

Национальный центр аэрокосмического образования

молодежи им.А.М.Макарова

КАК УСТРОЕН МИР

Методические разработки

Тема: «Планета Земля»

**Подготовил:
доктор технических наук,
профессор ДГМА
А.М.Яншин**

**г. Днепропетровск
2014г.**

ЗЕМЛЯ

Первые астрономические явления, которые с детства знакомы каждому, это — смена дня и ночи, восход и заход Солнца. Объяснение этих явлений связано с вопросом о форме и вращении нашей Земли. На смену наивным представлениям о плоской неподвижной Земле и «небесной тверди» пришло признание шарообразности и вращения Земли и безграничности небес. Доказательства шарообразности Земли черпались из наблюдений формы края земной тени на диске Луны во время лунных затмений, из наблюдений постепенного появления или исчезновения морских судов при их приближении или удалении от берега, из наблюдений изменения высоты Полярной звезды при переезде с севера на юг, из факта расширения горизонта по мере подъема вверх. Идея шарообразности Земли возникла еще у древних греков (Пифагор, VI в. до н. э.; Парменид, VI—V вв. до н. э.; Аристотель, IV в. до н. э.), но потом оставалась в забвении более полутора тысяч лет, до времен Колумба и кругосветных путешествий XVI в.

Размеры земного шара впервые были определены около 240 г. до н. э. Эратосфеном (276—196 гг. до н. э.) в Александрии. Он нашел, что в день летнего солнцестояния в Сиене (южный Египет) Солнце в полдень проходит через зенит, а в Александрии — на расстоянии $1/50$ окружности ($7^\circ,2$) от него. Расстояние между этими городами, расположенными приблизительно на одном меридиане, составляло 5000 греческих стадий. Следовательно, полная окружность равна 250000 стадий, а радиус земного шара $R = 40\,000$ стадий. Принимая наиболее вероятную длину стадии равной 160 м, получаем $R = 6400$ км. Современные определения дают $R = 6370$ км.

Вращение земного шара самым естественным образом объясняет смену дня и ночи, восход и заход светил. Широко известны следующие доказательства вращения Земли вокруг своей оси: поворот с течением времени плоскости качаний маятника Фуко относительно окружающих его предметов, сплюснутость Земли, обнаруживаемая из градусных измерений, отклонение падающих тел к востоку, размыв правых берегов рек, текущих в северном полушарии Земли, и левых — в южном полушарии (закон Бэра), пассаты, изменение силы тяжести с широтой (не объясняемое сплюснутостью Земли), направление ветров внутри циклонов и антициклонов и т. д.

Некоторые греческие ученые догадывались и о годовом движении Земли вокруг Солнца. Аристарх Самосский еще в III в. до н. э. считал, что Земля обращается вокруг Солнца. Однако эта идея также оставалась в забвении полторы тысячи лет. Следующие явления можно назвать доказательствами обращения Земли вокруг Солнца: годичный параллакс звезд, годичную абerrацию звезд и смещение линий в спектрах звезд с периодом в один год.

Годичное движение Земли перемещает наблюдателя и этим вызывает видимое смещение более близких звезд относительно более далеких. В течение года близкие звезды описывают на небе (на фоне более далеких звезд) *параллактические эллипсы*. Большая ось такого эллипса всегда параллельна плоскости земной орбиты, т. е. плоскости эклиптики, а величина оси зависит от расстояния звезды (чем меньше расстояние, тем она больше); величина малой оси зависит, кроме того, и от углового расстояния звезды от плоскости земной орбиты, т. е. от астрономической широты звезды. Годичные параллаксы звезд меньше $1''$. Самая близкая к нам звезда имеет параллакс $0'',76$.

Годичное движение Земли вызывает, кроме того, абerrационное смещение звезд; все звезды описывают за год *абerrационные эллипсы*, большие оси которых всегда равны $41''$ и параллельные эклиптике, а величины малых осей зависят от астрономической широты звезды. Это абerrационное смещение является результатом сложения скорости движения Земли по ее орбите (в среднем $29,8$ км/сек) со скоростью распространения света (около $300\,000$ км/сек), идущего от звезды. В каждый данный момент звезда смещается в направлении движения Земли, к так называемому *апексу* орбитального движения Земли. Этот апекс всегда лежит в плоскости земной орбиты под прямым углом к Солнцу на запад от него, т. е. на 90° направо от Солнца.

Годичное движение Земли вызывает также периодическое смещение линий в спектрах звезд. Наибольшее смещение линий к красному концу спектра, которое согласно принципу Доплера означает наибольшую скорость удаления от звезды, бывает в тот момент, когда геоцентрическая долгота звезды на 90° больше долготы Солнца, наибольшее смещение к фиолетовому концу — при долготе звезды на 90° меньшей долготы Солнца.

Земля движется вокруг Солнца по эллипсу (рис. 1) с эксцентриситетом 0,016736 (около $1/60$). Солнце находится в одном из фокусов эллипса земной орбиты. Строго говоря, вокруг Солнца движется центр тяжести системы Земля — Луна, так называемый *барицентр*; вокруг этого центра Земля и Луна описывают в течение месяца свои орбиты. Движение Земли вокруг барицентра с периодом в один месяц вызывает периодические колебания в долготах и широтах Солнца и планет. Точное определение

амплитуды этих колебаний дает возможность определить расстояние центра Земли от барицентра (барицентр находится на расстоянии 4800 км от центра Земли по направлению к Луне, т.е. на 1600 км под поверхностью Земли) и отсюда найти отношение массы Луны к массе Земли.

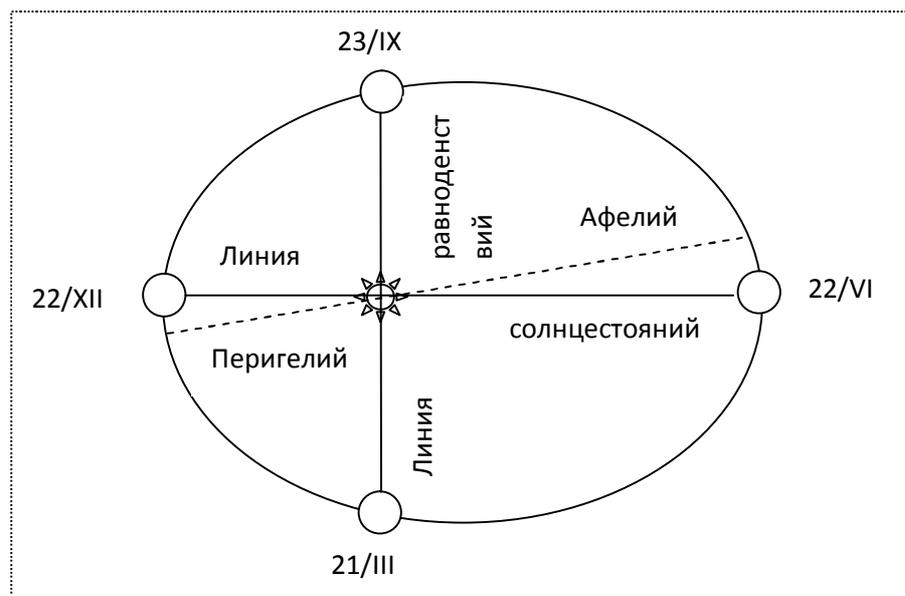


Рис. 1. Земля обращается вокруг Солнца по эллипсу.

Среднее расстояние Земли от Солнца равно 149 504 000 км (1 астрономическая единица — а.е.). Эта фундаментальная в астрономии величина выводится из определений *солнечного параллакса*, Горизонтальным параллаксом Солнца называется угол, под которым на расстоянии Земли от центра Солнца был бы виден экваториальный радиус Земли. Одним из методов измерения солнечного параллакса было наблюдение из разных пунктов на Земле явления прохождения Венеры или Меркурия по диску Солнца.

Самая близкая к Солнцу точка орбиты любой планеты называется *перигелием* (для Земли это 147 002 000 км), самая далекая — *афелием* (для Земли 152 006 000 км). Их соединяет *линия апсид*, совпадающая с большой осью эллипса планетной орбиты. Положение линии апсид определяется гелиоцентрической долготой перигелия. В 1960 г. долгота перигелия земной орбиты близка к 102°. Вследствие медленного вращения линии апсид долгота перигелия возрастает на 61",9 в год. В настоящую эпоху Земля проходит через перигелий 2—5 января, а через афелий 1—5 июля. Скорость движения Земли различна в разных частях орбиты. Средняя скорость движения Земли по ее орбите около 30 км/сек или 100 000 км/час; на длину своего поперечника Земля продвигается за семь минут.

Полный оборот вокруг Солнца Земля совершает в течение 365,25636 суток ($365^d 6^h 9^m 10^s$). Это — так называемый *звездный*, или *сидерический* год.

Средний промежуток времени от одного весеннего равноденствия до следующего, называемый *тропическим годом*, равен 365,24220 средних суток ($365^d 5^h 48^m 46^s$).

Плоскость земного экватора наклонена на $23^{\circ}27'$ к плоскости земной орбиты, причем земная ось стремится сохранить неизменным свое направление в пространстве, указывая всегда на *северный полюс мира*, находящийся вблизи Полярной звезды. Наклон оси вращения Земли и постоянство ее направления являются причиной смены времен года на Земле. Продолжительность времен года зависит от эксцентриситета земной орбиты и от расположения линии апсид.

Из градусных измерений было получено, что длина одного градуса широты у экватора равна 110,6 км, а у полюсов — 111,7 км. Это приводит к заключению о том, что истинная форма Земли близка к сфероиду. Согласно исследованиям советских геодезистов (Ф. Н. Красовский и его сотрудники, 1940 г.) экваториальный радиус этого сфероида $a=6378,245$ км, а полярный $b=6356,863$ км; разность их $a-b=21,382$ км.

Сплюснутость земного сфероида характеризуется отношением разности экваториального радиуса a и полярного b к экваториальному. Это отношение очень мало: что составляет около 0,3%, в то время как сплюснутость Юпитера около 6%. Точнейшие геодезические измерения и данные гравиметрии приводят к более точному представлению о фигуре Земли, к понятию о так называемом *геоиде*. Геоид не является правильной геометрической фигурой; за поверхность геоида принимается некоторая поверхность, в каждой точке перпендикулярная к линии отвеса. Эта поверхность приблизительно совпадает с невозмущенной приливами поверхностью океанов и мысленно продолжается на части

Земли, занятые материками. От поверхности геоида отсчитывают высоты различных точек на Земле, когда указывают «высоту над уровнем моря».

Сам земной шар не занимает неизменного положения относительно своей оси вращения. Поэтому полюсы Земли описывают на ее поверхности сложные линии, впрочем, в течение десятилетий не выходявшие за пределы квадрата со стороной $0^{\circ},7$, что соответствует 25 м. Полюс принимает участие в двух основных движениях: одно совершается по кругу радиусом 4,5 м в течение 433^d (оно связано с периодом, так называемых собственных колебаний земного шара), другое совершается по вытянутому эллипсу с большой полуосью 5 л и периодом в один год (оно связано с сезонными явлениями на Земле.) Из 60-летних наблюдений Международной Службы широты замечены периодические (период около 42 лет) изменения амплитуды колебаний полюса. Начиная с 1950 г., неожиданно для специалистов, кривая, описываемая северным полюсом Земли, превысила пределы. О причинах нарушения установившегося равновесия можно строить различные догадки, вплоть до предположений о возможном влиянии испытаний атомного и водородного оружия.

Вследствие вращения Земли каждая точка экватора имеет линейную скорость 465 м/сек. Развивающаяся в силу этого центробежная сила уменьшает силу тяжести на земной поверхности. На экваторе центробежная сила составляет $1/289$ часть силы тяжести. Реально это отношение достигает $1/190$, что объясняется сплюснутостью Земли.

Наши представления о внутреннем строении и физическом состоянии недр земного шара основаны на разнообразных данных, среди которых существенное значение имеют данные сейсмологии. Изучение распространения в земном шаре упругих волн, возникающих при землетрясениях, позволило открыть слоистое строение земных недр.

Земной шар имеет раскаленное ядро, однако тепло, которое каждый сантиметр поверхности Земли получает от ее недр, в 5000 раз меньше тепла, получаемого от Солнца. При углублении на каждые 33 м внутрь земной коры температура повышается в среднем на один градус. Можно предполагать, что это повышение температуры происходит лишь в сравнительно тонком слое земной коры (не глубже 100 км), в котором находятся радиоактивные вещества. Распад атомов радиоактивных элементов и превращение их в атомы других элементов сопровождаются выделением тепла. Ядро же Земли имеет температуру $2000\text{—}4000^{\circ}$. Однако при такой температуре упругость внутренних частей ядра, находящихся под давлением (до 3,5 млн. атмосфер) вышележащих слоев, в 2,5 раза больше упругости стали. При этих условиях вещество в ядре Земли находится в особом «металлическом» состоянии. Плотность в центре Земли около 11 г/см^3 . Средняя плотность Земли (5,52) приблизительно вдвое больше плотности поверхностных ее слоев (2,7).

Толщина земной коры (в которую входят осадочные породы, гранит, базальт) вплоть до основания базальтов в разных районах земного шара составляет от 30 до 60 км. Под корой, до глубины 2900 км, расположена *мантия*, или *оболочка*. Глубже находится *ядро*. Вопрос о существовании многих границ раздела слоев разной плотности в толще Земли в настоящее время подвергается пересмотру. Вероятно, что помимо границы, залегающей на глубине 2900 км, имеется еще лишь одна граница, на глубине 5000 км, где происходит новое резкое изменение плотности.

Химический состав всей Земли в целом и средний состав атмосферы, гидросферы и каменной оболочки — литосферы — дан в таблице I.

Согласно последним данным геологии возраст земной коры не меньше 3 миллиардов лет. Возраст Земли как планеты, несомненно, больше.

Земной шар представляет собой магнит, причем магнитная ось Земли наклонена на угол $11^{\circ},5$ к оси вращения. Она проходит на расстоянии около 1200 км от центра Земли; магнитный полюс, находящийся в северном полушарии Земли, имеет координаты 74°N и 101°W ; другой полюс - 69°S и 143°E .

Напряженность магнитного поля зависит от места на поверхности Земли и от времени, однако при отсутствии возмущений редко превышает 0,6 эрстед.

Земная атмосфера. Воздушный океан, окружающий Землю, - ее атмосфера, - является ареной, на которой разыгрываются разнообразные метеорологические явления. Для астрономов атмосфера является скорее помехой в наблюдательных работах, хотя некоторые явления, относящиеся к астрономии, протекают в атмосфере (например, вспышки метеоров). Воздух рассеивает солнечные лучи, причем это рассеяние возрастает с уменьшением длины волны. Для видимого спектра большее рассеяние сине-зеленых лучей обуславливает голубой цвет неба и не дает возможности наблюдать звезды днем. В силу этого же Солнце и Луна близ горизонта (перед закатом и после восхода) бывают красного или оранжевого цвета. Излучение с длиной волны короче 290 тц полностью поглощается

слоями озона, находящимися на высотах 35—60 км. Общая толщина слоя озона, приведенного к нормальным условиям (т.е. давлению 760 мм ртутного столба и температуре 0°), составляет всего 3 мм. Он предохраняет живую природу от губительного действия далеких ультрафиолетовых и других коротковолновых излучений.

Таблица I. Химический состав Земли

Земля в целом		Атмосфера	I литосфера
элемент	% по весу	Алемент	% по весу
Железо Fe.....	39,76	Кислород O.....	49,42
Кислород O.....	27,71	Кремний Si.....	25,75
Кремний Si.....	14,53	Алюминий Al.....	7,51
Магний Mg.....	8,69	Железо Fe.....	4,70
Никель Ni.....	3,46	Кальций Ca.....	3,39
Кальций Ca.....	2,32	Натрий Na.....	2,64
Алюминий Al.....	1,79	Калий K.....	2,40
Сера S.....	0,64	Магний Mg.....	1,94
Натрий Na.....	0,38	Водород H.....	0,88
Хром Cr.....	0,20	Титан Ti.....	0,58
Калий K.....	0,14	Хлор Cl.....	0,188
Фосфор P.....	0,11	Фосфор P.....	0,12
Марганец Mn.....	0,07	Марганец Mn.....	0,09
Углерод C.....	0,04	Углерод C.....	0,087
Титан Ti.....	0,02	Сера S.....	0,06
Остальные элементы . .	0,14	Остальные элементы .	0,26

Атмосфера поглощает не только коротковолновое излучение небесных светил, но и не пропускает к нам значительную часть космического радиоизлучения.

Радиоволны длиной больше 30-15 м отражаются ионосферой, а короче 3 см - поглощаются водяным паром. Кроме того, атмосфера значительно ослабляет, а также преобразует поток частиц высокой энергии, идущий к нам из космоса (так называемые космические лучи). Таким образом, земная атмосфера - это своеобразный экран, защищающий поверхность Земли от непосредственного воздействия космоса.

Поглощая и рассеивая свет небесных светил, атмосфера уменьшает их блеск, причем поглощение возрастает при увеличении толщи воздуха, проходимой лучами. Толща увеличивается при возрастании зенитного расстояния z (в первом приближении пропорционально $\cos z$). Поэтому при сравнении блеска небесных светил, находящихся на разных зенитных расстояниях, надо учитывать различие в поглощении света. Поглощение в совершенно чистой атмосфере составляет в зените 0^m,21 в визуальных лучах и 0^m,44 — в фотографических.

Атмосфера вызывает также преломление лучей — *рефракцию*, которая влияет на положение светила на небе и заметным образом искажает форму Солнца и Луны у горизонта.

Свойства земной атмосферы до высоты в 40 км изучены со стратостатов и самопишущих метеорологических приборов, поднимаемых шарами-зондами; разнообразные метеоприборы и спектральные аппараты поднимались до высот почти в 500 км специальными метеорологическими и геофизическими ракетами; наконец, в самые последние годы исключительно богатая информация о состоянии верхних слоев атмосферы получается с искусственных спутников Земли и космических ракет. Кроме того, высокие слои атмосферы исследуются разными косвенными методами (наблюдения метеоров, метеорных следов, серебристых облаков, полярных сияний, изучение свечения ночного неба, сумеречных явлений, лунных затмений), а также с помощью радио (изучение ионизованных областей, преломляющих и отражающих радиоволны).

В основном земная атмосфера состоит из азота и кислорода. В табл. II дано процентное содержание химических элементов, составляющих атмосферу Земли. Вследствие перемешивания воздуха конвективными токами и ветрами состав атмосферы почти не меняется до высоты в 100—150 км. Выше обнаруживается изменение состава атмосферы: количество тяжелых инертных газов резко падает, а молекулярные азот и кислород заменяются атомарными. До высот 300—350 км преобладает атомарный кислород, а выше — атомарный азот.

Атмосферу Земли условно делят на четыре слоя: *тропосферу*, *стратосферу*, *ионосферу* и *экзосферу*.

Таблица II. Состав земной атмосферы

Элемент	% по объему
Азот	78,09
Кислород	20,95
Аргон	0,93
Углекислый газ	0,03
Водород	0,01
Неон	0,0015
Гелий	0,00015
Криптон	0,000001
Ксенон	0,00000009

Тропосфера начинается от поверхности земли или моря; верхняя ее граница в средних широтах находится на высоте 9—10 км зимой и 10—12 км летом, а в экваториальной зоне поднимается до 15—17 км. Тропосфера характеризуется постепенным убыванием температуры с высотой. В ней содержится около 80% массы всей атмосферы, почти вся вода и пыль, взвешенные в атмосфере. Граница между тропосферой и стратосферой называется *тропопаузой*. Стратосфера распространяется от высоты 12—15 км до 80—85 км, где находится *стратопауза*, выше которой располагается ионосфера.

Как показывает само название, в этой последней, помимо нейтральных молекул, находятся и ионизированные атомы. Ионизацию производит коротковолновое излучение Солнца и потоки заряженных частиц (корпускул), летящих от Солнца. Электрические свойства ионосферы, высота и степень ее ионизации зависят от времени суток, времени года и от фазы солнечной активности. Ионосфера имеет громадное значение для радиосвязи на больших расстояниях, которая осуществляется на длинных, средних и коротких радиоволнах, многократно отражающихся (точнее, преломляющихся) от ионизированных слоев ионосферы и от поверхности Земли.

Представления о строении ионосферы значительно изменились после запуска искусственных спутников Земли. До этого предполагалось, что в ионосфере имеются четыре основных ионизированных слоя: слой D (на высоте 80 км), слой E (100—105 км), слой F₁, (200 км) и слой F₂, (300—350 км). Однако подозревали, что эти слои имеют клочковатое строение и состоят из отдельных ионизированных облаков. В настоящее время приходится признать, что такого четкого деления на слои (стратификации) в ионосфере нет: от 60 км до, по крайней мере, 473 км имеется сплошной массив ионизированного газа с отдельными флуктуациями (неоднородностями) концентрации ионизированных частиц.

Было обнаружено изменение плотности верхних слоев атмосферы и колебания их температуры в зависимости от изменения солнечной активности, а также в зависимости от времени года (так, например, летом в дневные часы плотность на высоте 200 км в 20 раз больше, чем зимой ночью).

Область выше 400 км называется *экзосферой*.

Самые высокие полярные сияния наблюдались на высотах 700—1000 и даже 1200 км. Свечение ночного неба обнаруживается на высотах до 2000 км. Вероятно, верхняя граница земной атмосферы лежит около 3000—4000 км.

Данные, полученные в последнее время с помощью искусственных спутников Земли, а также советских космических ракет, доказали, что земной шар окружен двумя «поясами радиации» - областями резкого увеличения концентрации заряженных частиц высокой энергии. Концентрация оказалась наибольшей вблизи магнитного экватора Земли (как известно не совпадающего с географическим) и убывает к магнитным полюсам, а также зависит от высоты над земной поверхностью. В первой, близкой к Земле области концентрация заряженных частиц (по-видимому, протонов с энергиями до сотен миллионов электрон-вольт) достигает максимума на высоте порядка 1000 км. Границы второй области, созданной, вероятно, электронами с энергией в несколько десятков тысяч электрон-вольт, простираются до высот в 50—60 тыс. км.

На каждый квадратный сантиметр земной поверхности на уровне моря воздух давит с силой в 1,0332 кг (так называемое давление в одну атмосферу). Общая масса атмосферы Земли составляет около одной миллионной доли массы Земли.

Распределение в атмосфере температуры (определяемой тепловыми скоростями движений частиц воздуха) характеризуется любопытными неправильностями — *температурными инверсиями*: в тропосфере температура уменьшается приблизительно на 6°С с каждым километром высоты; от тропопаузы до высоты 30 км температура приблизительно постоянна и равна — 56°С; от 30 до 55 км температура постепенно повышается до 4-100°С; к высоте 80 км она вновь падает до +30°С и затем постепенно повышается, достигая нескольких сотен градусов на высоте 200—300 км. Однако плотность воздуха на этих высотах столь мала, что температура тела, попавшего туда, будет определяться способностью тела поглощать энергию солнечных лучей (и излучать, ее в окружающее пространство), а не температурой окружающего крайне разреженного воздуха. Изучение метеорных следов и серебристых облаков обнаруживает скорости «стратосферных ветров» до 120 м/сек.