведицы и Полярную звезду. γ Пегаса носит название Альгениб ($2,87^m$).

17. **Персей.** На продолжении линии $\alpha - \beta - \gamma$ Андромеды, в отстоянии, равном расстоянию между звездами β и γ , находится Мирфа́к ($1,90^m$) — α созвездия Персея. Эту яркую звезду можно найти и другим путем, мысленно соединив звезду Ферка́д (γ Малой Медведицы) с Полярной и продолжив линию на расстояние, примерно в два раза большее, чем расстояние между Феркад и Полярной. Созвездие Персей по виду напоминает циркуль. Пять наиболее ярких звезд этого созвездия — $\gamma, \alpha, \delta, \epsilon, \zeta$ — образуют кривую линию. Направо от этой линии, как бы на другой ножке циркуля, находится интересная переменная звезда β — Алго́ль ($2,2 - 3,5^m$). Изменение блеска этой звезды было замечено арабами около 1000 лет тому назад, и звезда получила название «Эл-Гуль», что означало «глаз дьявола».

18. **Телец.** Если соединить прямой звезды Рукба (δ Кассиопеи) и Мирфак (α Персея) и продолжить ее на расстояние, примерно в 2 раза большее, чем расстояние между этими звездами, встретим оранжево-красноватую звезду Альдебара́н ($1,06^m$) — α созвездия Тельца. Альдебаран — осенняя звезда, осенью видна до полуночи, хорошо видна после полуночи зимой и ранней весной. β Тельца — Нат ($1,78^m$) входит в известный пятиугольник Возничего, но не принадлежит ему. Рядом со звездой Альдебаран находится маленькое звездное скопление Гиады, а правее и выше — хорошо приметное звездное скопление Плеяды (народное название — Стожары). α и β Тельца образуют с Плеядами почти прямоугольный треугольник с прямым углом при звезде Альдебаран.

19. **Овен.** (от греч. — баран). На продолжении линии, соединяющей Полярную и Алама́к (γ Андромеды), на расстоянии, соответствующем половине расстояния между этими звездами, находится звезда Хама́ль ($2,23^m$) — α созвездия Овна. Три яркие звезды этого созвездия образуют небольшую прямую линию. β Овна носит название Шерата́н ($2,72^m$). Созвездие Андромеды находится посередине между созвездиями Кассиопеи и Овна. Хамаль и Шератан видны всю ночь в октябре и ноябре, зимой — в первой половине ночи, летом — во второй.

1.3.5. ЗИМНИЕ СОЗВЕЗДИЯ

20. Возничий. На продолжении прямой линии, соединяющей δ и α Большой Медведицы, на расстоянии, равном пяти таким отрезкам, можно найти созвездие Возничего. Прямая упирается в звезду β Возничего, а над ней очень ярко сияет блестящая желтая звезда α созвездия Возничего — Капелла ($0,21^m$), в переводе с латинского «козочка». Для широт более 44°N Капелла — звезда незаходящая, видна во все времена года. Яркие звезды этого созвездия совместно с β Тельца образуют хорошо заметный *пятиугольник Возничего*, немного вытянутый в направлении Большой Медведицы.

21. Близнецы. По диагонали ковша Большой Медведицы δ — β , на отрезке, примерно в 5 раз превышающем расстояние между этими звездами, расположено созвездие Близнецов. Прямая линия проходит через β созвездия — оранжево-желтую звезду Пóллукс ($1,21^m$), а выше, недалеко от Поллукса, хорошо видна беловато-зеленая звезда почти такой же яркости — Кáстор ($1,58^m$) — α созвездия Близнецов. Эти две звезды определили название созвездия. Близнецы — созвездие зимнее, но его можно наблюдать и весной, а осенью его звезды видны во второй половине ночи. Для широт больше 62°N Близнецы — незаходящее созвездие.

22. Орион. На продолжении линии Полярная — Капелла в южной стороне неба находится великолепное зимнее созвездие Орион. Это красивейшее созвездие имеет форму двух трапеций, сложенных вершинами друг к другу. В месте этого соединения близко между собой расположены три одинаковые по яркости звезды — δ , ϵ и ζ — Пояс Ориона. От него к югу отходит цепочка слабых звезд — Меч Ориона. Среди них находится знаменитая Большая туманность Ориона. Линия, проведенная через Меч Ориона, указывает направление в точку юга. Две самые яркие звезды этого созвездия находятся в противоположных углах фигуры. Звезда, которая находится ближе к Полярной, — Бетельгéйзе ($0,1-1,2^m$) — α Ориона. Она имеет красноватый оттенок; ее название в переводе с арабского означает «звезда в плече гиганта». В противоположном углу находится голубоватый Ригель ($0,34^m$) — β созвездия Орион (от араб. «риджл» — нога). γ Ориона — Беллатрикс ($1,70^m$), что в переводе с латинского означает «воительница». Беллатрикс уступает в яркости и Ригелю, и Бетельгéйзе. Созвездие Орион хорошо наблюдать на зимнем небе, в начале весны его видно до полуночи, а осенью — после полуночи. Орион как хорошо

приметное созвездие является также опорным для поисков других созвездий. Так, на продолжении Пояса Ориона в сторону Кассиопеи мы встречаем уже известную звезду Альдебаран.

23. Большой Пес. Продолжая направление $\delta - \beta$ Большой Медведицы еще на четыре отрезка, равных расстоянию между этими звездами, дальше, за Поллуксом, обнаружим самую яркую звезду северного неба — Сириус ($-1,58^m$) — α созвездия Большого Пса. Другим путем к Сириусу можно прийти, продолжая Пояс Ориона по ходу часовой стрелки. Сириус бывает виден осенью после полуночи и в начале весны — до полуночи. В переводе с греческого Сириус означает «пылающий».

24. Малый Пес. Примерно на половине расстояния между звездами Поллукс и Сириус находится созвездие Малого Пса. α этого созвездия — яркая желтоватая звезда Процион ($0,48^m$). Над горизонтом звезда восходит раньше Сириуса. К этой звезде можно также прийти, продолжив по ходу часовой стрелки направление от звезд γ и α Ориона на расстояние, в 3,5 раза превышающее расстояние между этими звездами. Процион и Сириус образуют две вершины равностороннего треугольника, в третьей вершине которого находится Бетельгейзе (α Ориона). Он известен под названием *Большого зимнего треугольника*. Яркие звезды зимнего неба — Ригель, Альдебаран, Капелла, Поллукс, Процион и Сириус — лежат на одной окружности. На рис. 1 эта окружность не показана во избежание перегруженности чертежа, но ее легко представить умозрительно.

Мы рассмотрели 24 характерных созвездия и 42 наиболее ярких звезды, имеющих собственные имена. Эти созвездия хорошо наблюдаются с территории России. При изучении звездного неба необходимо научиться быстро находить нужные созвездия и звезды даже тогда, когда часть неба закрыта облаками. Практически освоенные приемы отыскания звезд остаются в памяти на всю жизнь.

ОСНОВЫ СФЕРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ И СФЕРИЧЕСКОЙ ТРИГОНОМЕТРИИ

2.1. НЕОБХОДИМЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ СФЕРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

2.1.1. СФЕРА, КРУГИ НА НЕЙ. СФЕРИЧЕСКИЙ УГОЛ

Сферическая геометрия изучает свойства фигур, расположенных на поверхности сферы, и зависимости между их элементами. *Сферой* называется тело, получаемое при вращении окружности вокруг диаметра. Сфера представляет собой геометрическое место точек в пространстве, равноудаленных от одной точки, называемой ее центром (рис. 2). Часть пространства, заключенная внутри сферы, образует фигуру шара. Отрезок прямой, соединяющей центр сферы с любой точкой на ее поверхности, называется радиусом, а отрезок прямой, проходящий через центр и соединяющий две точки сферы, — диаметром сферы. Всякое сечение сферы плоскостью является кругом. Сечение сферы плоскостью, проходящей через центр сферы, больше всякого другого сечения и называется *большим кругом*. Радиусы всех больших кругов данной сферы равны между собой, поскольку каждый из них является радиусом сферы: $AK = FK = R$. Очевидно, что у сферы бесчисленное множество больших кругов, и каждая плоскость, пересекающая поверхность сферы по большому кругу, делит ее на две полусферы.

Через любые две точки на поверхности сферы, не лежащие на одном диаметре, можно провести только один большой круг. Два больших круга всегда пересекаются, и притом в двух диаметрально противоположных точках. Параллельных больших кругов быть не может. Дуга большого круга измеряет соответствующий ей угол при центре сферы и является кратчайшим расстоянием между двумя точками на поверхности сферы. Например, самым коротким расстоянием между точками M и N будет дуга большого круга MN .

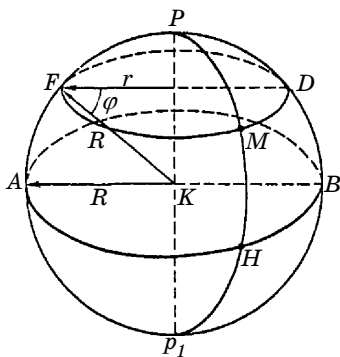


Рис. 2. Вспомогательная сфера

О Г Л А В Л Е Н И Е

Глава 1. ПРЕДМЕТ АСТРОНОМИИ И ПОРЯДОК ИЗУЧЕНИЯ ЗВЕЗДНОГО НЕБА	3
1.1. Астрономия и ее связь с геодезией	—
1.2. Классификация светил	5
1.3. Звездное небо. Порядок изучения созвездий и отыскания отдельных ярких звезд	8
1.3.1. Близполюсные созвездия	9
1.3.2. Весенние созвездия	10
1.3.3. Летние созвездия	11
1.3.4. Осенние созвездия	12
1.3.5. Зимние созвездия	14
Глава 2. ОСНОВЫ СФЕРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ И СФЕРИЧЕСКОЙ ТРИГОНОМЕТРИИ	16
2.1. Необходимые сведения из сферической геометрии	—
2.1.1. Сфера, круги на ней. Сферический угол	—
2.1.2. Сферический треугольник, его свойства	18
2.2. Краткие сведения из сферической тригонометрии	21
2.2.1. Основные формулы по сферической тригонометрии. Мнемоническое правило Непера—Модюи	21
2.2.2. Решение сферических треугольников	27
Глава 3. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И НА НЕБЕСНОЙ СФЕРЕ	30
3.1. Географические координаты на земной поверхности. Градусная и часовая меры углов	—
3.2. Небесные координаты. Вспомогательная небесная сфера	33
3.2.1. Координатные круги на небесной сфере	37
3.2.2. Горизонтная система координат	41
3.2.3. Первая экваториальная система координат	42
3.2.4. Вторая экваториальная система координат	44
3.2.5. Эклиптическая система координат	45
3.2.6. Связь между экваториальными системами координат. Формула звездного времени	46
3.2.7. Связь между географическими и небесными координатами	48
3.2.8. Параллактический треугольник. Рабочая эфемерида. Звездные каталоги	51
3.3. Видимое суточное движение светил и годичное движение Солнца	54
3.3.1. Суточное вращение небесной сферы и сопровождающие его явления	62
3.3.2. Дифференциальные изменения зенитных расстояний и азимутов светил	67
3.3.3. Видимое годичное движение Солнца	67
Глава 4. ВРЕМЯ И ЕГО ИЗМЕРЕНИЕ	74
4.1. Измерение времени. Звездное время	—
4.2. Солнечное время. Время истинное и среднее. Уравнение времени	78

4.3. Поясное и декретное время. Линия перемены дат.	82
4.4. Взаимосвязь между звездными и средними единицами времени .	86
4.5. Связь между различными системами измерения времени.	89
4.5.1. Звездное время в среднюю полночь на различных меридианах	—
4.5.2. Перевод момента среднего времени в момент звездного времени	90
4.5.3. Перевод момента звездного времени в момент среднего времени	91
4.5.4. Критическая дата	92
4.5.5. Перевод момента среднего времени в момент истинного солнечного времени и обратно	—
4.6. Понятие о прецессии	93
4.7. Тропический год и календарь	95
4.8. Неравномерность вращения Земли. Атомное время	100
4.9. Движение географических полюсов Земли. Понятие о мгновенном и среднем полюсе	103
4.10. Земное время	106
4.11. Интерполирование с часовыми изменениями	110
4.12. Вычисление видимых координат Солнца	113
4.13. Задачи на исчисление времени	115
Глава 5. ИЗМЕНЕНИЯ КООРДИНАТ СВЕТИЛ	124
5.1. Факторы, изменяющие положение светил	—
5.2. Прецессия и нутации.	—
5.3. Собственное движение звезд	128
5.4. Аберрация света	131
5.4.1. Суточная аберрация	133
5.4.2. Годичная аберрация	134
5.4.3. Вековая аберрация	135
5.5. Параллаксы светил	—
5.5.1. Годичный параллакс	136
5.5.2. Суточный параллакс	138
5.5.3. Учет суточного параллакса и видимого радиуса Солнца . .	140
5.6. Астрономическая рефракция	142
5.7. Система астрономических постоянных	146
5.8. Определение видимых координат звезд с помощью АЕ	151
5.8.1. Определение даты, к которой принадлежит данный момент звездного времени	—
5.8.2. Вычисление видимых координат звезд	153
5.8.3. Вычисление видимых координат близполюсных звезд . . .	158
Глава 6. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ	162
6.1. Задачи геодезической астрономии. Классификация астропунктов .	—
6.2. Принципы и способы определения времени, географических координат и азимутов направлений	163
6.3. Хронометр и его поправка	166
Глава 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ МЕСТА	170
7.1. Выгоднейшие условия определения широты по измеренным зенитным расстояниям светил	—

7.2. Теоретические основы способа определения широты по меридиональным зенитным расстояниям	172
7.3. Составление эфемерид северных и южных звезд. Порядок наблюдений	174
7.4. Вывод формулы редукции на меридиан	177
7.5. Определение широты по измеренным зенитным расстояниям Полярной	179
7.5.1. Сущность способа. Формулы для вычислений	—
7.5.2. Составление рабочей эфемериды Полярной. Установка теодолита и ориентирование его в меридиане	183
7.5.3. Порядок наблюдений и их обработка	187
7.5.4. Порядок вычисления широты	192
7.5.5. Контрольные вычисления широты с помощью Астрономического ежегодника. Вывод вероятнейшего значения широты и оценка точности	197
7.6. Приближенное определение широты по Солнцу	199
7.6.1. Сущность способа	—
7.6.2. Особенности измерения зенитных расстояний Солнца	203
7.6.3. Вычисление видимых координат Солнца на момент наблюдения с помощью Астрономического ежегодника	204
7.6.4. Порядок наблюдений и их обработка	209
7.6.5. Порядок вычисления широты	212
7.6.6. Вывод вероятнейшего значения широты из приема и оценка точности	218
7.7. Определение широты по измерениям малых разностей зенитных расстояний пар звезд в меридиане (способ Талькотта)	219
7.7.1. Сущность способа. Составление эфемерид пар звезд	—
7.7.2. Порядок наблюдений. Уровень Талькотта	222
7.7.3. Обработка результатов наблюдений для вычисления широты	225
7.8. Определение широты по наблюдениям пар звезд на равных высотах (способ Певцова)	227
7.8.1. Сущность способа. Выгоднейшие условия определения широты	—
7.8.2. Порядок наблюдений. Вычисление широты с учетом поправок за уровень	230
7.8.3. Сравнение способов Талькотта и Певцова	233
7.9. Определение цены деления уровня способом Комстока	234
Г л а в а 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОТЫ МЕСТА	241
8.1. Определение разности долгот	—
8.2. Определение долготы способом перевозки хронометров	242
8.3. Выгоднейшие условия определения времени по измеренным зенитным расстояниям светил	244
8.4. Определение поправки хронометра по измерениям зенитных расстояний светил	246
8.4.1. Подготовка к наблюдениям	—
8.4.2. Порядок наблюдений	247
8.4.3. Обработка наблюдений и вычисление поправки хронометра по измеренным зенитным расстояниям пары звезд	248

8.5. Определение поправки хронометра по Солнцу	249
8.5.1. Сущность способа	—
8.5.2. Порядок вычисления поправки хронометра	252
8.5.3. Вывод вероятнейшего значения поправки хронометра из приема и оценка точности	259
8.6. Вычисление долготы места	—
8.7. Определение времени (долготы) по наблюдениям пар звезд на равных высотах (способ Цингера)	261
8.7.1. Сущность способа Цингера	262
8.7.2. Рабочие эфемериды пар Цингера	264
8.7.3. Порядок наблюдений пар Цингера	265
8.7.4. Поправки за уровень и за суточную аберрацию в способе Цингера	269
8.8. Определение долготы по радио.	271
Глава 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТА НАПРАВЛЕНИЯ НА ЗЕМНОЙ ПРЕДМЕТ . .	277
9.1. Общие принципы определения азимута. Особенности измерения горизонтальных направлений на светила	—
9.2. Выгоднейшие условия расположения светил для измерения азимута	279
9.3. Определение азимута направления по наблюдениям Полярной	282
9.3.1. Порядок наблюдений и их обработка	283
9.3.2. Порядок вычисления азимута	286
9.3.3. Вывод вероятнейшего значения азимута на пункте и оценка точности	288
9.4. Определение азимута направления на земной предмет по часовым углам Солнца	289
9.4.1. Сущность способа	—
9.4.2. Особенности измерения горизонтальных направлений на Солнце	290
9.4.3. Порядок наблюдений и их обработка	291
9.4.4. Порядок вычисления азимута	294
9.5. Определение азимута направления по зенитным расстояниям Солнца	297
9.5.1. Сущность способа, порядок наблюдений	—
9.5.2. Последовательность вычисления азимута	301
9.6. Определение азимута направления по измеренным зенитным расстояниям ярких звезд	306
Глава 10. ПРИВЕДЕНИЕ ШИРОТ, ДОЛГОТ И АЗИМУТОВ К ЦЕНТРАМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПУНКТОВ И К СРЕДНЕМУ ПОЛЮСУ	309
10.1. Приведение широт, долгот и азимутов к центрам пунктов	—
10.2. Поправка в азимут за сближение меридианов	312
10.3. Приведение широт, долгот и азимутов к среднему полюсу	313
10.4. Связь между астрономическим и геодезическим азимутами и дирекционным углом	315
Приложение. Латинский и греческий алфавиты	318
Принятые обозначения	319