

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.Ф. Говердовский, А.В. Дикинис

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по дисциплине
«КОСМИЧЕСКАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ»

Часть I. «Спутниковая метеорология»

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
в области гидрометеорологии в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности
«Метеорология» направления подготовки «Гидрометеорология»*



Санкт-Петербург
2009

УДК 551.507.362.2

БК 39.62:26.23.в6

Говердовский В.Ф., Дикинис А.В. Лабораторный практикум по дисциплине «Космическая метеорология». Ч. I. Спутниковая метеорология. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009. – 227 с.

ISBN 978-5-86813-232-2

Основное внимание уделено лабораторным работам и задачам спутниковой (космической) метеорологии, существенным образом использующей методы астрономии, прикладной небесной механики (динамики космического полета) и общей метеорологии (физики атмосферы) для осуществления комплексных измерений прямой и рассеянной (отраженной) солнечной радиации, собственного излучения земной поверхности, встречного излучения атмосферы и уходящей радиации, характеризующих состояние подстилающей поверхности Земли, облачности и атмосферы до больших высот.

В начале каждой лабораторной работы приводятся краткие сведения из теории; методические указания и рекомендации по выполнению работ, ответы и решения (наиболее трудных) задач позволяют использовать практикум для самостоятельного изучения дисциплины.

Лабораторный практикум предназначен для студентов гидрометеорологических специальностей высших учебных заведений.

Рецензент: В.В. Степанов, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр. ААНИИ.

92-к 1414

ISBN 978-5-86813-232-2

© Говердовский В.Ф., Дикинис А.В., 2009

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2009



ПРЕДИСЛОВИЕ

Спутниковая (космическая) метеорология – научное направление, предметом изучения которого, с одной стороны, является влияние природных условий на распространение и трансформацию лучистой энергии Солнца в системе «Земля–атмосфера», а с другой – использование различных видов излучения для научного исследования состояния компонентов этой системы, естественных объектов и образований, погодо- и климатообразующих процессов.

Основным методом научного исследования спутниковой метеорологии является дистанционное зондирование – «... наблюдение и измерение энергетических и поляризационных характеристик собственного и отраженного излучения элементов суши, океана и атмосферы Земли в различных диапазонах электромагнитных волн, способствующее описанию местонахождения, характера и временной изменчивости естественных природных параметров и явлений, природных ресурсов Земли, окружающей среды, а также антропогенных объектов и образований» (документ ООН «А/АС105/С.1/Л.94»)

Метеорологические спутники Земли впервые позволили получить качественную новую информацию о физических процессах в системе «Земля–атмосфера», о радиационных и тепловых потоках, пронизывающих географическую оболочку Земли, о механизмах взаимодействия солнечной радиации с подстилающей земной поверхностью, Мировым океаном и атмосферой.

Практикум по спутниковой метеорологии подготовлен преподавателями Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ), имеющими многолетний опыт преподавания соответствующего курса студентам гидрометеорологических и океанологических специальностей. Следуя принципу, согласно которому студенты для прочного усвоения изучаемой дисциплины и ее практических приложений обязаны понять сущность метода научных исследований Земли из космоса и условия его реализации, особенности источников информации и способов ее получения и при этом получить навык к самостоятельной специфической работе, авторы включили в практикум только те лабораторные работы, которые реально выполнимы.

При составлении практикума был использован ряд аналогичных изданий прошлых лет не только по космической метеорологии, но и по важнейшим сопутствующим научным дисциплинам: частично привлечен в переработанном виде материал из задачников по астрономии, небесной механике, общей метеорологии, динамической метеорологии и т. п. [2, 4, 6, 7, 9].

Основное назначение данного практикума по спутниковой метеорологии – осмысление и углубление теоретических знаний, изучение методических принципов и способов получения, обработки и интерпретации информации, получаемой с помощью аппаратуры метеорологических спутников Земли (МСЗ), а также приобретение навыка к практическому решению специфических задач спутниковой (космической) метеорологии.

Лабораторный практикум условно подразделяется на три самостоятельные части, каждая из которых содержит по три взаимосвязанные лабораторные работы, что соответствует главным разделам космической метеорологии. Последовательность лабораторных работ следует программе дисциплины. Каждая лабораторная работа содержит краткое теоретическое обоснование, контрольные вопросы для самопроверки знаний, задания и задачи, перечень материалов и рекомендуемой литературы для работы, порядок ее выполнения и методические указания.

Краткое теоретическое обоснование лабораторной работы содержит основные, самые необходимые сведения, поясняет сущность и (или) методологию ее выполнения. Чаще всего оно составлено таким образом, что для практического применения получаемых сведений требуется дополнительное использование учебников, а это приучает студентов к самостоятельной углубленной проработке необходимой научной литературы. В целях более глубокого и детального ознакомления с изучаемыми вопросами студентам рекомендуются задачи для самостоятельного решения, которые разнообразны по содержанию и степени трудности. Многие из них снабжены ответами, а наиболее сложные – решениями.

Одни задачи являются иллюстративными примерами к соответствующему теоретическому материалу лабораторных работ, другие же представляют самостоятельный (познавательный) интерес. Авторы полагают, что основным итогом их решения должен

быть не только численный ответ, но и всесторонний анализ его физического смысла. Поэтому в практикуме помещены не только задачи, но и задания на построение и анализ различных графиков, номограмм, а также вопросы для обсуждения.

Выбор конкретных задач для решения осуществляется по указанию преподавателя или под его контролем по усмотрению самих студентов. Во всяком случае, студент должен самостоятельно представить себе ход выполнения (алгоритм) каждой из задач и, по крайней мере, некоторые из них решить полностью. Важнейшие константы и справочные сведения, которые могут потребоваться для решения задачи или ответа на вопрос, приводятся в приложении 1.

В процессе выполнения лабораторных работ целесообразно распределить обучающихся студентов по группам (2–3 человека), чтобы они, решая одну и ту же задачу, имели возможность обсуждать и согласовывать свои действия, вырабатывать навыки правильного подхода к решению поставленной задачи, к отысканию необходимых оптимальных для этого алгоритмов, критически оценивать полученные результаты, сопоставляя их с реальными данными ранее проведенных натурных исследований и опубликованных. Это позволяет быстро и своевременно обнаружить и исправить ошибки, допущенные в практических действиях.

О выполнении лабораторных работ студенты представляют индивидуальный (или групповой, бригадный) письменный отчет в произвольной (или рекомендуемой преподавателем) форме, при составлении которого студент(ы) должен уметь пользоваться сжатой (краткой) формой записей, четкой формулировкой выводов, грамотным графическим отображением результатов.

Каждая из лабораторных работ практикума предусматривает порядок ее выполнения, а также использование тех или иных пособий или материалов – моделей, графиков, диаграмм, справочников, календарей астрономических, математических и астрономических таблиц, планшетов, номограмм, калькулятора или персональной электронной вычислительной машины.

Авторы будут благодарны за отзывы и замечания, высказанные по поводу практикума лабораторных работ по спутниковой (космической) метеорологии.

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование как метод научного исследования спутниковой метеорологии формировалось во второй половине прошлого века дополнительно к традиционным гидрометеорологическим наблюдениям и измерениям у земной поверхности и в атмосфере. В широком смысле понятие «дистанционное зондирование» (англ. remote sensing – чувствующий на расстоянии) означает изучение неконтактным способом состояния объектов, процессов и явлений без непосредственного соприкосновения с ними.

В настоящее время под дистанционным зондированием Земли из космоса понимают изучение либо планеты Земля (системы «Земля–атмосфера») в целом, либо составляющих компонентов ее географической оболочки (среды), либо отдельных естественных объектов, образований или природных явлений, путем селекции (лат. selecto – выбор, отбор), регистрации и анализа их собственно-го или отраженного ими электромагнитного излучения с помощью определенных технических средств, устанавливаемых на аэро- и космических носителях.

Географической называют оболочку земного шара, состоящую из атмосферы, земной коры (литосферы), гидросферы, почв, растительности и животного мира, которые в своем строении и развитии неразрывно связаны друг с другом и взаимообусловлены, образуют единое целое, генетически связанное с земной поверхностью и обладающее своими специфическими законами существования.

Вместо термина «географическая оболочка», подчеркивая особый смысл понятия, часто используют его синонимы (гр. συνόπυτος – одноименный): «географическая среда», «климатическая система», «система «Земля–атмосфера» и др.

Географическая среда – это окружающая общество природа, являющаяся необходимым и постоянным условием жизни людей на Земле (иногда говорят проще – окружающая природная среда).

Под климатической системой понимают совокупность погодо- и климатообразующих компонентов: атмосферы, литосферы, гидросферы, криосферы и биосферы, имеющих различные физические

свойства и находящиеся в состоянии сложнейших взаимодействий друг с другом, характеризующихся прямыми и обратными связями.

Система Земля–атмосфера – это термин (гр. terminus – предел, граница), чаще всего обозначающий вполне определенные погодообразующие взаимоотношения земной поверхности и атмосферы.

Все понятия и термины, разные по звуковой форме, но близкие по значению, сущности, употребляются для различия тех или иных смысловых оттенков.

Дистанционное зондирование Земли из космоса позволяет получать сведения о состоянии земной поверхности (суши и моря), снежного и ледникового покрытия, облачности; следить за возникновением и эволюцией барических образований и атмосферных фронтов; обнаруживать и исследовать аэрозоли и примеси различного происхождения, а также газовые компоненты в атмосфере; изучать тепловой режим планеты в целом и отдельных ее регионов, радиационный баланс и многое другое. Состав аппаратуры на спутниках может меняться, конкретные технические устройства (приборы) постоянно модифицируются, поэтому в процессе обучения целесообразно принимать во внимание прежде всего физический принцип работы того или иного устройства и использовать обобщенное понятие «сенсор» (от англ. sensor – датчик) для обозначения любого комплекса или прибора, регистрирующего излучение и сохраняющего неизменным основной принцип работы (телевизионный, сканерный, радиолокационный, лазерный и т. п.).

В гидрометеорологических исследованиях Земли из космоса анализируют не только дискретную информацию о природных объектах, процессах и явлениях, получаемую в результате регистрации электромагнитного излучения в отдельных точках орбиты спутника или по определенным трассам, но и широко используют визуализированную форму представления спутниковой информации – космические изображения.

Совокупность работ по получению изображения Земли в целом или специальной визуализированной информации (снимков) об изучаемых компонентах ее географической оболочки с помощью космических летательных аппаратов принято называть космической съемкой.

Получение дискретной информации и съемка считаются пассивными, если при этом регистрируются естественные отраженные или излучаемые радиационные потоки, и активными – в случае фиксации отражаемого объектами природной среды излучения (радиолокатора или лидара, например).

Орбиты метеорологических спутников должны обеспечивать детальность обзора земной поверхности в полосе заданной ширины, определенное время существования МСЗ, оптимальные условия функционирования установленной на спутнике научной аппаратуры. Наиболее удобными для изучения системы Земля–атмосфера из космоса являются круговые или близкие к ним орбиты, которые к тому же чаще всего бывают солнечно-синхронными. При движении по таким орбитам обеспечиваются одинаковая периодичность обзора, наблюдения над определенными районами Земли в одно и то же время, а также упрощается обработка и анализ принимаемой спутниковой информации. Определение положения МСЗ в пространстве относительно Земли в заданные моменты времени осуществляется астрономическими методами. При изучении движения небесных тел – как естественных, так и искусственных – прежде всего необходимо принимать во внимание силы взаимного притяжения тел в пространстве, а это задача классической небесной механики, для решения которой используется закон всемирного тяготения.

Регулярная смена времен года на Земле является следствием трех астрономических причин: годового обращения Земли вокруг Солнца, наклона земной оси к плоскости земной орбиты (совпадающей с плоскостью эклиптики) и сохранения земной осью своего направления в пространстве на протяжении длительных промежутков времени. Благодаря совместному действию этих причин происходит видимое годовое движение Солнца по эклиптике, наклоненной к небесному экватору, и поэтому положение суточного пути Солнца над горизонтом различных мест земной поверхности изменяется с годичным периодом, а следовательно, с этим же периодом изменяются условия их освещения и обогрева Солнцем.

Под влиянием сложных процессов, происходящих в исследуемых естественных объектах, отраженное солнечное или собственное тепловое излучение претерпевает преобразования и моду-

лируется. При этом меняется его спектральный состав, энергия и степень поляризации. Это излучение содержит информацию о вещественной сущности (внутреннем содержании) объекта и его состоянии, структуре поверхности и архитектонике (сочетании частей в одном стройном целом, композиции). Однако по пути от исследуемого объекта к приемнику излучение подвергается влиянию атмосферы и ее включений – аэрозолей и облаков, воздействию помех, искажается за счет поступательного движения космического аппарата, неравномерного распределения освещенности по полю снимка, абберации объектива съёмочной системы и т. п. Здесь уже невозможно обойтись без знания общей метеорологии, динамической метеорологии, физики атмосферы и общей физики.

Выполняемое на борту космического носителя цифровое кодирование видеосигналов, преобразование информации (сжатие, уплотнение, устранение избыточности и пр.) сопровождается определенными, заранее ограниченными потерями информации. Поэтому процесс получения информации всегда предусматривает контроль условий съемки и дистанционного зондирования – пространственных координат искусственного спутника Земли (ИСЗ) в определенные моменты времени, источников электромагнитного излучения, географического местонахождения изучаемого объекта, влияния атмосферы, точности оценки параметров состояния естественных образований, процессов и т. д.

Практикум лабораторных работ по курсу «Спутниковая метеорология» условно подразделяется на три самостоятельные, но вполне взаимосвязанные части: «Дистанционное зондирование Земли из космоса», «Источники гидрометеорологической информации при дистанционном зондировании Земли из космоса» и «Прием и первичная обработка информации метеорологических спутников Земли».

Первая часть определяет важнейшие условия дистанционного зондирования Земли из космоса: вычисление положения спутника в космическом пространстве, особенности счета времени при изучении Земли из космоса, а также расчет координат подспутниковой точки и трассы ИСЗ на поверхности планеты.

Вторая часть посвящена характеристике основных источников информации при дистанционном зондировании Земли из космоса,

трансформации излучения в системе Земля–атмосфера и специфике использования спутниковой информации для оценки состояния естественных объектов и образований (облачности), погодообразующих процессов и явлений, контроля (мониторинга) окружающей природной среды.

Третья часть практикума объединяет лабораторные работы, посвященные изучению организации слежения за МСЗ, особенностей получения и первичной обработки данных спутниковых наблюдений на автономном пункте приема информации (АППИ).

I. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Для описания положения космического летательного аппарата в пространстве относительно Земли в любой момент времени используют астрономическое понятие небесной сферы, на которую проецируется траектория его полета. В общем случае орбита небесного тела представляет собой эллипс, один из фокусов которого находится в центре небесной сферы. Величина большой полуоси и эксцентриситета для эллиптической орбиты (или высота полета для круговой орбиты) определяют ее геометрические размеры и форму, которые при невозмущенном движении, например, искусственного спутника Земли (ИСЗ) не должны изменяться в пространстве и времени. В действительности же возмущения, вызываемые несферичностью нашей планеты и сопротивлением ее атмосферы, обуславливают поворот орбитальной плоскости вокруг оси вращения Земли, в результате чего узлы орбиты перемещаются (прецессируют) по экватору. Параметры орбиты спутника при этом могут изменяться: возмущения вызывают вращение линии апсид, изменение радиального расстояния спутника от притягивающего центра, период его обращения и наклона орбиты. Учет этого влияния осуществляется методами решения задач небесной механики.

При дистанционном зондировании Земли из космоса на описании положения небесных тел в различных системах астрономических и географических координат с точностью, необходимой для решения конкретной задачи, основано также определение географических координат подспутниковой точки, временная и географическая привязка спутниковых измерений, уточнение границ исследуемых естественных объектов и т. п. Во всех этих задачах большую роль играет выбор системы счета и хранение точного времени.

В практической жизни людей счет времени ведется по положению Солнца относительно небесного меридиана средними единицами, включая и календарные даты, смена которых происходит по истечении средних солнечных суток. Однако вследствие годо-

вого обращения Земли вокруг Солнца его положение относительно небесного меридиана непрерывно расходится с положением точки весеннего равноденствия, часовым углом которого измеряется звездное время. Поэтому при вычислении положения движущихся небесных тел приходится пользоваться еще и звездными единицами времени, полагая, что поворот небесной сферы на некоторый угол, соответствующий определенному интервалу звездного времени, вызывает увеличение часовых углов всех ее точек (кроме неподвижных) на ту же самую величину.

Лабораторная работа 1

Определение положения искусственных спутников Земли в космическом пространстве

Цель работы: научиться правильно использовать астрономические системы координат для определения местоположения искусственных спутников Земли в орбитальном полете.

Методы наблюдения за искусственными спутниками разделяют на оптические (визуальные) и радиотехнические. К радиотехническим методам относятся радиопеленгация, радиолокация и использование эффекта Доплера.

В темное время суток (безлунной ночью), при отсутствии облачности, движение ИСЗ наблюдается визуально как быстрое перемещение по небесному своду ярко светящейся точки на фоне темного звездного неба.

Координаты небесных тел в космическом пространстве

Для удобства рассмотрения простейших видимых небесных явлений, таких, например, как взаимное расположение небесных тел (планет, звезд в созвездиях), восход и заход светил (Солнца и Луны), движение искусственных спутников, издавна пользуются понятием «небесная сфера».

Небесной сферой называют воображаемую шаровую поверхность произвольного радиуса с центром в любой точке пространства, на которой положения небесных тел изображаются так, как они видны из точки наблюдения.

Небесная сфера. Видимые положения небесных тел определяются относительно основных элементов небесной сферы (рис. 1), к которым относятся: отвесная линия (или вертикаль), точки зенита и надира, истинный (или математический) горизонт; ось мира, полюсы мира, небесный экватор, небесный меридиан и точки пересечения небесного меридиана SQZPN и небесного экватора QWQ'E с истинным горизонтом NESW (точки юга S, севера N, востока E и запада W).

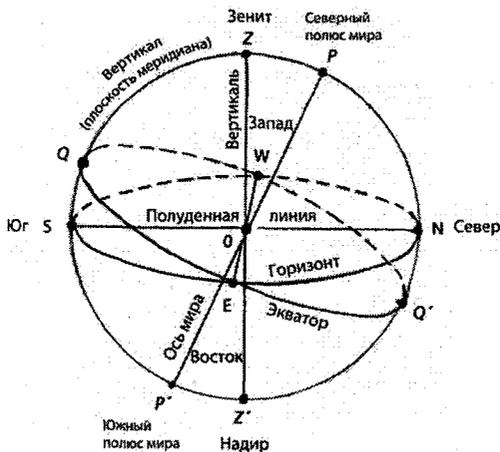


Рис. 1. Небесная сфера

Подобно тому, как положение каждой точки на земной поверхности определяется ее географическими координатами – широтой ϕ и долготой λ , которые отсчитываются, естественно, относительно земного экватора и гринвичского меридиана (рис. 2), положение небесных тел на вспомогательной небесной сфере определяется двумя сферическими координатами, представляющими собой дуги больших кругов этой сферы, выраженные в градусной или часовой мере.

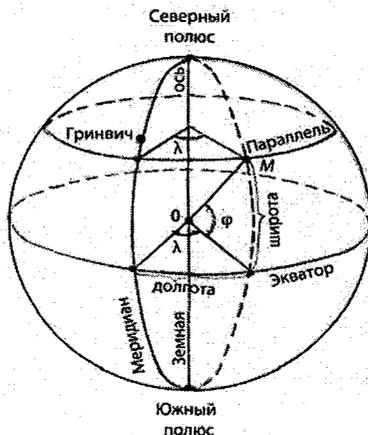


Рис. 2. Географические координаты – широта и долгота

Если считать Землю шаром, то отвесная линия OZ является продолжением земного радиуса OO' , проведенного из центра Земли в точку, где находится наблюдатель (рис. 3). Поэтому плоскость истинного горизонта, проходящая через центр небесной сферы (через точку O , если в этой точке находится наблюдатель) и перпендикулярная к отвесной линии, является плоскостью, касательной к земному шару в точке O . Плоскость небесного меридиана $SQZPN$ совпадает с плоскостью географического меридиана. При вращении Земли вместе с ней вращается наблюдатель, а с ним плоскости небесного меридиана и истинного горизонта и отвесная линия. Небесный экватор остается в своей собственной плоскости, а ось мира параллельна самой себе, поэтому они занимают среди звезд одно и то же направление. Вращающийся истинный горизонт в разные часы суток (отграничивающий для наблюдателя видимую полусферу от невидимой) проходит через разные части небесной сферы. Соответственно изменяет свое положение и точка зенита Z .

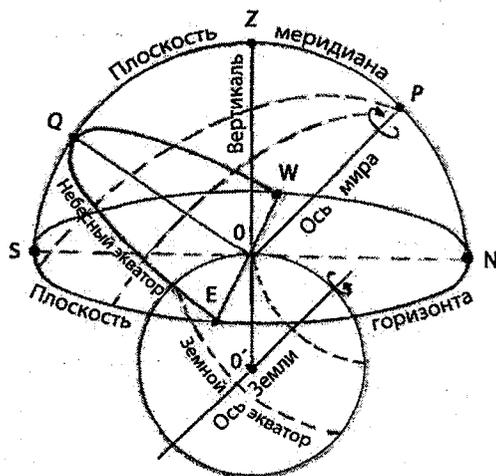


Рис. 3. Соотношение между Землей и небесной сферой

Астрономические системы координат. Одним из основных направлений, относительно которого определяется положение наблюдаемого небесного тела, является отвесная линия, которая в любом пункте земной поверхности направлена к центру Земли. Плоскость, перпендикулярная отвесной линии, называется гори-

горизонтальной плоскостью (плоскостью истинного, или математического, горизонта). Эта плоскость является основной в горизонтальной системе астрономических координат, начало отсчета – точка севера N (рис. 4). Положение небесного тела M определяется двумя координатами: высотой h и азимутом A . Угловое расстояние z небесного тела от зенита Z называется зенитным расстоянием:

$$z = 90^\circ - h; \quad (1.1)$$

оно отсчитывается от 0° до 180° и равно дополнению высоты небесного тела до 90° .

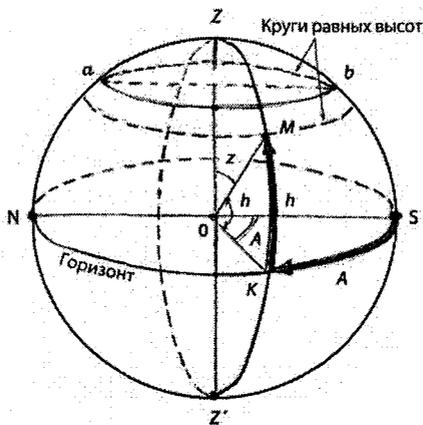


Рис. 4. Горизонтальная система небесных координат.

Азимут небесного тела A отсчитывают на любой широте от точки севера N в сторону вращения небесной сферы, по направлению к востоку. Азимут может иметь любое значение от 0 до 360° .

Высота небесного тела отсчитывается от 0 до 90° в обе стороны от истинного горизонта.

Обе горизонтальные координаты небесного тела непрерывно изменяются вследствие вращения Земли.

Определение времени и положения наблюдателя на земном шаре (ориентировка) требуют измерения горизонтальных координат путем наблюдений.

Линия PP' , параллельная земной оси и проходящая через центр O небесной сферы (см. рис. 1), называется осью мира. Перпендикулярная оси мира плоскость называется плоскостью небес-

ного экватора; она параллельна плоскости земного экватора. Различают две экваториальные системы астрономических координат: первую и вторую. Основной плоскостью обеих систем является плоскость небесного экватора $QWQ'E$ (рис. 5). Началом отсчета в первой системе координат является точка Q – верхняя точка пересечения небесного экватора с небесным меридианом, а началом отсчета во второй экваториальной системе служит точка весеннего равноденствия γ .

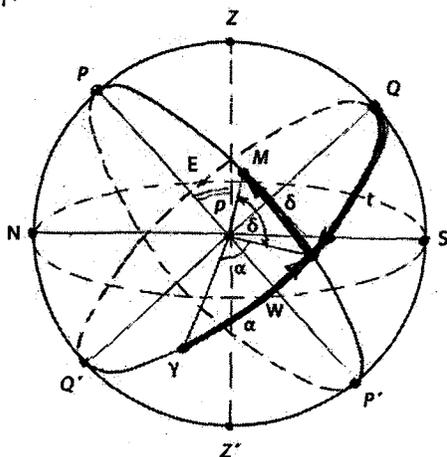


Рис. 5. Экваториальные системы небесных координат

В первой экваториальной системе положение небесного тела определяется часовым углом t (изменяется от 0 до 360°) и склонением δ (отсчитывается от экватора в пределах от 0 до $\pm 90^\circ$); иногда вместо склонения δ используется полярное расстояние p :

$$p = 90^\circ - \delta, \quad (1.2)$$

другими словами – расстояние небесного тела от Северного полюса мира.

Во второй экваториальной системе одной из координат является то же склонение δ , а другой координатой служит прямое восхождение α , отсчитываемое по экватору от точки весеннего равноденствия в пределах от 0 до 360° или (в часовой мере) от 0 до 24 ч.

Координаты небесных светил (звезд) в экваториальных системах координат практически являются неизменными. В первой эк-

верхности и местоположения летательных аппаратов, моментов восхода и захода светил и т. п.), основаны, в конечном счете, на рассмотрении положений различных небесных тел в определенных системах небесных сферических координат, поскольку сложная фигура Земли – геоид – заменяется при этом не сфероидом (как это делается в геодезических исследованиях), а принимается за шар с равномерно распределенными в нем массами. Процесс решения задач сводится к анализу сферических треугольников (рис. 7).

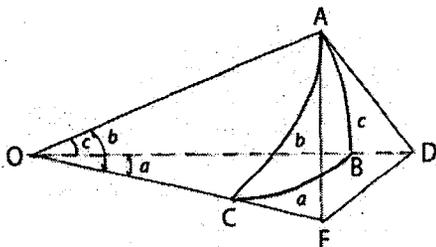


Рис. 7. Сферический треугольник

Сферическим треугольником называют геометрическую фигуру, образованную на поверхности сферы соединением трех точек дугами трех больших кругов, центры которых совпадают с центром сферы. Дуги больших кругов (a , b , c), соединяющие вершины сферического треугольника, называются его сторонами, а сферические углы (A , B , C) при вершинах – его углами.

В сферической геометрии для сферического треугольника со сторонами и углами меньше 180° обоснованы следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} 0^\circ < a + b + c < 360^\circ, \\ a < b + c, \\ c > a - b, \\ \frac{a + b + c}{2} > b, \\ 180^\circ < A + B + C < 540^\circ, \\ A + B - C < 180^\circ. \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

Углы и стороны сферического треугольника в этих соотношениях могут рассматриваться и в других сочетаниях.

Для получения надежных и точных результатов при решении прикладных задач практической астрономии используют параллактический треугольник (рис. 8).

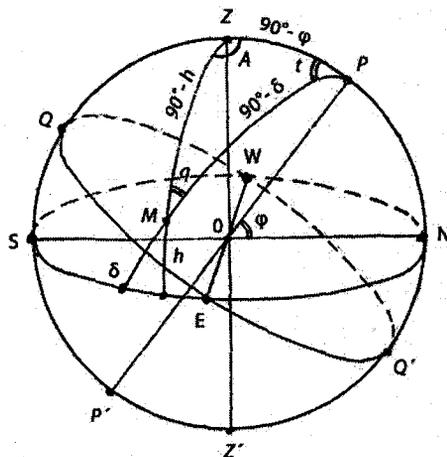


Рис. 8. Параллактический треугольник

Параллактическим на небесной сфере называется сферический треугольник, вершинами которого являются Северный полюс мира P , зенит Z места наблюдения и местоположение небесного тела M (объекта изучения).

Этот треугольник связывает экваториальные координаты небесного тела с горизонтальными, и путем его решения осуществляется взаимный переход (преобразование) от одной системы координат к другой, причем для метеорологических целей элементы параллактического треугольника вычисляются с точностью до $1''$ или $0,1'$.

Контрольные вопросы

1. Что такое небесная сфера и зачем нужно это понятие?
2. Назовите основные точки, линии и круги на небесной сфере.
3. Что такое полуденная линия и небесный меридиан?
4. Что называется кульминациями?
5. Почему на небесной сфере возможны только угловые измерения?
6. В чем различие между горизонтальными и экваториальными астрономическими координатами?
7. Охарактеризуйте зависимость между географическими и астрономическими координатами.

8. Что называют сферическим треугольником?
9. Охарактеризуйте соотношения между сторонами и углами сферического треугольника.
10. Что такое параллактический треугольник?

Задачи

- 1.1. Постройте на модели небесной сферы горизонтальные координаты какого-либо небесного тела.
- 1.2. Постройте модель небесной сферы с экваториальными координатами какого-нибудь небесного тела.
- 1.3. Постройте одновременно горизонтальные и экваториальные координаты одного и того же небесного тела на модели сферы, укажите параллактический треугольник и назовите его элементы.
- 1.4. Каково в градусах расстояние от зенита до точек востока, юга?
- 1.5. Широта местности 35° . На сколько градусов полюс отстоит там от зенита?
- 1.6. Широта местности 57° . На каком расстоянии от зенита меридиан пересекается там с экватором?
- 1.7. Широта Мурманска 69° . Можно ли там видеть над горизонтом звезду Сириус (самую яркую на небе), если ее склонение $\delta = -16^\circ$?
- 1.8. Построить небесную сферу и графически определить искомые величины по заданным значениям небесных координат:

№ п/п	Задано	Найти
1.8.1	$\varphi = 60^\circ\text{N}, h = 45^\circ, A = 315^\circ$	δ, t
1.8.2	$\varphi = 60^\circ\text{N}, h = 30^\circ, A = 110^\circ$	δ, t
1.8.3	$\varphi = 38^\circ\text{N}, h = 47^\circ, A = 104^\circ$	δ, t
1.8.4	$\varphi = 57^\circ\text{N}, h = 38^\circ, A = 74^\circ$	δ, t
1.8.5	$\varphi = 45^\circ\text{N}, \delta = 47^\circ\text{N}, t = 257^\circ$	h, A
1.8.6	$\varphi = 52^\circ\text{N}, \delta = 15^\circ\text{S}, t = 66^\circ$	h, A
1.8.7	$\varphi = 60^\circ\text{S}, \delta = 50^\circ\text{S}, t = 105^\circ$	h, A

- 1.9. На модели небесной сферы построить по заданным координатам параллактический треугольник, определить исходные формулы для вычисления неизвестных элементов и решить треугольник:
 - 1.9.1. $\varphi = 64^\circ 23' 58''\text{S}, \delta = 52^\circ 40' 25''\text{S}, t = 103^\circ 47' 21''$. Вычислить h .
 - 1.9.2. $\varphi = 55^\circ 45' 20''\text{N}, \delta = 10^\circ 56' 31''\text{N}, t = 297^\circ 45' 15''$. Вычислить A .
 - 1.9.3. $\varphi = 59^\circ 51' 32''\text{N}, \delta = 38^\circ 44' 42''\text{N}, h = 55^\circ 31' 20''$. Вычислить t, A .
 - 1.9.4. $\varphi = 64^\circ 23' 58''\text{N}, h = 10^\circ 12' 30'', A = 195^\circ 21' 45''$. Вычислить δ, t .
 - 1.9.5. $\varphi = 55^\circ 32' 01''\text{N}, \delta = 45^\circ 57' 24''\text{N}, A = 270^\circ$. Вычислить h, t .
- 1.10. По заданным условиям построить модель небесной сферы и вычислить искомые величины. Значения t и A даны по круговому счету.

№ п/п	Задано	Найти
1.10.1	$\varphi = 50^\circ 27' 12''\text{N}, \delta = 28^\circ 51' 26''\text{N}, t = 105^\circ 21' 06''$	h, A
1.10.2	$\varphi = 46^\circ 28' 37''\text{N}, \delta = 8^\circ 15' 12''\text{S}, t = 63^\circ 27' 35''$	h, A
1.10.3	$\varphi = 34^\circ 55' 38''\text{S}, \delta = 57^\circ 27' 09''\text{S}, t = 293^\circ 38' 29''$	h, A

1.10.4	$\varphi = 41^{\circ}45'18''N, \delta = 28^{\circ}34'18''N, h = 33^{\circ}21'16''$	t, A
1.10.5	Небесное тело в восточной половине небесной сферы $\varphi = 59^{\circ}46'19''N, \delta = 9^{\circ}41'11''S, h = 17^{\circ}42'48''$	t, A
1.10.6	Небесное тело в западной половине небесной сферы $\varphi = 37^{\circ}57'24''N, h = 42^{\circ}37'15'', A = 304^{\circ}19'42''$	δ, t
1.10.7	$\varphi = 33^{\circ}56'02''S, h = 39^{\circ}27'51'', A = 62^{\circ}42'13''$	δ, t
1.10.8	$\varphi = 65^{\circ}14'30''S, h = 35^{\circ}48'37'', A = 146^{\circ}52'09''$	δ, t
1.10.9	$\varphi = 55^{\circ}50'20''N, \delta = 23^{\circ}15'48''N, A = 90^{\circ}$	h, t
1.10.10	Небесное тело на западной стороне горизонта $\varphi = 39^{\circ}08'02''N, \delta = 16^{\circ}39'40''S, h = 0^{\circ}$	t, A

Примечание. При решении задач 1.10.7 и 1.10.8, перейдя к полукруговому счету, следует принять $A = 117^{\circ}17'47''SE$ и $A = 33^{\circ}07'51''SE$ соответственно; для решения задачи 1.10.10, применяются соотношения (1.25) и (1.26) из методических указаний, которые при $h = 0^{\circ}, \sin h = 0, \cos h = 1$ принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \cos t &= -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta \\ \cos A &= \sec \varphi \sin \delta. \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

Материалы для работы

1. Модель (чертеж) небесной сферы.
2. Астрономический календарь (постоянная часть и ежегодник).
3. Таблицы тригонометрических функций и их логарифмов.
4. Калькулятор (или компьютер).

Рекомендуемая литература

1. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. – М: Наука, 1977; гл. 1, § 9–12, 28–29, 32.
2. Говердовский В.Ф. Космическая метеорология, ч. I. Спутниковая метеорология. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009.
3. Пятизначные таблицы логарифмов чисел и тригонометрических функций. – М.: Геодезиздат, 1957.

Порядок выполнения работы

1. Построить на листе бумаге модель (чертеж) небесной сферы и на ней большие круги, изображающие меридиан наблюдателя, истинный горизонт и небесный экватор (рис. 1) в перспективе, для наглядности. По задаваемым координатам на сферу нанести точку M , соответствующую положению небесного тела. Реперные точки севера N и юга S рекомендуется располагать относительно центра сферы так, чтобы небесное тело (искусственный спутник Земли) оказалось на передней половине сферы, перед плоскостью чертежа.

2. Четко обозначить параллактический треугольник (рис. 8), представляющий собой сферический треугольник на небесной сфере, вершинами которого являются полюс мира, зенит и местоположение небесного тела, а образуют его большие круги небесной сферы: меридиан наблюдателя, вертикал и круг склонения небесного тела (ИСЗ).

Для упрощения вычислений элементы параллактического треугольника (его углы и стороны) обычно рассматривают в пределах от 0 до 90°, переходя к полукруговому счету: для наблюдателя в Северном полушарии (при северной широте пункта наблюдения) счет азимутов ведется от 0 до 180° от начальной точки севера N к востоку или западу до вертикала небесного тела, в зависимости от той половины небесной сферы, на которой оно находится. В этом случае численное значение азимута сопровождается наименованием, состоящим из двух букв. Первая буква означает точку отчета, а вторая указывает полусферу (восточную или западную), на которой находится небесное тело.

Примеры перехода от одной системы счета азимутов к другой:

Счет азимута	
полукруговой	круговой
75°NE	75°
132°NE	132°
125°NW	235°
140°SW	320°
102°SE	78°

Необходимо также перейти от кругового счета (от 0 до 360°) часовых углов к их полукруговому счету, который ведется всегда от полуденной части меридиана наблюдателя к востоку или к западу от 0 до 180°, а численное значение часового угла обязательно сопровождать указанием направления счета: например, при круговом счете часовой угол $t = 310^\circ$ соответствует при полукруговом счете часовому углу $t = 50^\circ\text{E}$. Такое наименование часового угла указывает, на какой половине небесной сферы – западной или восточной – находится небесное тело. Если заданный по круговому счету часовой угол меньше 180°, то при переходе к полукруговому счету его численное значение сохраняется, а ему приписывается наименование W.

Если через точку, обозначающую небесное тело M , провести круг склонения, то по образовавшейся экваториальной системе координат нетрудно определить часовой угол и склонение небесного тела.

Этот способ рекомендуется апробировать в процессе решения задачи 1.8 (1.8.1–1.8.7) с точностью результатов порядка 1° .

2. Для получения точных результатов в определении местоположения небесного тела необходимо использовать сферический треугольник (астрономический или параллактический). С помощью сферических треугольников чаще всего осуществляется преобразование координат, т. е. вычисление сферических координат небесного тела в одной системе по сферическим координатам другой системы.

Формулы сферической тригонометрии позволяют по трем известным элементам сферического треугольника найти остальные его элементы, то есть решить треугольник.

Основными формулами сферической тригонометрии являются:

– для косоугольного сферического треугольника ABC (см. рис. 7)

формула синусов
$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C}; \quad (1.12)$$

формула косинусов
$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A, \quad (1.13)$$

$$\cos A = -\cos B \cos C + \sin B \sin C \cos a; \quad (1.14)$$

формула пяти элементов

$$\sin a \cos B = \cos b \sin c - \sin b \cos c \cos A, \quad (1.15)$$

$$\sin A \cos b = \cos B \sin C - \sin B \cos C \cos a; \quad (1.16)$$

формула четырех элементов

$$\operatorname{ctg} B \sin A = \operatorname{ctg} b \sin c - \cos c \cos A, \quad (1.17)$$

$$\operatorname{ctg} A \sin B = \operatorname{ctg} a \sin c - \cos c \cos B; \quad (1.18)$$

где A, B, C – углы сферического треугольника; a, b, c – противолежащие им стороны. Поменяв в (1.12)–(1.18) обозначение углов и сторон в порядке круговой перестановки, можно получить другие формулы сферической тригонометрии, аналогичные приведенным.

Круговой перестановкой называется такая перестановка, при которой буква a заменяется буквой b , буква c – буквой a .

Формулы для решения прямоугольного сферического треугольника (если угол $A = 90^\circ$, то $\sin A = 1$ и $\cos A = \operatorname{ctg} A = 0$) принимают иной вид:

$$\left. \begin{aligned} \sin b &= \sin a \sin B, \\ \sin c &= \sin a \sin C; \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

$$\cos a = \cos b \cos c; \quad (1.20)$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{ctg} B &= \operatorname{ctg} b \sin c, \\ \operatorname{ctg} C &= \operatorname{ctg} c \sin b; \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

$$\left. \begin{aligned} \cos B &= \operatorname{ctg} a \operatorname{ctg} c, \\ \cos C &= \operatorname{ctg} a \operatorname{ctg} b. \end{aligned} \right\} \quad (1.22)$$

3. Для решения параллактического треугольника применяются преобразованные формулы сферической тригонометрии. Выбранную формулу необходимо исследовать на знаки по исходным данным, чтобы установить знаки слагаемых формулы и величину искомого угла. При этом следует иметь в виду, что широта независимо от ее наименования, высота небесного тела и одномерное с широтой склонение считаются дугами первой четверти, а разномышенное с широтой склонение – дугой четвертой четверти.

а) Вычисление высоты h небесного тела по заданным широте φ места наблюдения, склонению δ и часовому углу t небесного тела.

Для решения задачи выбирается формула косинуса стороны (1.13), которая применительно к параллактическому треугольнику (см. рис. 8) принимает вид:

$$\cos(90^\circ - h) = \cos(90^\circ - \varphi) \cos(90^\circ - \delta) + \sin(90^\circ - \varphi) \sin(90^\circ - \delta) \cos t$$

или

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t. \quad (1.23)$$

Например: определить h , если $\varphi = 55^\circ 45' 20'' \text{N}$, $\delta = 10^\circ 56' 31'' \text{S}$, $t = 297^\circ 45' 15''$.

Исследование формулы:

$$\sin h = \overset{+}{\sin \varphi} \overset{-}{\sin \delta} + \overset{+}{\cos \varphi} \overset{+}{\cos \delta} \overset{+}{\cos t} = -I + II.$$

Слагаемые правой части соотношения обозначены через I и II.

Решение производится по соответствующим разделам справочника «Пятизначные таблицы логарифмов чисел и тригонометрических функций» или с помощью калькулятора. Ответ: $h = 5^{\circ}45'39''$.

б) Вычисление азимута A небесного тела по заданным широте φ места наблюдения, склонения δ и часовому углу t небесного тела.

Используется формула четырех элементов (1.18), которая применительно к параллактическому треугольнику (рис. 8) принимает вид:

$$\operatorname{ctg} A \sin t = \operatorname{ctg}(90^{\circ} - \delta) \sin(90^{\circ} - \varphi) - \cos(90^{\circ} - \varphi) \cos t$$

$$\text{или} \quad \operatorname{ctg} A \sin t = \operatorname{tg} \delta \cos \varphi - \sin \varphi \cos t,$$

$$\text{откуда} \quad \operatorname{ctg} A = \cos \varphi \operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} t - \sin \varphi \operatorname{ctg} t. \quad (1.24)$$

в) Вычисление часового угла t и азимута A небесного тела по заданным широте φ места наблюдения, склонению δ и высоте h небесного тела.

Для вычисления часового угла t небесного тела используется формула (1.23), которая приводится к виду:

$$\cos t = \sec \varphi \sec \delta \sin h - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta. \quad (1.25)$$

Для вычисления азимута A небесного тела используется формула косинуса стороны параллактического треугольника:

$$\cos(90^{\circ} - \delta) = \cos(90^{\circ} - \varphi) \cos(90^{\circ} - h) + \sin(90^{\circ} - \varphi) \sin(90^{\circ} - h) \cos A$$

$$\text{или} \quad \sin \delta = \sin \varphi \sin h + \cos \varphi \cos h \cos A,$$

$$\text{откуда} \quad \cos A = \sec \varphi \sin \delta \sec h - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} h. \quad (1.26)$$

В условиях такой задачи должно быть указано, в какой половине небесной сферы (восточной или западной) наблюдалось данное небесное тело, иначе получаются два решения.

г). Вычисление склонения δ и часового угла t по заданным широте φ места наблюдения, высоте h и азимуту A небесного тела.

Склонение δ небесного тела рассчитывается по формуле:

$$\sin \delta = \sin \varphi \sin h + \cos \varphi \cos h \cos A. \quad (1.27)$$

Для вычисления часового угла t исходной является формула четырех элементов (1.17), которая для параллактического треугольника в этом случае принимает вид:

$$\operatorname{ctg} t \sin A = \operatorname{ctg}(90^\circ - h) \sin(90^\circ - \varphi) - \cos(90^\circ - \varphi) \cos A$$

или
$$\operatorname{ctg} t \sin A = \operatorname{tg} h \cos \varphi - \sin \varphi \cos A,$$

откуда
$$\operatorname{ctg} t = \cos \varphi \operatorname{tg} h \operatorname{cosec} A - \sin \varphi \operatorname{ctg} A \quad (1.28)$$

д) Вычисление высоты h и часового угла t небесного тела по заданным широте φ места наблюдения и склонению δ этого небесного тела при нахождении его на первом вертикале.

Первым вертикалом называется вертикал, проходящий через точки востока E и запада W .

Для решения задачи исходными формулами служат формулы (1.27) и (1.24):

$$\sin \delta = \sin \varphi \sin h + \cos \varphi \cos h \cos A,$$

и
$$\operatorname{ctg} A = \cos \varphi \operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} t - \sin \varphi \operatorname{ctg} t.$$

При $A = 90^\circ$, с одной стороны, $\cos A = \operatorname{ctg} A = 0$ и для прямоугольного параллактического треугольника из этих формул (1.27) и (1.24) получают:

$$\left. \begin{aligned} \sin h &= \operatorname{cosec} \varphi \sin \delta, \\ \cos t &= \operatorname{ctg} \varphi \operatorname{tg} \delta. \end{aligned} \right\} \quad (1.29)$$

С другой стороны, формула синусов (1.12) применительно к параллактическому треугольнику может быть записана в виде:

$$\sin(90^\circ - h) \sin A = \sin(90^\circ - \delta) \sin t$$

или
$$\cos h \sin A = \cos \delta \sin t. \quad (1.30)$$

Тогда при $A = 90^\circ$, $\sin A = 1$ и из формулы (1.30) для контроля вычислений получают соотношение:

$$\cos h = \cos \delta \sin t. \quad (1.31)$$

Лабораторная работа 2

Время и его измерение при изучении Земли из космоса

Цель работы: выяснить сущность времени и особенностей практического использования различных систем его счета для временной привязки результатов дистанционного зондирования Земли из космоса.

Любое явление, происходящее в пространстве, не просто существует во времени, но имеет в нем определенную длительность. Течение времени на Земле человек издавна воспринимает как периодическую смену дней и ночей, времен года.

В ходе познания окружающего мира чаще всего возникают два вопроса: когда произошло то или иное событие и как долго оно продолжается во времени. Для получения ответа используют некоторую систему счета, основой которого является неизменная и удобная в практическом отношении единица времени.

Естественные единицы времени устанавливает сама природа с помощью стабильно периодических и длительных процессов (например, вращение Земли вокруг своей оси или обращение ее вокруг Солнца). С такими единицами согласовываются искусственно создаваемые единицы времени.

Орбиты метеорологических спутников Земли должны обеспечивать четкую периодичность и детальность обзора полосы земной поверхности, оптимальные условия для дистанционного зондирования или космической съемки (скажем, освещенность солнечным светом района исследования), определенное время функционирования аппаратуры в заданном режиме и т.п. Поэтому в спутниковой метеорологии вопросы измерения времени имеют особо важное значение. Так, например, для обеспечения временной привязки данных дистанционного зондирования, под которой обычно понимают определение момента времени измерения излучения, используют систему бортового единого времени (БЕВ), генерирующую последовательность постоянных по частоте следования и точности номинального значения электрических импульсов,

замешиваемых в непрерывную запись (регистрограмму) флуктуаций излучения исследуемых естественных объектов, явлений или процессов. Время начала регистрации соотносят с моментом пролета спутника над конкретным географическим пунктом, определяемым по общепринятой системе счета времени (например, по московскому декретному времени).

Особенности измерения времени

Звездное время. Непосредственно из наблюдений определяется звездное время – часовой угол точки весеннего равноденствия, равномерно изменяющийся с течением времени для данного наблюдателя (рис. 10). Счет звездного времени S и часовых углов одинаково ведется от положения верхней кульминации точки весеннего равноденствия, которая вместе со всей небесной сферой участвует в видимом вращении, смещаясь по своей суточной параллели – небесному экватору. Поэтому для любой точки земной поверхности имеет место равенство

$$S = t_{\gamma}, \quad (2.1)$$

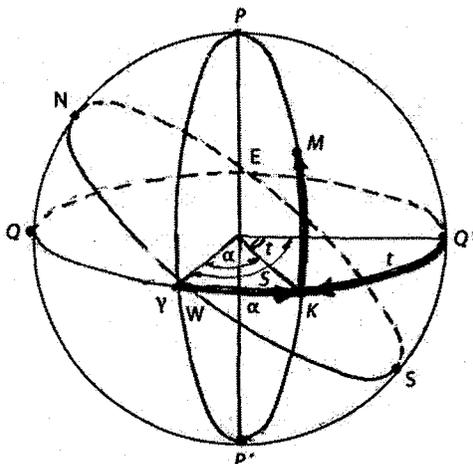


Рис. 10. Местное звездное время

то есть местное звездное время S в данный момент численно равно часовому углу t_{γ} точки весеннего равноденствия, выраженному

в часовой мере. Если точка M (рис. 10) определяет положение какой-то звезды на небесной сфере в момент звездного времени S , то

$$S = t + \alpha, \quad (2.2)$$

где α – прямое восхождение.

Формула (2.2) называется основной формулой звездного времени.

Практически неизменный период вращения Земли* вокруг своей оси и удобство его использования лучше всего удовлетворяет практическим требованиям измерения времени, поэтому за единицу времени и приняты сутки.

Основные единицы звездного времени – звездные сутки и тропический год – определяются вращением Земли вокруг своей оси и обращением её вокруг Солнца.

Перевод астрономических величин из градусной меры в часовую и обратно осуществляется по следующим соотношениям:

1 ч соответствует 15° ,	1° соответствует 4 мин,
1 мин соответствует $15'$,	$1'$ соответствует 4 с,
1 с соответствует $15''$	$0,1'$ соответствует 0,4 с,
	$1''$ соответствует $1/15$ с

так как за 24 ч часовой угол t светила (звезды) изменяется на 360° .

В момент верхней кульминации светила, то есть при $t = 0$ можно записать:

$$S = \alpha \quad (2.3)$$

или звездное время верхней кульминации небесного тела численно равно его прямому восхождению.

Точные значения звездного времени вычисляются по географической долготе λ места наблюдения и по звездному времени S_0 в среднюю гринвичскую полночь, значения которого на каждый день года приводятся в солнечных эфемеридах астрономических календарей-ежегодников.

Собственной даты звездное время не имеет, поэтому при его определении принято указывать: «тех же суток», «предыдущих суток» или «последующих суток».

* Строго говоря, вращение Земли не идеально равномерно из-за векового замедления вращения вследствие приливного течения в ее коре, отчего сутки увеличиваются на 0,0016 с в столетие.

Солнечное время. В практической жизни звездное время неудобно, так как оно не согласуется со сменой дня и ночи. Солнце перемещается по отношению к звездам с запада на восток, то есть отстает от звезд в своем видимом движении вокруг оси мира за сутки на угол, равный $360/365$ градуса. Небесная сфера на такой угол повернется за время 3 мин 56,56 с. Следовательно, солнечные сутки почти на 4 мин длиннее звездных суток.

Истинное солнце движется по эллиптике неравномерно, вследствие чего продолжительность истинных солнечных суток, определяемая как промежуток времени между двумя последовательными верхними кульминациями центра Солнца, в течение года меняется. Поэтому на практике употребляется среднее солнечное время; средние солнечные сутки равны промежутку времени между двумя последовательными верхними (или нижними) кульминации среднего солнца.

Среднее экваториальное солнце – это фиктивная точка, движущаяся равномерно по небесному экватору и совершающая один оборот в течение тропического года*.

Разность η между средним и истинным солнечным временем

$$\eta = t_m - t_o = \alpha - \alpha_m = T_m - T_o \quad (2.4)$$

называется уравнением времени, причем часовые углы t_o и t_m , прямое восхождение α_o и α_m истинного и среднего солнца, истинное T_o и среднее T_m солнечное время выражены в часовой мере. Уравнение времени в течение года изменяется и может иметь как положительные, так и отрицательные значения; в астрономических календарях оно приводится на каждый день или может быть представлено в виде графика.

Среднее солнечное время T_m на данном меридиане в любой момент численно равно

$$T_m = t_m + 12 \text{ [ч]}, \quad (2.5)$$

поскольку среднее солнечное время измеряется от момента нижней кульминации среднего солнца, а его часовые углы t_m измеряются от противоположной, полуденной части меридиана наблюда-

* Тропический год – промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра Солнца через точку весеннего равноденствия, равный 365,2422 средних суток и соответствующий периоду смены времен года.

теля. Длительное время при астрономических наблюдениях момент верхней кульминации среднего солнца принимали за начало средних суток, определяя астрономическое и гражданское (отсчитываемое от полуночи) среднее время. Начиная с 1925 г. астрономы стали считать среднее время от полуночи и надобность в терминах «астрономическое время» и «гражданское время» отпала. Моменты среднего времени обязательно должны сопровождаться указанием даты, так как календарный счет ведется в средних сутках.

Средние солнечные сутки, как и звездные сутки, делятся на средние солнечные и звездные (соответственно) часы, минуты и секунды.

Средние сутки и их доли (24 средних часа; час делится на 60 средних минут, средняя минута – на 60 средних секунд) являются общепринятыми единицами времени в науке, технике и повседневной жизни людей.

Системы счета времени

Местное время и долгота. Время, измеренное на данном географическом меридиане, называется местным временем этого меридиана. Оно зависит от географической долготы места. Для всех мест на одном и том же меридиане часовой угол точки весеннего равноденствия (или Солнца, или среднего экваториального солнца) в какой-либо момент один и тот же. Поэтому на всем географическом меридиане местное время (звездное, солнечное) в один и тот же момент одинаково. Разность местного времени двух мест равна разности долгот этих мест.

Раньше местное время было принято в обыденной жизни, но с конца XIX века стало заменяться в большинстве стран поясным временем. Однако выбор момента запуска спутника на солнечно-синхронную орбиту, для которой условия освещенности солнцем подспутниковой полосы поверхности Земли остаются неизменными в течение длительного периода, производится по местному времени.

Поясное время. В основе международной системы счета времени лежит деление поверхности земного шара на 24 пояса географическими меридианами, расположенными друг от друга по долготе точно через 15° (или 1 ч) посередине каждого часового

пояса. Границы часовых поясов точно следуют по географическим меридианам лишь в открытых морях и океанах и в ненаселенных местах суши. На остальном своем протяжении они идут по государственным, административно-хозяйственным или географическим границам, отступая от соответствующего географического меридиана. Часовые пояса пронумерованы от 0 до 23. За нулевой принят пояс, через середину которого проходит гринвичский меридиан. Основной меридиан первого часового пояса расположен от гринвичского точно на 15° к востоку, второго – на 30° и т.д. Местное среднее солнечное время основного меридиана какого-либо часового пояса называется поясным временем, по которому и ведется счет времени на всей территории, лежащей в данном часовом поясе. На центральных (основных) меридианах часовых поясов, в том числе и на гринвичском меридиане, поясная полночь и поясной полдень наступают одновременно со средними.

Местное среднее солнечное время гринвичского (нулевого) меридиана называется всемирным временем. Так называемое среднеевропейское время является временем первого часового пояса.

В США и Великобритании поясное время называют стандартным временем (Standard times), в Европе – мировым временем (Welt Zeit, Universal temps).

Декретное и сезонное время. В целях рационального распределения электроэнергии и наиболее полного использования дневного света в летние месяцы во многих странах переводят стрелки часов, идущих по поясному времени, на один час вперед. Перевод осуществляется специальным правительственным распоряжением (декретом). В некоторых странах периодически еще вводится так называемое сезонное время: примерно с конца октября до конца марта там действует поясное время, а в другое полугодие стрелки переводят на один час вперед.

Эфемеридное время. Исследования показали, что Земля вращается не вполне равномерно, обладая весьма малыми, скачкообразными вековыми и сезонными изменениями скорости вращения, что для обыденной жизни значения не имеет. Однако для нужд научных исследований было введено понятие равномерно текущего времени, которое называется ньютоновским, или эфемеридным, временем. За единицу измерения эфемеридного времени в нем

принята эфемеридная секунда, равная $1/31556295,9747$ части тропического года (знаменатель есть число секунд в тропическом году эпохи 1900).

Положение небесных тел в системе всемирного (неравномерного) времени вычисляют по разности ΔT между эфемеридным временем TE и всемирным T_0 . Точное значение этой разности может быть получено лишь для прошедших моментов времени (например, из сравнения наблюдаемых координат Луны с ее вычисленными координатами). Разность ΔT была равна нулю в 1900 г., и этот год в астрономии принят за начало эпохи 1900*. Другими словами, начало шкалы эфемеридного времени совпадает с полуднем 31 декабря 1899 г., когда средняя тропическая долгота Солнца была равна $279^\circ 41' 48,04''$.

Атомное время. Система атомного времени устанавливает принципиально новую, не зависящую от вращения Земли, шкалу времени: единицей этого времени является атомная секунда, определяемая как продолжительность 9 192 631 770 периодов колебаний излучения, соответствующего резонансной частоте перехода между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атомов изотопа цезия-133. Атомное время является основой для изучения периодической неравномерности вращения Земли вокруг своей оси.

Необходимо подчеркнуть, что все моменты времени, если нет специальных оговорок, всегда задаются в системе счета, принятой в данной стране. Моменты времени в других системах отсчета всегда оговариваются.

В каждой системе счета времени (кроме звездной) имеется своя полночь (начало суток) и свой полдень (середина суток), которые на одном географическом меридиане наступают в различные физические моменты времени. Последовательность наступления одноименных моментов времени в различных системах счета зависит от географической долготы λ места, его принадлежности к определенному часовому поясу n и от значения уравнения времени в данный день года.

* Астрономическая эпоха (гр. *epochē* – остановка) – момент времени, для которого дается значение какой-либо величины, меняющейся со временем и определяющей положение небесного тела или ориентировку координатной системы.

Смена календарной даты всегда происходит в полночь принятой системы счета времени.

Контрольные вопросы

1. Что такое звездное время?
2. Что такое звездные сутки?
3. Что такое истинный полдень и как определяется продолжительность истинных солнечных суток?
4. Что короче: солнечные сутки или звездные и на сколько?
5. Почему продолжительность истинных солнечных суток меняется?
6. Что такое среднее солнечное время?
7. Поясните понятие «уравнение времени»; как оно меняется?
8. Какое время называется местным?
9. В чем состоит поясной счет времени?
10. Поясните понятие «всемирное время» и «среднеевропейское время».
11. Что такое декретное и сезонное время?
12. Дайте определение понятию «тропический год».
13. Дайте определение понятию «звездный год».
14. Что такое эфемеридное время?
15. Объясните понятие «атомное время».

Задачи

- 2.1. Дан угол $18^{\circ}15'12''$. Выразить его величину в единицах времени.
- 2.2. Выразить в часах, минутах и секундах дугу $48^{\circ}50'41''$.
- 2.3. Выразить угол $272^{\circ}32'15''$ в единицах времени.
- 2.4. Величина дуги выражена в единицах времени и равна 3 ч 42 мин 7,8 с. Найти величину этой дуги в градусной мере.
- 2.5. Выразить в градусной мере углы 16 ч 12 мин 3,4 с и 0 ч 40 мин 2,8 с.
- 2.6. Найти звездное время в моменты восхода и захода точек равноденствий, в моменты обеих кульминаций других основных точек эклиптики и указать момент, принимаемый за начало звездных суток.
- 2.7. Дано: $S = 3$ ч 45 мин и $\alpha = 12$ ч 47 мин. Определить t .
- 2.8. Дано: $S = 6$ ч 18 мин и $t = 284^{\circ}33'$. Определить α .
- 2.9. Дано: $t = 121^{\circ}45'$ и $\alpha = 5$ ч 13 мин. Определить S .
- 2.10. Спутник был замечен на станции наблюдения с долготой λ в момент t часов по московскому времени. Звездное время в Гринвиче в полночь, предшествующую этому моменту наблюдения, составляло S_0 градусов. Каково было звездное время на станции в момент наблюдения спутника?
- 2.11. Долгота Смоленска $\lambda = 32^{\circ}$, спутник наблюдался в 20 ч 7 мая 1960 г. Звездное время в Гринвиче в полночь с 30 апреля на 1 мая составляло $217,94^{\circ}$. Найти звездное время в Смоленске в момент наблюдения спутника.
- 2.12. Определить звездное время на станции наблюдения за ИСЗ, долгота которой $\lambda = 115^{\circ}30'45''$ E, соответствующее 10 ч 27 мин 12 с местного среднего солнечного времени 25 января 1967 г.

- 2.13. Определить среднее солнечное время на станции наблюдения за ИСЗ ($\lambda = 83^{\circ}41'30''$ E), соответствующее звездному времени 19 ч 17 мин 42 с в Киеве ($\lambda = 30^{\circ}30'15''$ E) 5 мая 1967 г.
- 2.14. Определить среднее солнечное время и истинное солнечное время в Омске ($\lambda = 73^{\circ}22'30''$ E) 1 сентября 1967 г., соответствующее местному звездному времени 21 ч 16 мин 44 с.
- 2.15. Пользуясь графиком уравнения времени (рис. 11), определить приближенно момент среднего времени, соответствующий моменту истинного солнечного времени 14 ч 16 мин 15 августа.
- 2.16. Определить по графику (рис. 11), на сколько минут средняя полночь наступит раньше или позже истинной полночи 1 марта, 14 апреля, 25 октября и 25 декабря.
- 2.17. Найти момент истинного времени, соответствующий моменту среднего времени 14 ч 24 мин 2 августа.
- 2.18. Сколько должны показывать в гринвичский средний полдень 12 сентября часы в Ярославле ($\lambda = 39^{\circ}51'15''$): а – по среднему времени; б – по истинному солнечному времени; в – по декретному времени?
- 2.19. В Казани ($\lambda = 3$ ч 16 мин) часы, идущие по декретному времени, показывают 16 ч 40 мин. Сколько в этот момент должны показывать часы по местному среднему солнечному времени?
- 2.20. Сколько должны показывать во Владивостоке ($\lambda = 8$ ч 47 мин 30 с) в местный истинный полдень часы, идущие по местному среднему времени 20 октября?
- 2.21. Метеорологическая станция находится на долготе $\lambda = 126^{\circ}20'$ в IX поясе. Чему равна разность местного и поясного времени?
- 2.22. Станция слежения за ИСЗ находится во II поясе на долготе 2 ч 37 мин. Часы, идущие по местному среднему времени, 15 мая показывают 5 ч 30 мин 30 с. Чему равно в этот момент декретное время станции?
- 2.23. Долгота автономного пункта приема информации $\lambda = 3$ ч 40 мин. Часы, идущие по местному времени, показывают 19 ч 01 мин. Сколько в этот момент по гринвичскому среднему времени?
- 2.24. Чему равно поясное время IV пояса, соответствующее гринвичскому поясному времени 8 ч 55 мин?
- 2.25. Поясное время VII пояса равно 14 ч 10 мин. Сколько в этот момент по гринвичскому поясному времени?

Материалы для работы

1. Модель (чертеж) небесной сферы.
2. Географический глобус
3. Астрономический календарь (постоянная часть и ежегодник)
4. Графическая иллюстрация уравнения времени
5. Таблицы тригонометрических функций и их логарифмов.
6. Калькулятор (или компьютер)

Рекомендуемая литература

1. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. – М.: Наука, 1977; гл. 1, § 18–24.
2. Говердовский В.Ф. Космическая метеорология, ч. I. Спутниковая метеорология. – СПб.: изд. РГТУ, 2009.
3. Пятизначные таблицы логарифмов чисел и тригонометрических функций. – М.: Геодиздат, 1957.

Порядок выполнения работы

1. Рассмотреть условия поставленной преподавателем задачи, при необходимости интерпретируя их с помощью модели (чертежа) небесной сферы или географического глобуса.

Так, например, изучая с помощью модели небесной сферы изменение часового угла точки весеннего равноденствия, можно определить и запомнить значения звездного времени в моменты верхней и нижней кульминации всех основных точек эклиптики, одновременно обращая внимание на их взаимное расположение относительно истинного горизонта в указанные моменты времени. Аналогичным образом различие звездного времени и последовательность наступления его одинаковых моментов на различных географических меридианах могут быть наглядно представлены с помощью географического глобуса, если на различных его меридианах укрепить обыкновенные булавки. Выбрав произвольный отдаленный «ориентир», изображающий точку весеннего равноденствия (скажем, угол стола, на котором установлен географический глобус), и равномерно вращая глобус против часовой стрелки, можно заметить, как условная точка отсчета последовательно «пересекает» плоскости земных меридианов в направлении с востока на запад, причем ее угловые расстояния от плоскостей различных меридианов изменяются, но разность угловых расстояний всегда остается неизменной, равной разности долгот земных меридианов, а значит, и разности местного времени. Подобными способами можно изучать различные условия решаемой задачи.

2. Уяснить необходимость измерения времени для вычисления положения небесных тел не только средними, но и звездными единицами времени, так как именно звездное время связывает часовой угол и прямое восхождение в экваториальной системе координат. Различие в звездном, истинном и среднем солнечном вре-

мени также наглядно демонстрируется на модели (чертеже) небесной сферы.

Видимое положение небесного тела связано со звездным временем, но одни и те же физические моменты приходится выражать в различных системах счета времени или, как принято говорить, «переводить время» из одной системы в другую. Необходимость применения систем поясного и декретного времени, их связь со средним временем не требует разъяснений.

Среднее (местное), поясное и декретное время измеряются единицами среднего времени, которые продолжительнее соответствующих единиц звездного времени, а поэтому перевод времени возможен лишь при выражении его интервалов в единицах различных систем счета и при условии известного звездного времени в определенный момент календарных суток.

3. Выбрать способ решения, исходя из того, что для большинства задач достаточно знать уравнение времени на момент истинного гринвичского полдня. Однако если необходима более высокая точность решения, то значение уравнения времени следует интерполировать на интересующий момент времени. Перевод времени также удобнее всего осуществлять для гринвичского меридиана и по найденным моментам гринвичского времени вычислять моменты времени в различных системах счета и в других пунктах земной поверхности. Перевод интервалов времени осуществляется по таблицам, содержащимся в астрономических справочниках и ежегодниках.

4. Определить алгоритм (совокупность математических действий), предусматривающий особенности решений конкретной поставленной задачи. Например, особое внимание следует обратить на то, что звездное время в гринвичскую полночь не равно звездному времени в среднюю, а тем более в поясную или декретную полночь мест с географической долготой, отличной от географической долготы Гринвича, и т.п. Лишь при приближенном решении задач с точностью, не превышающей 2 мин, можно полагать звездное время в среднюю полночь какого-либо пункта равным звездному времени в гринвичскую полночь. Однако это допущение совершенно не относится к значению звездного времени в поясную или декретную полночь, так как расхождение в момен-

тах их наступления составляет один час, а по отношению к средней полночи это различие может достигнуть более полутора часов.

5. Решить поставленную задачу с соблюдением всех требований и условий, не забывая, например, что при решении задач на различные системы счета времени прежде всего необходимо четко определить исходные данные, часть которых отыскивается в справочниках, выписать их и представить в том виде, в каком они будут использованы в расчетных соотношениях. Ход решения рекомендуется записывать в определенной форме (столбцом, построчно с пояснениями и т. п.)

6. Проанализировать полученные результаты, оценив точность и достоверность решения и приняв во внимание допущения и ограничения. Произвести всестороннее исследование вычисленных величин, их закономерности, соответствия реальным условиям или условиям решаемой задачи.

Методические указания

1. Промежуток времени, в течение которого совершается один полный оборот небесной сферы вокруг оси мира, называется звездными сутками. За начало звездных суток принимается момент кульминации точки весеннего равноденствия.

Точные моменты звездного времени вычисляются по географической долготе λ места и по звездному времени S , в среднюю гринвичскую полночь, значения которого на каждый день даются в солнечных эфемеридах астрономических календарей-ежегодников. Зная S_0 , можно вычислить звездное время S на любом другом меридиане, если известна его долгота λ от гринвичского меридиана, выраженная в часах и долях часа. Так, на меридиане с долготой λ к востоку от Гринвича звездное время S в среднюю полночь будет меньше на величину

$$\lambda \frac{3 \text{ мин } 56,56 \text{ с}}{24 \text{ ч}},$$

так как средняя полночь на этом меридиане наступит раньше гринвичской полуночи на долготу λ_0^h (выраженной в часовой мере). Следовательно,

$$S = S_0 - \frac{\lambda_0^h}{24ч} \quad 3 \text{ мин } 56,56 \text{ с} \quad (2.6)$$

(долгота λ отсчитывается положительной к востоку от Гринвича).

Для приближенных расчетов, с точностью до 5 мин, звездное время S в среднюю полночь на любом меридиане можно вычислить по табл. 2.1

Таблица 2.1

Звездное время в среднюю полночь на различных меридианах

Дата	S , ч	Дата	S , ч	Дата	S , ч
Сентябрь 22	0	Январь 21	8	Май 23	16
Октябрь 22	2	Февраль 21	10	Июнь 22	18
Ноябрь 22	4	Март 23	12	Июль 23	20
Декабрь 22	6	Апрель 22	14	Август 22	22

Звездное время даты не имеет, поэтому при его определении принято указывать «тех же суток», «предыдущих суток», «последующих суток» и т. п.

Рассмотрим некоторые примеры определения звездного времени.

Пример. Звезда находится на меридиане. Часовой угол этой звезды равен $t = 182^\circ 30'$. Чему равно звездное время в данный момент?

Решение. Звезда находится на меридиане наблюдателя, значит точка весеннего равноденствия отстоит от меридиана на $182^\circ 30'$, или в единицах времени

$$S = \frac{182^\circ 30'}{15} = 12 \text{ ч } 10 \text{ мин}$$

Пример. Известно, что $t = 324^\circ 15'$, $\lambda = 18 \text{ ч } 54 \text{ мин}$. Определить S .

Решение. Заданный часовой угол t переводим из градусной меры в часовую и получаем $t = 21 \text{ ч } 37 \text{ мин}$. Из соотношения (2.2) находим ответ:

$$S = 21 \text{ ч } 37 \text{ мин} + 18 \text{ ч } 54 \text{ мин} - 24 \text{ ч} = 16 \text{ ч } 31 \text{ мин}$$

Заметим, что если сумма $(t + \alpha)$ получается больше 24 ч, то из полученного результата необходимо вычесть 24 ч.

Пример. Дано $S = 23 \text{ ч } 48 \text{ мин}$, $\alpha = 16 \text{ ч } 05 \text{ мин}$. Определить t .

Решение. Из формулы (2.2) следует, что $t = S - \alpha$, причем если по заданию $\alpha > S$, то к величине S необходимо прибавить 24 часа. Другими словами:

$$t = 23 \text{ ч } 48 \text{ мин} - 16 \text{ ч } 05 \text{ мин} = 7 \text{ ч } 43 \text{ мин}.$$

Переводя t из временной меры в градусную, находим ответ $t = 115^\circ 45'$.

2. Переход от звездного времени к среднему солнечному (и наоборот) приближенно осуществляется различными способами.

а) Для грубой оценки среднего времени, если известно звездное время, его надо уменьшить за сутки на 4 мин (округляя поправку 3 мин 56,56 с) за один час на $\frac{4 \text{ мин}}{24} = \frac{240 \text{ с}}{24} = 10 \text{ с}$, а за од-

ну десятую долю часа – 6 мин на одну секунду. Для «уточнения» вычисления следует полученный результат уменьшить на $1/60$ часть его.

Пример. Пусть звезда проходит через меридиан данного места в 10 ч 22 мин 12 с по звездному времени. Сколько в этот момент должны показывать часы, идущие по среднему времени?

Решение. Поскольку звездное время $S = 10 \text{ ч } 22 \text{ мин } 12 \text{ с}$, то за 10 ч получим уменьшение $10 \times 10 = 100 \text{ с}$,

за 22 мин получим уменьшение $22/6 = 3,6 \text{ с}$

Результат (главная поправка) 103,6 с.

Уменьшим результат на $1/60$ его часть, то есть на $\frac{103,6}{60} = 1,7 \text{ с}$

и получим вторую поправку. Общая поправка для перехода от звездного времени к среднему будет $103,6 - 1,7 = 101,9 \approx 102 = 1 \text{ мин } 42 \text{ с}$. Следовательно, по среднему времени будет 10 ч 20 мин 30 с.

Заметим, что при переходе от среднего времени к звездному главную поправку рекомендуется уменьшать не на $1/60$, а на $1/70$ ее часть.

б) Для более точного перевода промежутков среднего солнечного времени в промежутки звездного времени можно использовать коэффициент

$$K = \frac{366,2422}{365,2422} = 1,002738,$$

а для промежутков звездного времени в промежутки среднего солнечного времени – коэффициент

$$K' = \frac{365,2422}{366,2422} = 0,997270,$$

поскольку, какова бы ни была продолжительность тропического года, число суточных оборотов Солнца за этот промежуток времени будет на единицу меньше, чем число суточных оборотов точки весеннего равноденствия.

Таким образом, если промежуток времени в средних солнечных единицах обозначить как ΔT_m , а в звездных единицах как ΔS , то

$$\begin{aligned}\Delta S &= K\Delta T_m, \\ \Delta T_m &= K'\Delta S.\end{aligned}\tag{2.7}$$

Для перевода промежутков времени из средних единиц в звездные и наоборот имеются готовые таблицы в астрономическом ежегоднике и других астрономических справочниках (например, в Мореходных таблицах, Морском астрономическом ежегоднике и т.п.)

в) Перевод времени из звездных единиц в средние производится также по отношению

$$T_m = (S - S'_0) - v(S - S'_0),\tag{2.8}$$

где T_m – искомое среднее солнечное время; S – звездное время в данный момент; S'_0 – звездное время в местную среднюю полночь; $v(S - S'_0)$ – поправочный параметр, в котором коэффициент $v = 9,830$ с, а разность $(S - S'_0)$ выражена в часах и долях часа. Звездное время в местную полночь S'_0 определяется по формуле:

$$S'_0 = S_0 - \mu\lambda,\tag{2.9}$$

где S_0 – звездное время в среднюю гринвичскую полночь; $\mu\lambda$ – поправочный коэффициент, в котором $\mu = 9,856$ с, а долгота данного пункта λ выражена в часах и долях часа. Перевод времени из средних единиц в звездные производится по формуле:

$$S = S'_0 + T_m + \mu T_m \quad (2.10)$$

где T_m – среднее солнечное время в данный момент.

г) При отсутствии астрономического ежегодника время в среднюю гринвичскую полночь S_0 может быть определено приближенно, с ошибкой не более 0,2 мин, по формуле:

$$S_0 = S'_0 + \mu'k + \Delta, \quad (2.11)$$

где S'_0 – выбираемое из табл. 2.2 звездное время в среднюю гринвичскую полночь на первое число конкретного месяца (для января и февраля високосного года значение S'_0 должно выбираться из строчки, отмеченной жирной точкой •); k – число суток от первого числа месяца до данного числа, то есть заданное число, уменьшенное на единицу; $\mu' = 3,94$ мин; Δ – поправка на начало года, обусловленная тем, что звездный счет времени ведется независимо от календаря, а также разностью между продолжительностью тропического года и календарного года, равная для простого года + 0,2422 суток, а для високосного года – 0,7578 суток.

Таблица 2.2

Звездное время S'_0

Дата	S'_0	Дата	S'_0
Январь, 1	6 ч 39,2 мин	Июнь, 1	16 ч 34,5 мин
Январь, 1 •	6 ч 35,3 мин	Июль, 1	18 ч 32,8 мин
Февраль, 1	8 ч 41,4 мин	Август, 1	20 ч 35,0 мин
Февраль, 1 •	8 ч 37,5 мин	Сентябрь, 1	22 ч 37,3 мин
Март, 1	10 ч 31,8 мин	Октябрь, 1	0 ч 35,5 мин
Апрель, 1	12 ч 34,0 мин	Ноябрь, 1	2 ч 37,8 мин
Май, 1	14 ч 32,3 мин	Декабрь, 1	4 ч 36,0 мин

Пример. Определить среднее солнечное время в Москве ($\lambda = 37^{\circ}34'15''$ E) 1 октября 1967 г, соответствующее звездному времени $S = 7$ ч 15 мин 20 с.

Точное решение. Из астрономического ежегодника на 1967 г. определяем $S_0 = 9^{\circ}02,4'$ или $S_0 = 36$ мин 09,6 с. Долготу Москвы переводим во временную меру $\lambda = 2$ ч 30 мин 17 с E и выражаем ее в часах, то есть $\lambda_{\text{ч}} = 2,505$ ч. Умножив $\lambda_{\text{ч}}$ на $\mu = 9,856$ с, получим $\mu\lambda = 24,7$ с. По формуле (2.9) имеем:

$$S'_0 = S_0 - \mu\lambda = 36 \text{ мин } 09,6 \text{ с} - 24,7 \text{ с} = 35 \text{ мин } 44,9 \text{ с},$$

а затем $S - S_0 = 7 \text{ ч } 15 \text{ мин } 20 \text{ с} - 35 \text{ мин } 44,9 \text{ с} = 6 \text{ ч } 39 \text{ мин } 35,1 \text{ с}$.
Последнее значение в часах соответствует 6,660 ч, которое умножаем на $v = 9,830 \text{ с}$; откуда определяем $v(S - S_0) = 1 \text{ мин } 05,5 \text{ с}$.
Ответ получаем по выражению (2.8):

$$T_m = 6 \text{ ч } 39 \text{ мин } 35,1 \text{ с} - 1 \text{ мин } 05,5 \text{ с} = 6 \text{ ч } 38 \text{ мин } 29,6 \text{ с}.$$

Приближенное решение. При помощи табл. 2.2 по формуле (2.11) получаем:

$$S'_0 = 0 \text{ ч } 35,5 \text{ мин} + 3,94 \text{ мин} \times 0 + 0,6 \text{ мин} = 0 \text{ ч } 36,1 \text{ мин},$$

поскольку $k = 0$. Поправочный член $\mu\lambda$ определяют путем умножения $\mu \approx 10 \text{ с}$ на заданную долготу $\lambda^E \approx 2,5 \text{ ч}$, то есть $\mu\lambda = 10 \cdot 2,5 = 25 \text{ с} \approx 0,4 \text{ мин}$. По формуле (2,9) получают:

$$S_0 = 0 \text{ ч } 36,1 \text{ мин} - 0,4 \text{ мин} = 0 \text{ ч } 35,7 \text{ мин},$$

а затем $S - S_0 = 7 \text{ ч } 15,3 \text{ мин} - 0 \text{ ч } 35,7 \text{ мин} = 6 \text{ ч } 39,6 \text{ мин}$.

Поправочный член $v(S - S_0)$ вычисляют умножением $v = 10 \text{ с}$ на 6,7 ч, то есть

$$v(S - S_0) = 10 \cdot 6,7 = 67 \text{ с} = 1 \text{ мин } 07 \text{ мин} \approx 1,1 \text{ мин}.$$

Ответ находят по формуле (2.8):

$$T_m = 6 \text{ ч } 39,6 \text{ мин} - 1,1 \text{ мин} = 6 \text{ ч } 38,5 \text{ мин},$$

который практически не расходится с результатом точного вычисления.

Пример. В Санкт-Петербурге ($\lambda = 30^\circ 17' 41'' \text{ E}$) 3 ноября 1997 г. $T_m = 8 \text{ ч } 15 \text{ мин } 10 \text{ с}$. Определить в этот момент звездное время на метеостанции ($\lambda = 35^\circ 32' 41'' \text{ E}$).

Решение: $S_0 = 41^\circ 33,9'$ или $S_0 = 2 \text{ ч } 46 \text{ мин } 15,6 \text{ с}$;

$$\lambda_{\text{м.ст}} = 2 \text{ ч } 22 \text{ мин } 10 \text{ с} = 2,370 \text{ ч}; \mu \lambda_{\text{м.ст}}^v = 23,4 \text{ с};$$

$$S'_0 = S_0 - \mu_{\text{м.ст}}^v = 2 \text{ ч } 46 \text{ мин } 15,6 \text{ с} - 23,4 \text{ с} = 2 \text{ ч } 45 \text{ мин } 52,2 \text{ с}.$$

Разность заданных долгот $35^\circ 32' 41'' - 36^\circ 17' 41'' = 5^\circ 15'$ или 21 мин 00 с.

Местное время метеостанции $T_m = T_{\text{сп.б}} + (\lambda_{\text{м.ст}} - \lambda_{\text{сп.б}})^v = 8 \text{ ч } 15 \text{ мин } 10 \text{ с} + 21 \text{ мин } 00 \text{ с} = 8 \text{ ч } 36 \text{ мин } 10 \text{ с}$. Поправочный член $\mu T_m = 1 \text{ ч } 24,8 \text{ с}$. Искомое звездное время на метеостанции по формуле (2.10) будет:

$$S_0 = S'_0 + T_m + \mu T_m = 2 \text{ ч } 45 \text{ мин } 52,2 \text{ с} + 8 \text{ ч } 36 \text{ мин } 10 \text{ с} + \\ + 1 \text{ мин } 24,8 \text{ с} = 11 \text{ ч } 23 \text{ мин } 27,0 \text{ с}.$$

3. Среднее солнце движется по небесному экватору равномерно, а истинное Солнце перемещается по эклиптике неравномерно. Разность η их часовых углов называемая уравнением времени, в течение года непрерывно меняется. Суточное изменение η колеблется от -30 с (23 декабря) до $+21$ с (16 сентября). Характер изменения уравнения времени в течение года может быть представлен графиком (рис. 11), построенным по данным табл. 2.3.

Таблица 2.3

Годовое изменение уравнения времени η .

Дата	1/I	11/II	16/IV	15/V	14/VI	27/VII	1/IX	3/XI	25/XII
η , мин	+3,4	+14,4	0,0	-3,8	0,0	+6,4	0,0	-16,4	0,0

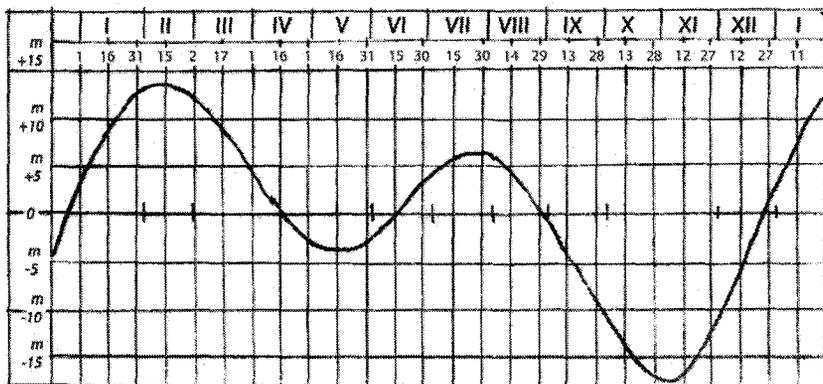


Рис. 11. Уравнение времени

По такому графику величину η можно определить на заданную дату с ошибкой около $\pm 0,5$ мин. Более точные значения уравнения времени содержат астрономический календарь, Морской астрономический ежегодник и другие справочники на определенный год.

Установление местного среднего солнечного времени T_m сводится к определению солнечного угла t_{\odot} истинного Солнца из наблюдений и выборке η из справочника, а затем вычислению по формуле:

$$T_m = t_{\odot} + \eta + 12 \text{ ч}^* \quad (2.12)$$

4. Для всех мест на одном и том же меридиане часовой угол точки весеннего равноденствия (или Солнца, или среднего солнца) в какой-либо момент один и тот же. Поэтому на всем географическом меридиане местное время (звездное или солнечное) в один и тот же момент одинаково. Разность любого местного времени на двух меридианах в один и тот же физический момент (рис. 12) всегда равна разности долгот этих меридианов, выраженной в часовой мере (в единицах времени):

$$\left. \begin{aligned} S_1 - S_2 &= \lambda_1 - \lambda_2, \\ T_1 - T_2 &= \lambda_1 - \lambda_2, \\ T_{m_1} - T_{m_2} &= \lambda_1 - \lambda_2. \end{aligned} \right\} \begin{aligned} S_1 - S_2 &= \lambda_1 - \lambda_2, \\ T & \end{aligned} \quad (2.13)$$

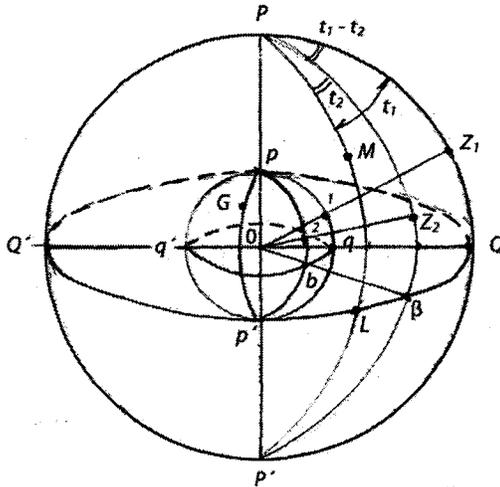


Рис. 12. Время на различных меридианах

Местное среднее солнечное время основного меридиана какого-либо часового пояса называется поясным временем T_n , по ко-

* В астрономическом ежегоднике на каждый день в среднюю гринвичскую полночь приводится величина $E = (12 \text{ ч} - \eta)$ под названием «уравнение времени (ист. – средн.) + 12 ч», поэтому на практике применяется соотношение $T_m = t_{\odot} - E$, причем если $E > t_{\odot}$, то нужно к t_{\odot} прибавить 24 ч.

торому и ведется счет времени на всей территории, лежащей в данном часовом поясе. Разность между местным временем и временем T_m какого-либо пункта и его поясным временем T_n на основании уравнения (2.13) равна

$$T_m - T_n = \lambda - n, \quad (2.14)$$

где λ – восточная долгота от Гринвича; n – число целых часов, равное номеру часового пояса, в котором находится данный пункт (долгота основного меридиана часового пояса). Поэтому из уравнения (2.13) также следует, что местное среднее время любого пункта на Земле всегда равно всемирному времени T_0 в этот момент плюс долгота данного места λ , выраженная в единицах времени, и считается положительной (или отрицательной) к востоку E (или к западу W) от гринвичского меридиана:

$$T_m = T_0 \pm \lambda_{W}^E, \quad (2.15)$$

где T_0 – местное среднее солнечное время гринвичского (нулевого) меридиана, называемое всемирным временем.

Поясное время T_n данного пояса n связано со всемирным временем T_0 отношением

$$T_n = T_0 + n. \quad (2.16)$$

В астрономических календарях моменты большинства явлений указываются по всемирному времени T_0 . Моменты этих явлений по местному времени определяются по формуле

$$T_m = T_0 + \lambda. \quad (2.17)$$

5. Связь декретного времени T_d какого-либо пункта с его поясным временем T_n , со всемирным временем T_0 и с местным средним солнечным временем T_m определяется соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} T_d &= T_n + 1, \\ T_d &= T_0 + n + 1, \\ T_d &= T_m - \lambda + n + 1. \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

6. В астрономии пользуются двумя системами счета времени: неравномерным временем, которое получается из наблюдений и

определяется действительным вращением Земли, и равномерным (ньютоновском или эфемеридным) временем, которое является аргументом при вычислении эфемерид планет и определяется по движению Луны и планет.

Для вычисления положения небесных тел в системе всемирного (неравномерного) времени, необходимо знать разность ΔT между эфемеридным временем T_e и всемирным временем T_0 , точное значение которой может быть получено лишь для прошедших моментов времени (из сравнения наблюдаемых координат Луны с её вычисленными координатами). В астрономических ежегодниках публикуется экстраполированное значение ΔT на определенный год.

Атомное время не зависит от астрономических наблюдений и движений небесных тел. Оно вычисляется Международным бюро времени на основе регулярного сравнения атомных эталонов отдельных обсерваторий и является основой для изучения периодической неравномерности вращения Земли вокруг своей оси.

Лабораторная работа 3

Расчет координат подспутниковой точки и трассы метеорологического спутника Земли на поверхности планеты

Цель работы: научиться предвычислять, над каким пунктом земной поверхности будет находиться спутник в заданный момент времени, и производить расчет трассы метеорологического спутника Земли (МСЗ).

Метеорологический спутник Земли (МСЗ), как правило, выводится на орбиту в перигее со скоростью не менее первой космической (соответствующей определенной высоте полета). Если скорость запуска МСЗ точно равна круговой скорости на данной высоте, то он будет двигаться по круговой орбите. Если эта скорость превышает круговую, то спутник выйдет на эллиптическую орбиту, перигей которой будет совпадать с точкой выхода его на орбиту. Характерные для метеорологических спутников Земли круговые орбиты принято рассматривать как частный случай эллиптической орбиты.

Орбиты метеорологических спутников Земли

Орбитальные параметры МСЗ. Положение спутника и элементы его орбиты удобно определять относительно экваториальной геоцентрической прямоугольной системы координат с началом в притягивающем центре Земли и с осями, постоянно ориентированными в пространстве (рис. 13). Основная плоскость системы OXY совпадает с плоскостью небесного экватора, ось X направлена в точку весеннего равноденствия γ , а ось Z – на Северный полюс. На небесной сфере с центром в точке O обозначим орбиту спутника, плоскость которой пройдет через начало координат и пересечет плоскость экватора вдоль линии узлов ϑ \varOmega . Точка \varOmega , в которой спутниковая орбита пересекает экватор при движении спутника с юга на север, называется восходящим узлом. Угол ме-

жду осью X и линией узлов $\zeta \varrho$ называют прямым восхождением восходящего узла орбиты и обозначают Ω . Угол i между плоскостью орбиты спутника и экваториальной плоскостью в восходящем узле (точка ϱ) орбиты называется наклоном орбиты. Перигей Π орбиты определяют либо угловым расстоянием ω (углом ϱ ОП), либо склонением δ_{Π} перигея (ближайшей к Земле точки орбиты). Угол ПОС, определяющий произвольное положение точки C на орбите относительно перигея, называют истинной аномалией ϑ . Момент времени прохождения спутником перигея обозначают t_{Π} . Большая полуось a и эксцентриситет e определяют размеры и форму эллиптической орбиты.

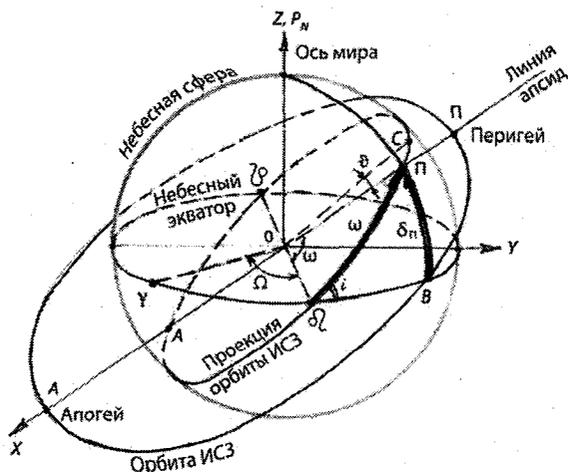


Рис. 13. Орбита искусственного спутника Земли в космическом пространстве.

Независимые параметры Ω , i , ω или δ_{Π} , a , e , t_{Π} называются элементами орбиты, полностью определяют орбиту и положение спутника на орбите в любой момент времени.

В некоторых практических задачах используют различные модификации элементов орбиты. Например, вместо времени t_{Π} часто употребляют величину средней аномалии в эпоху:

$$M_0 = n(t_0 - t_{\Pi}), \quad (3.1)$$

вместо элемента орбиты a рассматривают параметр орбиты

$$P = a(1 - e^2), \quad (3.2)$$

а период обращения определяют соотношением

$$T = \frac{2\pi}{n}, \quad n = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}, \quad (3.3)$$

где μ – гравитационный параметр; n – среднее движение; t_0 – начальный момент времени (эпоха).

Необходимо отметить, что в процессе решения ряда задач космической метеорологии ИСЗ определяют по отношению к системе координат с началом не в центре Земли, а в каком-либо определенном пункте на земной поверхности, и с осями, имеющими такие же направления, как оси геоцентрической экваториальной системы, то есть параллельными им. Такая система координат называется топоцентрической экваториальной системой координат.

Если в пункте наблюдения за спутником построить плоскость горизонта, касательную к земной поверхности, вертикальную ось ориентировать в зенит, другую ось направить по меридиану к Северному полюсу Земли, а третью – по параллели, проходящей через пункт наблюдения, таким образом, чтобы координатная система стала правоориентированной, то можно получить горизонтальную координатную систему отсчета. В такой системе положение ИСЗ можно задать не только тремя ее декартовыми координатами (x_r, y_r, z_r), но и тремя сферическими: дальностью r , угловой высотой h и азимутом A (рис. 14). Координаты r, h и A возможно, например, определить с помощью радиотехнических наблюдений, а параметры h и A уточнить еще и визуально, оптическими методами.

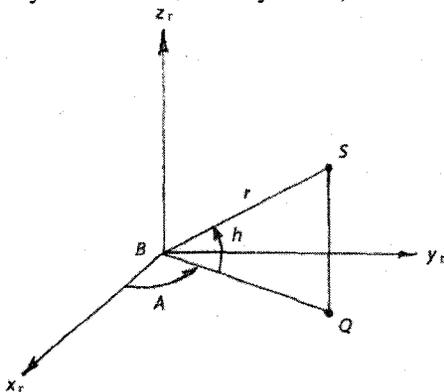


Рис. 14. Горизонтальные и сферические координаты ИСЗ

Систему отсчета строят еще и таким образом, чтобы ее начало совпадало с центром Земли, ось z была направлена на Северный полюс, ось x была проведена через точку пересечения нулевого (гринвичского) меридиана с земным экватором, а ось y была ориентирована на восток, чтобы координатная система была правой (основная плоскость системы в этом случае будет совпадать с плоскостью экватора Земли). Такую систему координат называют географической: широта и долгота точек земной поверхности в этой системе с течением времени не изменяется.

В соответствии со значением наклона i орбиты спутника делятся на экваториальные ($i = 0^\circ$), полярные ($i = 90^\circ$) и наклонные ($0 < i < 90^\circ$).

Вследствие вращения Земли вокруг своей оси ИСЗ за каждый свой оборот по полярной или наклонной орбитам смещается к западу над земной поверхностью на угол, зависящий от периода его обращения. Смещение в градусах по долготе называется инкрементом (приращением) долготы.

Наклонные орбиты подразделяются на прямые ($0 < i < 90^\circ$) и обратные ($90 < i < 180^\circ$). Среди последних наибольший интерес представляет орбита с углом наклона i , определяемым выражением:

$$i \approx \arccos \left[-0,0986 \left(1 + \frac{H_A + H_{\Pi}}{r_3} \right)^{-3,5} \right], \quad (3.4)$$

где H_A, H_{Π} — соответственно высоты апогея и перигея; r_3 — экваториальный радиус Земли.

Обратные спутники движутся по орбите в направлении с востока на запад, а прямые — в направлении вращения Земли, с запада на восток.

Спутники, находящиеся на таких орбитах, называются солнечно-синхронными, поскольку плоскость их орбиты поворачивается синхронно с обращением Земли вокруг Солнца. Другими словами, солнечно-синхронный спутник находится над каждой точкой земного шара в одно и то же местное время, значение которого зависит от времени запуска спутника, поскольку его параметры i и Ω определенным образом связаны со склонением δ_{\odot} и прямым восхождением α_{\odot} Солнца в момент запуска:

$$i = 90^\circ - \delta_\odot, \quad \Omega = 90^\circ - \alpha_\odot \quad (3.5)$$

Плоскость орбиты такого спутника в течение определенного времени оказывается перпендикулярной к линии, соединяющей центры Земли и Солнца, поэтому орбита ИСЗ будет лежать на границе (терминаторе) земных ночи и дня. Над всеми наблюдателями спутник будет пролетать в местные сумерки, что облегчает условия визуального наблюдения за ним.

По высоте полета ИСЗ делятся на низкоорбитальные (от 200 до 500 км), среднеорбитальные (от 500 до нескольких тысяч километров) и высокоорбитальные (десяtkи тысяч километров).

При высоте орбиты экваториального спутника $H \approx 35\,810$ км период его обращения равен периоду обращения Земли вокруг своей оси; спутник находится над одним и тем же наземным пунктом, поскольку спутник и Земля вращаются с одинаковой угловой скоростью. Такой ИСЗ называется геостационарным, его использование удобно для постоянного наблюдения за одним и тем же районом земного шара.

Точка земной поверхности, над которой в данный момент спутник находится в зените, называется подспутниковой точкой.

Под трассой спутника понимают проекцию его орбиты на поверхности Земли (геометрическое место подспутниковых точек земной поверхности).

Знание трассы ИСЗ необходимо для определения целеуказаний расчета эфемерид – таблиц, указывающих заранее вычисленные положения небесных тел на определенные дни года, для пунктов приема спутниковой информации, в районах которых ожидается прохождение метеорологических спутников Земли (МСЗ). Оно позволяет координировать работу наземного измерительного комплекса и пунктов приема данных.

Из-за вращения Земли угол пересечения трассы с экватором получается несколько больше угла наклона плоскости орбиты. На земной поверхности трасса спутника лежит в пределах двух относительно экватора параллелей, северной и южной, широты которых равны наклону орбитальной плоскости. На рис. 15 представлена трасса отечественного спутника Земли системы «Метеор».

Расчет трассы сводится к определению координат подспутниковых точек в относительной геоцентрической системе координат.

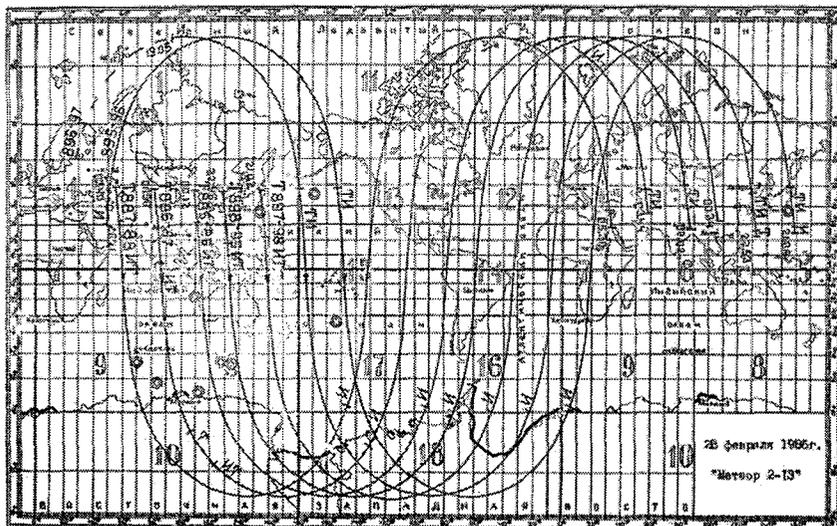


Рис. 15. Трасса ИСЗ системы "Метеор"

Контрольные вопросы

1. Какие параметры называются элементами орбиты ИСЗ?
2. Что называется периодом обращения спутника?
3. В какой системе координат удобно определять положение спутника и элементы его орбиты?
4. В чем основные различия прямой и обратной орбит спутника?
5. Дайте характеристику солнечно-синхронным орбитам МСЗ.
6. В чем преимущество спутника, имеющего наклонную орбиту, перед спутником со стационарной орбитой с точки зрения трассы ИСЗ.
7. Что называется подспутниковой точкой?
8. В каких системах координат может быть выполнен расчет подспутниковой точки?
9. Для решения каких задач спутниковой метеорологии необходимо заранее определить трассу спутника?
10. Как изменяются координаты подспутниковой точки стационарного спутника?

Задачи

- 3.1. На пункте наблюдения В в момент t по московскому времени был замечен искусственный спутник Земли. Известны прямоугольные горизонтальные координаты ИСЗ в этот момент (x_t, y_t, z_t) , дата наблюдения и географические координаты пункта наблюдения (φ_0, λ_0) .
Вывести формулы для вычисления экваториальных геоцентрических координат спутника (x_s, y_s, z_s) .

- 3.2. На метеорологической станции В с географическими координатами (φ, λ) в t часов по московскому времени наблюдали прохождение спутника. Были определены его горизонтальные сферические координаты (ρ, h, A) . Известна дата наблюдения. Требуется вывести формулы, определяющие экваториальные сферические координаты искусственного спутника (r, δ, α) .
- 3.3. Известно, что в t часов по московскому времени спутник должен быть виден на станции визуальных наблюдений В и будет иметь геоцентрические экваториальные координаты (r, δ, α) . Известна также дата прохождения спутника над станцией. Наблюдателям этой станции необходимо сообщить горизонтальные координаты (h, A) искусственного спутника.
Каким образом можно вычислить эти координаты?
- 3.4. Известны элементы орбиты искусственного спутника Земли относительно геоцентрической экваториальной системы координат: $a = 700$ км; $e = 0,2$; $i = 60^\circ$; $\Omega = 90^\circ$; $\omega = 45^\circ$. По этим данным определить декартовы экваториальные координаты перигея орбиты, затем найти экваториальные сферические координаты перигея (r, δ, α) .
- 3.5. Известны элементы орбиты спутника Ω, i, ω относительно некоторой системы отсчета $Axuz$. Точка перигея П имеет относительно орбитальной системы отсчета $A\xi\eta\zeta$ декартовы координаты $(0,0,1)$.
Каковы ее координаты относительно системы $Axuz$?
- 3.6. Определить величину эксцентрисической аномалии при условии, что $M = 50^\circ$, $e = 0,30$ (с помощью номограммы)
- 3.7. Определить величину эксцентрисической аномалии при условии, что $M = 60^\circ$, $e = 0,01$ (с помощью номограммы)
- 3.8. Определить координаты подспутниковой точки в абсолютной геоцентрической системе координат, если $i = 81^\circ$, $\omega = 20^\circ$, $M = 60^\circ$, $e = 0,01$.
- 3.9. Определить координаты подспутниковой точки в абсолютной геоцентрической системе координат, если $i = 102^\circ$, $\omega = -25^\circ$, $M = 70^\circ$, $e = 0,20$.
- 3.10. Рассчитать координаты подспутниковой точки в абсолютной геоцентрической системе координат для условий: $e = 0$, $M = 45^\circ$, $i = 85^\circ$, $\omega = 40^\circ$.
- 3.11. Рассчитать координаты подспутниковой точки в относительной геоцентрической системе координат по условиям задачи 3.10 в момент времени $t_n = 16$ ч 60 мин (мск).
- 3.12. Орбита отечественного ИСЗ «Космос-4», запущенного в апреле 1962 г., была близка к круговой ($H_n = 298$ км, $H_a = 330$ км). Приняв орбиту за круг с высотой 314 км, определить под каким углом пересекает трасса спутника экватор Земли, если известно наклонение орбиты $i = 65^\circ$.
- 3.13. Под каким углом трасса метеорологического спутника «Метеор-20» пересекает земной экватор, если известно, что он был запущен на орбиту с высотой 885 км и наклонением $i = 82,20^\circ$. Орбита круговая.
- 3.14. Под каким углом трасса МСЗ «Метеор-28» пересекает земной экватор, если известно, что он запущен на орбиту, близкую к круговой, на высоте 630 км. Наклонение $i = 98^\circ$. Сравнить величины углов пересечения трассы отечественных спутников «Метеор-20» и «Метеор-28».
- 3.15. Орбита американского метеорологического спутника «НОАА-4», запущенного 15 ноября 1974 г., была близка к круговой ($H_n = 1432$ км, $H_a = 1472$ км).

Приняв орбиту за окружность на высоте 1452 км, определить, под каким углом трасса спутника пересекает экватор Земли, если известно наклонение его орбиты $i = 102^\circ$.

- 3.16. Полярный спутник вращается вокруг Земли по окружности на высоте 230 км. Под каким углом пересекает трасса спутника земной экватор?
- 3.17. Орбита первого отечественного спутника была наклонена к плоскости экватора под углом 65° . Спутник прошел над головой наблюдателя, находившегося на экваторе, с юго-запада на северо-восток. В этот момент наблюдатель измерил видимый угол между трассой спутника и направлением на восток. Чему был равен этот угол? Данные о спутнике: $H_n = 230$ км, $H_a = 950$ км, $\omega = 58^\circ$.
- 3.18. Решите задачу, аналогичную предыдущей, когда трасса спутника пересекает земной экватор с северо-запада на юго-восток.

Материалы для работы

1. Модель (чертеж) небесной сферы.
2. Номограмма для решения уравнения Кеплера.
3. Калькулятор (или компьютер) для вычислений.
4. Таблицы тригонометрических функций и их логарифмов.

Рекомендуемая литература

1. Балк М.Б. Элементы динамики космического полета – М.: Наука, 1965; гл. IV.
2. Герман М.А. Космические методы исследования в метеорологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1985; глава I и II.
3. Щиголов Б.М. Математическая обработка наблюдений. – М.: Физматгиз, 1962.
4. Пятизначные таблицы логарифмов чисел тригонометрических функций. – М.: Геодезиздат, 1957.

Порядок выполнения работы

1. В начале работы следует уяснить, что положение спутника и элементы его орбиты удобно определять относительно прямоугольной системы координат с началом в притягивающем центре A и с осями A_x , A_y , A_z , постоянно ориентированными в пространстве. Основную плоскость Axy этой системы в разных задачах выбирают по-разному. Например, при изучении движения спутников Земли за основную плоскость Ax_3y_3 принимают плоскость экватора, ось Az_3 направляют от центра Земли к Северному полюсу, ось Ax_3 – в так называемую точку весеннего равноденствия γ , а ось Ay_3 выбирают таким образом, чтобы система $Ax_3y_3z_3$ была правоориентированной. Такая система $Ax_3y_3z_3$ чаще всего называется экваториальной геоцентрической системой отсчета (рис. 16).

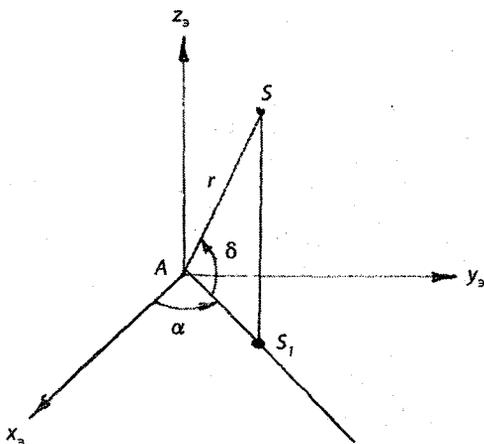


Рис. 16. Экваториальная геоцентрическая система координат ИСЗ

2. Положение спутника S в экваториальной геоцентрической системе координат можно задать не только тремя его декартовыми координатами, но и сферическими координатами: склонением δ и прямым восхождением α , а также геоцентрическим радиусом-вектором r (рис. 16).

3. При решении ряда задач космонавтики положение ИСЗ по отношению к системе координат удобно определять с началом не в центре Земли – точке A , а в точке наблюдения B , причем в общем случае точка B не обязательно лежит на поверхности Земли (например, географическая система отсчета).

4. В процессе решения практических задач космонавтики часто используют матричное исчисление, особенно при переходе от одной координатной системы отсчета к другой. Так, например, зная элементы орбиты спутника ($\Omega, i, e, \alpha, \omega, t_0$), можно определить его положение в момент t относительно заданной системы декартовых или аффинных (от лат. affinis – родственный, соответственный) прямоугольных координат $Axyz$, имеющих начало отсчета в притягивающем центре (рис. 17). Используя некоторую вспомогательную орбитальную систему отсчета $A\xi\eta\zeta$ с началом также в притягивающем центре, за ось абсцисс $A\xi$ принимают линию апсид орбиты спутника (положительное направление от притягивающего центра A к перигею Π), ось ординат $A\eta$ определяют поворотом $A\xi$ в плоскости орбиты на 90° в направлении движения

ИСЗ; ось аппликат $A\zeta$ (обозначается обычно буквой z) выбирается так, чтобы система координат $A\xi\eta\zeta$ была правоориентированной.

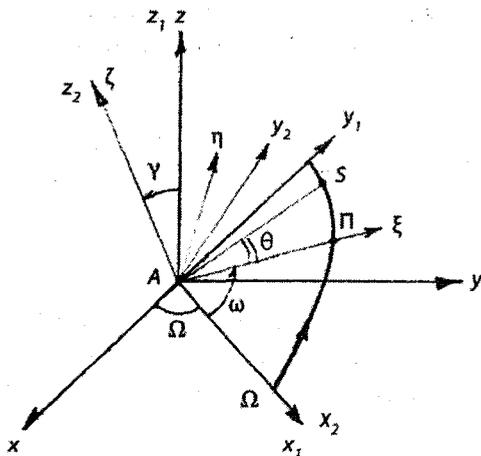


Рис. 17. Вспомогательная или орбитальная система отсчета

5. Переход от системы отсчета $Ax_1y_1z_1$ к орбитальной системе отсчета $A\xi\eta\zeta$ осуществляется последовательно тремя следующими преобразованиями:

- поворотом вокруг оси Az на угол Ω (результат – новая система отсчета $Ax_1y_1z_1$, причем $Az_1 \equiv Az$);
- поворотом вокруг оси Ax_1 на угол i (результат – новая система отсчета $Ax_2y_2z_2$, причем $Ax_2 \equiv Ax_1$), ось Az_2 перпендикулярна к плоскости орбиты;
- поворотом вокруг оси Az_2 на угол ω (результат – система отсчета $A\xi\eta\zeta$; $A\zeta \equiv Az_2$).

Если обозначить матрицы этих трех поворотов соответственно через A_1, A_2, A_3 , положив

$$A = A_3 A_2 A_1, \tag{3.7}$$

то тогда

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = A_3 A_2 A_1 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \tag{3.8}$$

Обратный переход от системы $A\xi\eta\zeta$ к системе отсчета $Axyz$ осуществляется также последовательно теми же поворотами (3.6), но в обратном порядке и в обратном направлении. Обозначая матрицы этих последовательных поворотов через B_1, B_2, B_3 , получим:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = B_1 B_2 B_3 \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} \text{ или } \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

где $B = B_1 B_2 B_3$.

6. Явные выражения для матриц A_k и B_k ($k = 1, 2, 3$) определяются на основе таблиц углов φ_{pq} между осями системы $Ax_1y_1z_1$ и системы $Axyz$, системы $Ax_2y_2z_2$ и системы $Ax_1y_1z_1$, а также системы $A\xi\eta\zeta$ и системы $Ax_2y_2z_2$:

	Ax	Ay	Az
Ax_1	Ω	$\frac{\pi}{2} - \Omega$	$\frac{\pi}{2}$
Ay_1	$\frac{\pi}{2} + \Omega$	Ω	$\frac{\pi}{2}$
Az_1	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \Omega \sin \Omega & 0 \\ -\sin \Omega \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

	Ax_1	Ay_1	Az_1
Ax_2	0	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$
Ay_2	$\frac{\pi}{2}$	i	$\frac{\pi}{2} - i$
Az_2	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2} + i$	i

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 \cos i \sin i & & \\ 0 - \sin i \cos i & & \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

	Ax_2	Ay_2	Az_2
$A\xi$	ω	$\frac{\pi}{2} - \omega$	$\frac{\pi}{2}$
$A\eta$	$\frac{\pi}{2} + \omega$	ω	$\frac{\pi}{2}$
$A\zeta$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos \omega \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Заменив в матрицах A_1, A_2, A_3 углы Ω, i, ω на $-\Omega, -i, -\omega$, получим матрицы B_k ($k = 1, 2, 3$):

$$B_1 = \begin{bmatrix} \cos \Omega \sin \Omega & 0 \\ -\sin \Omega \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i \sin i \\ 0 & -\sin i \cos i \end{bmatrix},$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} \cos \omega \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Матрицу B иногда называют матрицей проективных коэффициентов и записывают в виде:

$$B = \begin{bmatrix} P_X Q_X R_X \\ P_Y Q_Y R_Y \\ P_Z Q_Z R_Z \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Из (3.9) и (3.14) следует, что

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_X Q_X R_X \\ P_Y Q_Y R_Y \\ P_Z Q_Z R_Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

Матрица A может быть получена из матрицы B транспонированием:

$$A = \begin{bmatrix} P_X P_Y P_Z \\ Q_X Q_Y Q_Z \\ R_X R_Y R_Z \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_X P_Y P_Z \\ Q_X Q_Y Q_Z \\ R_X R_Y R_Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

Методические указания

1. Мгновенное положение ИСЗ на небесной сфере можно определить сферическими координатами, аналогичными географической широте и долготе.

Проекцию некоторого мгновенного положения спутника на земную поверхность определяют как подспутниковую точку. Тогда трасса спутника на поверхности планеты есть геометрическое место подспутниковых точек, или проекция орбиты ИСЗ на поверхность вращающейся Земли, на которой указано время прохождения спутником отдельных наземных пунктов.

2. Истинное движение ИСЗ может быть представлено как движение его по кеплеровой орбите, основные элементы которой непрерывно изменяются, являясь функцией времени. Другими словами, для определения географических (или геодезических) координат спутника необходимо его широту φ_s , долготу λ_s и радиус-вектор r_s выразить через элементы орбиты (см. рис. 13), то есть связать геометрически положение ИСЗ с текущим временем. Такую связь дает уравнение Кеплера

$$M = E - e \sin E, \quad (3.17)$$

где M – параметр, именуемый средней аномалией; E – эксцентрическая аномалия; e – эксцентриситет орбиты (рис. 18).

Средней аномалией называют дугу, которую описал бы спутник после своего прохождения через перигей, если бы он двигался равномерно по круговой орбите, совершая полный оборот за свой реальный период обращения по эллиптической орбите.

Эксцентрическая аномалия ($\angle PO'Q = E$) при движении спутника изменяется неравномерно. Полярный угол ϑ , под которым радиус-вектор r_s точки S наклонен к оси эллипса, называется истинной аномалией, и он также меняется неравномерно. В ряде случаев положение радиус-вектора r_s задают не относительно оси

эллипса, а относительно линии узлов $\vartheta \Omega$, и тогда полярным углом будет являться угол U , который именуется аргументом широты:

$$U = \vartheta + \omega, \quad (3.18)$$

где ω – аргумент перигея, то есть угловое расстояние перицентра, определяемое углом между линией узлов и линией апсид.

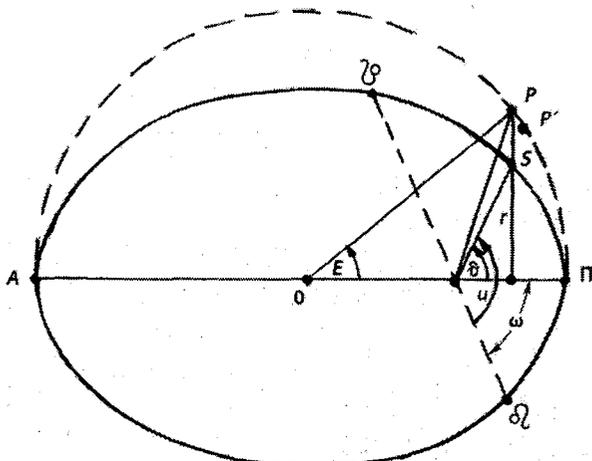


Рис. 18. Пояснение к уравнению Кеплера

Поскольку эксцентрическая аномалия однозначно связана с координатами спутника, а средняя аномалия является функцией времени (3.1), то уравнение Кеплера по сути является выражением зависимости спутниковых координат от времени.

3. В упрощенных вариантах расчета координаты ИСЗ чаще всего выражают через параметр M , решая уравнение Кеплера графически с помощью специальной номограммы (рис. 19).

Входными величинами для работы с номограммой являются вспомогательный параметр M – средняя аномалия и эксцентриситет орбиты e . По известным значениям M и e определяют параметр $(M + 100e)$. После этого точку M , взятую на оси абсцисс (нижней оси номограммы), соединяют прямой линией с точкой $(M + 100e)$ на верхней оси номограммы и против точки пересечения линии с кривой на оси абсцисс отсчитывают значение параметра E .

Затем производится расчет истинной аномалии:

$$\sin \vartheta = \frac{\sin E}{1 - e \cos E} \cdot \sqrt{1 - e^2}, \quad (3.19)$$

$$\cos \vartheta = \frac{\cos E - e}{1 - e \cos E}, \quad (3.20)$$

и величины аргумента широты:

$$U = \vartheta + \omega.$$

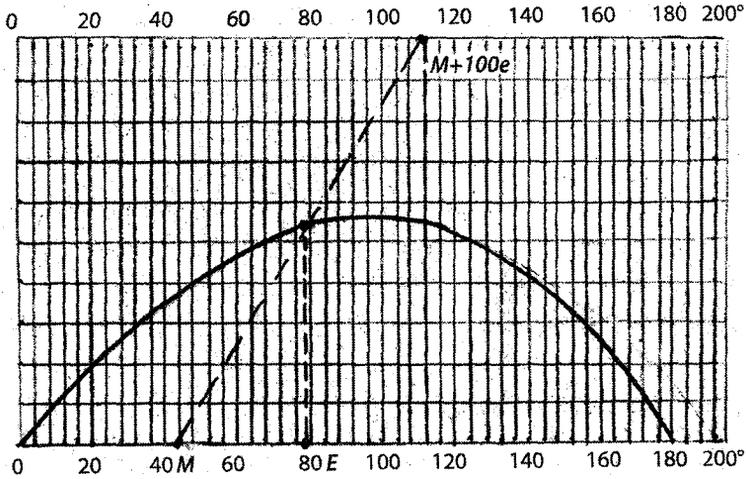


Рис. 19. Номограмма для решения уравнения Кеплера

Используя вычисленные параметры, определяют φ_{rA} и λ_{rA} подспутниковой точки в абсолютной геоцентрической системе координат:

$$\sin \varphi_{rA} = \sin i \sin U, \quad (3.21)$$

$$\sin \lambda_{rA} = \frac{(\sin \Omega \cos U + \cos \Omega \cos i \sin U)}{\cos \varphi_{rA}}, \quad (3.22)$$

$$\cos \lambda_{rA} = \cos \Omega \cos U, \quad (3.23)$$

а затем в относительной системе координат:

$$\varphi_r = \varphi_{rA}; \quad \lambda_r = \lambda_{rA} - \Omega(S - S_0), \quad (3.24)$$

где S и S_0 — звездное время соответственно в рассматриваемый момент и на начало данных суток по всемирному времени.

4. Пространственные координаты спутника X, Y, Z или геодезические координаты, B – широту и L – долготу подспутниковой точки (точки пересечения земного эллипсоида и нормали к его поверхности, на которой находится спутник), а также высоту H спутника над поверхностью Земли для любого момента t времени можно вычислить по элементам орбиты ИСЗ (например, $\Omega, \omega, i, e, M_0$, заданным в гринвичской прямоугольной системе координат (см. рис. 13).

Расчет этих параметров осуществляется по соотношениям:

$$\begin{aligned}
 M &= n(t - t_0) + M_0, \\
 M &= E - e \sin E, \\
 \operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2} &= \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E}{2}, \\
 r &= \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos \vartheta}, \\
 U &= \vartheta + \omega, \\
 X &= r(\cos U \cos \Omega - \sin U \sin \Omega \cos i), \\
 Y &= r(\cos U \sin \Omega + \sin U \cos \Omega \cos i), \\
 Z &= r \sin U \sin i, \\
 \operatorname{tg} L &= \frac{Y}{X}, \\
 \operatorname{tg} B &= \frac{Z \sin L}{1 - \frac{ae^2 \sin L}{\sqrt{1+(1-e^2) \operatorname{tg} B}}}, \\
 H &= \frac{X}{\cos B \cos L} - N \\
 N &= a_1 \sqrt{1 - e_1^2 \sin^2 B}, \\
 a_1 &\approx 6378245 \text{ м} \\
 e_1^2 &\approx 0,0066934.
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Расчет движения ИСЗ по формулам (3.25) является приближенным.

Более точные данные передаются на сеть приемных пунктов в циркулярном порядке по линиям связи с помощью специальных международных кодов (см. лабораторную работу №7).

5. По известным элементам Ω , i , α , e , ω , t_n эллиптической (круговой) орбиты спутника можно предсказать его положение в пространстве в любой момент времени t , решив относительно величины E уравнение Кеплера:

$$E - e \sin E = n(t - t_n), \quad n = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}, \quad (3.26)$$

и вычислив по элементам a и e параметр

$$b = a\sqrt{1 - e^2}. \quad (3.27)$$

Положение ИСЗ в орбитальной системе отсчета определяется вектором

$$\begin{bmatrix} \xi \\ h \\ \zeta \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} a(\cos E - e) \\ b \sin E \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

Этот же вектор в системе отсчета $Axuz$ (см. рис. 17) характеризуется соотношением

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} a(\cos E - e) \\ b \sin E \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3.29)$$

которое иначе записывают в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} a(\cos E - e) + \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{bmatrix} b \sin E. \quad (3.30)$$

6. Если в момент времени t_0 спутник, движущийся по круговой орбите, находился над пунктом A земной поверхности с географическими координатами φ_0 , λ_0 , известны наклонение i орбиты

к плоскости экватора ($0 < i < 90^0$) и период обращения T спутника вокруг Земли, то для определения пункта земной поверхности, над которым будет находиться ИСЗ в заданный момент t , поступают следующим образом.

а) Выбирают две прямоугольные системы отсчета с началом в центре O Земли (рис. 20): одну $O\xi\eta\zeta$ вращающуюся вместе с Землей вокруг земной оси, вторую $Oxyz$ невращающуюся, постоянно ориентированную в пространстве.

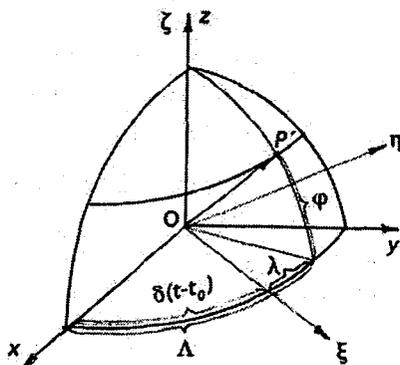


Рис. 20. Прямоугольные системы отсчета – вращающаяся и невращающаяся (P' – подспутниковая точка земной поверхности, над которой в данный момент находится спутник)

В системе $O\xi\eta\zeta$ ось $O\xi$ направляется в точку пересечения нулевого (гринвичского) меридиана с экватором, ось $O\zeta$ – к Северному полюсу Земли, ось $O\eta$ выбирается так, чтобы система отсчета $O\xi\eta\zeta$ была правоориентированной.

В системе $Oxyz$ ось Ox принимает то положение оси $O\xi$, которое она занимает в определенный, заранее выбранный момент t_0 (например, момент прохождения спутника через перигей или момент, когда ось $O\xi$ проходит через точку весеннего равноденствия); ось Oz совмещают с $O\zeta$, а ось Oy направляют таким образом, чтобы система $Oxyz$ была также правоориентированной.

Координатные плоскости Oxy и $O\xi\eta$ совпадают с плоскостью экватора Земли.

В момент t_0 оси вращающейся системы отсчета $O\xi\eta\zeta$ совпадают с соответствующими осями невращающейся системы отсчета $Oxyz$.

б) Земля в системе отсчета Охуз (вместе с системой отсчета $O\xi\eta\zeta$) вращается равномерно вокруг оси Oz . За каждую минуту система $O\xi\eta\zeta$ (а вместе с ней и Земля) поворачивается относительно невращающейся системы отсчета Охуз на угол

$$\dot{\delta} = \frac{360^\circ}{(24 \cdot 60 - 4) \text{ мин}} \approx \frac{360,986^\circ}{1440 \text{ мин}}, \quad (3.31)$$

так как продолжительность звездных суток составляет 23 ч 56 мин 4 с.

В любой момент времени t в системе отсчета Охуз положение каждого пункта на поверхности Земли характеризуется двумя сферическими координатами: широтой Φ и долготой Λ , причем

$$\Phi = \varphi \text{ и } \Lambda = \lambda + \dot{\delta}(t - t_0). \quad (3.32)$$

Кроме того, в системе отсчета Охуз плоскость орбиты вращается вокруг оси Oz со скоростью

$$\dot{\Omega} \approx -\frac{1}{140} \left(\frac{R}{a} \right)^{3,5} \cos i, \left[\frac{\text{градусы}}{\text{минуты}} \right] \quad (3.33)$$

где R – радиус Земли, $0^\circ < i < 90^\circ$ или $90^\circ < i < 180^\circ$. В том и другом случае орбита вращается в направлении, противоположном направлению проекции движения самого ИСЗ на плоскость экватора. Такого рода равномерное вращение плоскости орбиты, как известно, называют прецессией.

7. а) Сначала рассматривают движение спутника относительно невращающейся системы отсчета Охуз и не учитывают прецессию орбиты.

Если бы после момента t_0 не вращалась бы Земля и не вращалась бы плоскость орбиты спутника, то ИСЗ в момент t находился бы над некоторой точкой B земной поверхности со сферическими координатами Φ , Λ в системе отсчета Охуз. На рис. 21 представлена трасса спутника CAB и дуг AD , BF меридианов больших кругов, перпендикулярных экватору. Если градусные меры дуг CA , CD , CB , CF , DA , BF равны соответственно ψ_0 , α_0 , ψ , α , ϕ_0 , ϕ , то по из-

вестным формулам для прямоугольных сферических треугольников [(1.19); см. лабораторную работу 1]:

$$\sin \psi_0 = \frac{\sin \varphi_0}{\sin i} \quad (3.34)$$

$$\sin \alpha_0 = \frac{\operatorname{tg} \varphi_0}{\operatorname{tg} i} \quad (3.35)$$

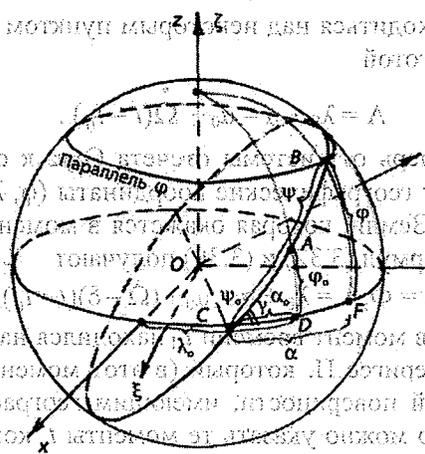


Рис. 21. Трасса спутника относительно неврвращающейся системы отсчета

Выбор конкретных значений ψ_0 и α_0 среди различных дуг, удовлетворяющих условиям (3.34), (3.35), производится с учетом дополнительных сведений о движении спутника: (по периоду T обращения, проходил ли спутник над пунктом A с юга на север и на оборот, и т.п.).

Спутник движется по круговой орбите равномерно, и за $(t-t_0)$ минут его проекция на земную поверхность проходит дугу AB , содержащую $\frac{360^\circ}{T}(t-t_0)$ градусов. Поэтому

$$\psi = \psi_0 + \frac{360^\circ}{T}(t-t_0) \quad (3.36)$$

Для прямоугольного сферического треугольника BCF :

$$\sin \psi = \sin \psi_0 \sin i, \quad (3.37)$$

$$\operatorname{tga} = \operatorname{tgy} \cos i, \quad (3.38)$$

откуда определяются φ и α . Дуга DF равна, таким образом, $\alpha - \alpha_0$ (градусов). Следовательно, для точки B долгота $\Lambda = \lambda_0 + \alpha - \alpha_0$.

б) Затем учитывают прецессию орбиты спутника. Плоскость орбиты ИСЗ вращается со скоростью Ω градусов за одну минуту, а за $(t - t_0)$ минут орбита поворачивается (относительно системы отсчета $Oxyz$) на угол $\dot{\Omega}(t - t_0)$. Другими словами, в момент t спутник будет находиться над некоторым пунктом N с той же широтой Φ , но с долготой

$$\Lambda = \lambda_0 + \alpha - \alpha_0 + \dot{\Omega}(t - t_0). \quad (3.39)$$

Переходя теперь от системы отсчета $Oxyz$ к системе отсчета $O\xi\eta\zeta$, определяют географические координаты (φ, λ) той же точки M вращающейся Земли, которая окажется в момент t под спутником, то есть из формул (3.32) и (3.39) получают

$$\varphi = \Phi, \quad \lambda = \lambda_0 + \alpha - \alpha_0 + (\dot{\Omega} - \delta)(t - t_0). \quad (3.40)$$

8. Если ИСЗ в момент времени t_{II} находился на эллиптической орбите в своем перигее Π , который (в этот момент) оказался над пунктом A земной поверхности, имеющим географические координаты (φ_0, λ_0) , то можно указать те моменты t , когда спутник будет находиться над пунктами с некоторой широтой φ . Требуется определить, какова будет в каждый такой момент времени долгота λ подспутниковой точки?

а) Пусть $\varphi \geq \varphi_0 > 0$ и рассмотрим сначала трассу спутника в невращающейся системе отсчета $Oxyz$, не учитывая также прецессию орбиты ИСЗ. Допустим, что в момент t спутник оказался в точке Q , лежащей над φ -й параллелью (рис. 22). Проекцию спутника на земную сферу обозначим через B .

Обозначим для градусных мер дуги: $CA = \omega$, $CD = \alpha_0$, $CB = \psi$, $CF = \alpha$.

Как и при рассмотрении п. 6, можно записать:

$$\sin \omega = \frac{\sin \varphi_0}{\sin i}, \quad \sin \alpha_0 = \frac{\operatorname{tg} \varphi_0}{\operatorname{tgi}}, \quad (3.41)$$

$$\sin \psi = \frac{\sin \varphi}{\sin i}, \quad (3.42)$$

$$\sin \alpha = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tgi}}. \quad (3.43)$$

Может случиться, что условию (3.42) не удовлетворяет ни одна дуга, то есть в своем движении ИСЗ не доходит до параллели с широтой φ . В случае $0^\circ < i < 90^\circ$ это будет иметь место, если $\varphi > i$ или $\varphi > -i$. В остальных случаях условию (3.42) удовлетворяет бесконечное множество дуг. Когда $\varphi = i$ (или $\varphi = -i$), то $\psi = 90^\circ + 360^\circ n$ или $\psi = 270^\circ + 360^\circ n$ (n – целое число).

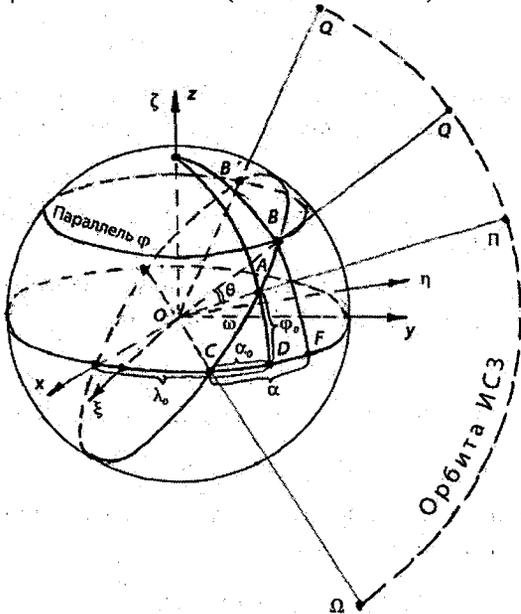


Рис. 22. Определение долготы подспутниковой точки

б) Пусть $\varphi_0 < \varphi < i$. Обозначим через ψ_1 наименьшую положительную дугу, определяемую условием (3.42). В пределах от 0 до 360° существуют две дуги ψ_1 и ψ'_1 ($\psi'_1 > \psi_1$), удовлетворяющие условию (3.42). Аналогично существуют две дуги α_1 и α'_1 ($\alpha'_1 > \alpha_1$), заключенные между 0 и 360° и удовлетворяющие условию (3.43).

Перемещаясь по своей орбите от перигея Π , спутник в какой-то момент времени t_1 проходит (впервые после t_0) над параллелью с широтой φ . Примем, что Q – положение спутника в этот момент,

а B — его подспутниковая точка. При дальнейшем движении спутника его трасса поднимается севернее этой параллели, но затем через некоторое время она начинает спускаться к югу и в какой-то момент t_1 снова пересечет эту параллель в какой-то точке B' . Так будет повторяться в течение каждого оборота спутника.

9. Истинная аномалия θ_1 точки Q равна $\psi - \omega$ и по ней возможно вычислить эксцентрисическую аномалию E_1 точки Q , а затем, пользуясь уравнением Кеплера, найти момент t_1 :

$$t_1 - t_0 = \frac{T}{2\pi}(E_1 - e \sin E_1), \quad (3.44)$$

Если эксцентриситет e небольшой (почти круговая орбита), то $t_1 - t_0$ можно определить с помощью более простой приближенной формулы

$$t_1 - t_0 = \frac{T}{2\pi} \left(\frac{\pi}{180} \theta_1 - 2e \sin \theta_1 \right) = T \left(\frac{\theta_1}{360} - e \frac{\sin \theta_1}{\pi} \right). \quad (3.45)$$

В момент t_1 спутник пройдет над данной параллелью с юга на север, то же повторится в любой другой момент:

$$t_k = t_1 + kT, \quad k = 1, 2, 3 \dots \quad (3.46)$$

Долготу точки B определяют по соотношению (см. п. 6):

$$\Lambda = \lambda_0 + \alpha_1 - \alpha_0,$$

а если учесть прецессию орбиты спутника, то спутник должен оказаться над пунктом N_k с долготой

$$\Lambda_k = \lambda_0 + \alpha_1 - \alpha_0 + \dot{\Omega}(t_k - t_0).$$

Переходя от системы отсчета $Oxuz$ к вращающейся системе отсчета $O\xi\eta\zeta$, определяют, что в момент t_k под спутником окажется пункт M_k с широтой φ и долготой

$$\Lambda_k = \lambda_0 + \alpha_1 - \alpha_0 + (\dot{\Omega} - \delta)(t_k - t_0). \quad (3.47)$$

Аналогично можно показать, что ИСЗ пройдет над заданной параллелью в момент t'_1 , определяемый формулой

$$t'_1 - t_0 = \frac{T}{2\pi}(E'_1 - e \sin E'_1), \quad (3.48)$$

где E'_1 — эксцентрическая аномалия точки орбиты спутника Q' , лежащей над пунктом B' . Спутник пройдет над данной параллелью также в каждый момент t'_κ , определяемый формулой

$$t'_\kappa = t'_1 + (\kappa - 1)T. \quad (3.49)$$

В каждый из этих моментов прохождение будет с севера на юг, при этом ИСЗ будет проходить над пунктами M'_κ с долготами

$$\Lambda'_\kappa = \lambda_0 + \alpha'_1 - \alpha_0 + (\dot{\Omega} - \delta)(t'_\kappa - t_0). \quad (3.50)$$

II. ИСТОЧНИКИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Информация (лат. Information – разъяснение, осведомление) – одно из наиболее общих понятий науки, обозначающее некоторые сведения, совокупность каких-либо данных, знаний и т.п. Понятие «информация» обычно предполагает наличие двух объектов – **источника информации** и **потребителя информации**.

Материальный объект, основной особенностью которого является то, что он создает совокупность сведений о своем состоянии, называется источником информации.

Чаще всего информация воспринимается как свойство объектов, явлений и процессов порождать многообразие состояний, которые посредством отражения (свойства, присущего всей материи) передаются от одного объекта к другому и запечатлеваются в его структуре. Отражением сообщения является сигнал, то есть сигнал – материальный носитель информации, средство её перенесения в пространстве и времени.

Получаемые и накапливаемые в процессе развития науки и практической деятельности данные, сведения, знания образуют информационные ресурсы (фр. ressources – средства, источники, запасы). По содержанию они представляют собой отображение естественных процессов и явлений, зафиксированных в результате научных исследований. Качество информационных ресурсов определяется адекватностью (лат. adaequatus – приравненный) даваемого ими отображения действительности, возможностью их использования в практической деятельности. Создание информационных ресурсов складывается из взаимосвязанных фаз воспроизводства, распространения и использования.

Основная фаза воспроизводства, то есть процесс познания состояния и законов развития природы, включает следующие стадии:

- наблюдение или сбор информации;
- обработка данных наблюдения и их анализ (обобщение фактов и установление существенных связей между явлениями и про-

цессами, методами фундаментальных научных дисциплин физики, математики и др.);

– прикладные исследования и разработки, цель которых – конкретизировать знания о действии фундаментальных законов и возможности их использования в определенной сфере деятельности;

– практическое использование в теоретических обоснованиях, при создании методов и моделей, в проектировании технических систем и т.п.

Солнце дает Земле свет и тепло, обеспечивая необходимый уровень освещенности и среднюю температуру её поверхности, является основной причиной всех погодо- и климатообразующих процессов и явлений, происходящих в географической оболочке, природу которых невозможно понять без информации обо всех видах излучения Солнца, изменчивости его лучистой энергии во времени и в пространстве, об особенностях трансформации солнечной радиации в системе Земля–атмосфера.

Радиационный режим Земли зависит от изменений светимости Солнца и колебаний элементов земной орбиты, эволюции состава атмосферы в результате естественных и антропогенных изменений. Так, например, положение суточного пути Солнца над горизонтом различных мест земной поверхности изменяется с годичным периодом вследствие годового движения Солнца по эклиптике, наклонной к небесному экватору, наклона земной оси к плоскости земной орбиты и сохранения земной осью своего направления в пространстве на протяжении длительных промежутков времени. Следовательно, с тем же годичным периодом изменяются условия их освещения и обогрвания Солнцем. Вместе с тем, склонение Солнца непрерывно меняется: в каждый день года оно находится на определенной «новой» параллели, восходя и заходя в точках её пересечения с истинным горизонтом и кульминируя в точках пересечения с небесным меридианом. Этим и объясняются различные пределы годичного изменения азимутов точек восхода и захода Солнца, его полуденной высоты, продолжительности дня и ночи на разных географических широтах, что ведет к неодинаковому освещению и обогрванию мест земной поверхности с разной географической широтой, является причиной смены времени года и существования теплых поясов на Земле.

Атмосферные процессы возникают в основном под действием астрономических и сложного комплекса физико-географических условий. Солнечная радиация обуславливает перенос воздуха и его трансформацию в результате обмена теплом и влагой с поверхностью моря и суши. Падающая на земную поверхность солнечная энергия вызывает интенсивное испарение влаги, служит причиной образования облаков, изменения общей циркуляции атмосферы и погодных условий.

Информация о собственном или отраженном излучении компонентов системы Земля-атмосфера, получаемая аппаратурой спутника в различных диапазонах длин волн электромагнитного спектра, позволяет оценить состояние естественных объектов и образований, характеризовать погодообразующие процессы и природные явления, рассчитать радиационный баланс, восстанавливать основные гидрометеорологические величины, исследовать репрезентативность того или иного диапазона при решении конкретных тематических задач в комплексном исследовании окружающей среды.

Лабораторная работа 4

Видимые движения Солнца и космическая съёмка Земли

Цель работы: изучить астрономические закономерности, связанные с обращением Земли вокруг Солнца и обуславливающие особенности условий космической съёмки системы Земля–атмосфера.

Годичное движение Солнца по эклиптике, так же как и суточное движение Солнца является отражением действительного движения Земли вокруг Солнца, а в суточном движении Солнце участвует вместе с остальными небесными светилами. Эти движения Солнца определяют поступление солнечной инсоляции (лат. *insolatio* – освещение), климатические пояса на Земле, смену времен года, радиационный баланс и освещенность подстилающей земной поверхности, периодическую смену дня и ночи и т. п., постоянно участвуют в формировании условий космической съёмки Земли.

Обращение Земли вокруг Солнца

Годичное движение Солнца. Земля обращается вокруг Солнца в плоскости, называемой плоскостью земной орбиты, и поэтому видимое годовое движение Солнца происходит в этой же самой плоскости, которая пересекает небесную сферу по большому кругу, называемому эклиптикой (рис. 23). Другими словами, плоскость эклиптики и плоскость земной орбиты идентичны (лат. *identicus* – тождественный, одинаковый).

Эклиптика и экватор, как большие дуги небесной сферы, пересекаются под определенным углом ϵ , который называется наклоением эклиптики к небесному экватору, но часто его определяют как наклонение небесного экватора к эклиптике, ибо плоскость земной орбиты (плоскость эклиптики) во многих прикладных задачах астрономии принимается за основную для построения эклиптической системы небесных координат (рис. 24). Так, на-

$$z_{\text{в}}^{\odot} = \varphi - \delta_{\odot}, \quad (4.1)$$

где φ – широта места наблюдения; δ_{\odot} – склонение Солнца. Зная величину ε и φ , по величине $z_{\text{в}}^{\odot}$ можно вычислить экваториальные координаты α_{\odot} и δ_{\odot} Солнца для всех дней года. Эти координаты сообщаются в астрономических ежегодниках (астрономических календарях) в таблице, называемой эфемеридой Солнца. Поэтому всегда можно проследить непрерывное изменение экваториальных координат Солнца на протяжении года, изменение его долготы λ_{\odot} и постоянство широты β_{\odot} (в эклиптической системе координат), найти точки равноденствий, в которых Солнце пересекает небесный экватор, и точки солнцестояний, в которых абсолютная величина склонения δ_{\odot} Солнца максимальная.

В каждом месте земной поверхности с определенной географической широтой φ условия видимости небесных светил зависят от их склонения δ , а точнее от соотношения величин φ и δ . В зависимости от этого соотношения одни светила являются незаходящими в данном месте Земли, другие – совсем не восходят над горизонтом данного места, третьи – восходят и заходят, причем продолжительность их пребывания над горизонтом на протяжении суток и положение точек их восхода и захода опять-таки зависят от соотношения φ и δ . Условия видимости светил выводятся из формул, определяющих их высоту в верхней и нижней кульминации. Высота невосходящего светила в верхней кульминации $h_{\text{в}} \leq 0^{\circ}$, а высота незаходящего светила в нижней кульминации $h_{\text{н}} \geq 0^{\circ}$. Соотношение между φ и δ определяет также расположение светила относительно зенита в момент верхней кульминации:

- при $\varphi < \delta$ светило кульминирует к югу от зенита;
- при $\varphi = \delta$ светило кульминирует в зените;
- при $\varphi > \delta$ светило кульминирует к северу от зенита.

Поэтому при вычислении зенитного расстояния $z_{\text{в}}$ или высоты $h_{\text{в}}$ светила в верхней кульминации около числового результата необходимо проставлять буквы S или N (точки юга или севера), указывающие направление верхней кульминации. Кроме того, поскольку высота светил может быть положительной и отрицательной, перед её числовым значением следует обязательно ставить соответствующий знак.

Рассмотренные условия видимости светил наглядно демонстрируются на модели (чертеже) небесной сферы.

В Северном полушарии Земли на всех географических широтах, удовлетворяющих условию $90^\circ > \varphi > \varepsilon$, Солнце всегда кульминирует к югу от зенита (по полуденной линии или меридиану), и наименьшее значение его зенитного расстояния бывает в день летнего солнцестояния 22 июня ($\delta_{\max}^\odot = +\varepsilon$), а наибольшее – в день зимнего солнцестояния 22 декабря ($\delta_{\min}^\odot = -\varepsilon$).

Моменты восхода T_B^\odot и захода T_3^\odot Солнца, как и азимуты его восхода A_B^\odot и захода A_3^\odot , зависят не только от склонения δ_\odot Солнца, но и от географической широты φ места земной поверхности. Точные значения перечисленных параметров вычисляются по соответствующим формулам сферической астрономии на основе решения так называемого астрономического треугольника.

Астрономическим треугольником называется сферический треугольник, вершинами которого служат северный полюс мира P , полюс эклиптики Π и светило M (рис. 25).

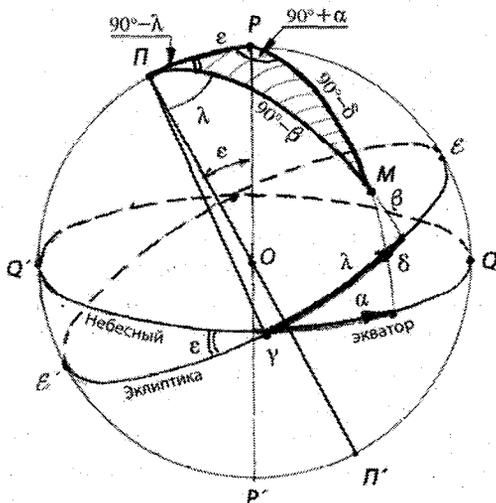


Рис. 25. Астрономический треугольник

В суточном вращении небесной сферы все элементы этого треугольника остаются неизменными. Применяв к нему соответствующие формулы сферической тригонометрии, можно получить

формулы синусов, косинусов и пяти элементов для преобразования координат.

Необходимо заметить, что в зависимости от положения Солнца на эклиптике условия видимости небесных тел (созвездий) на протяжении года непрерывно изменяются, и одно и то же созвездие в разные времена года видно в различное время суток.

Видимое годовое движение Солнца в различных широтах происходит по-разному:

– на Северном полюсе Солнце восходит около 21 марта, достигает максимальной высоты ($23^{\circ}27'$) 22 июня и заходит около 23 сентября; то есть на полюсе полгода продолжается полярный день, остальные полгода – полярная ночь;

– на земном экваторе день всегда равен ночи; 21 марта и 23 сентября Солнце в полдень бывает в зените; наименьшая полуденная высота его $66^{\circ}33'$ наблюдается 22 июня (к северу от зенита) и 22 декабря (к югу от зенита);

– на Северном полярном круге ($\varphi = 66^{\circ}33'$ с.ш.) в день летнего солнцестояния (22 июня) Солнце не заходит, касаясь лишь в полночь горизонта в точке севера (N), а в день зимнего солнцестояния (22 декабря) Солнце не восходит, лишь появляется в полдень на горизонте в точке юга (S);

– на географическом северном тропике (греч. tropicos – круг поворота) или тропике Рака ($\varphi = 23^{\circ}27'$) Солнце в день летнего солнцестояния (22 июня) в полдень проходит через зенит; в день зимнего солнцестояния (22 декабря) оно бывает в зените на южном тропике (тропике Козерога).

Отсюда идет деление земной поверхности на климатические пояса: тропический (жаркий) пояс – между тропиками, полярные (холодные) пояса – северный и южный (Арктика и Антарктика), два умеренных пояса (северный – между широтами $23^{\circ}27'$ с.ш. и $66^{\circ}33'$ с.ш., южный – между параллелями $23^{\circ}27'$ ю. ш. и $66^{\circ}33'$ ю. ш.).

Следствием движения Земли вокруг Солнца, наклона оси вращения Земли к плоскости орбиты и постоянства этого наклона является регулярная смена времен года на Земле.

Суточное движение Солнца. В процессе суточного вращения небесной сферы положение эклиптики относительно истинного горизонта непрерывно изменяется, причем самое высокое и самое

низкое положение эклиптики занимает в момент восхода и захода её равноденственных точек. Другими словами, условия суточного вращения небесной сферы изменяются при изменении широты φ места наблюдения, так как для разных широт наклон оси мира к горизонту будет различный.

Наступление различного времени суток зависит от положения Солнца над горизонтом, и поэтому в практической жизни счет времени ведется по положению Солнца относительно небесного меридиана. Видимое суточное движение Солнца, Луны и звезд по их суточным параллелям объясняется равномерным вращением Земли вокруг своей оси. В течение суток небесные светила дважды проходят через меридиан наблюдателя. Прохождение светила через полуденную часть меридиана наблюдателя называется верхней кульминацией, а прохождение его через полуночную часть меридиана – нижней кульминацией.

Моменты прохождения светила через меридиан наблюдателя можно выразить соотношениями между склонением δ , зенитным расстоянием z и географической широтой φ места наблюдателя (рис. 26):

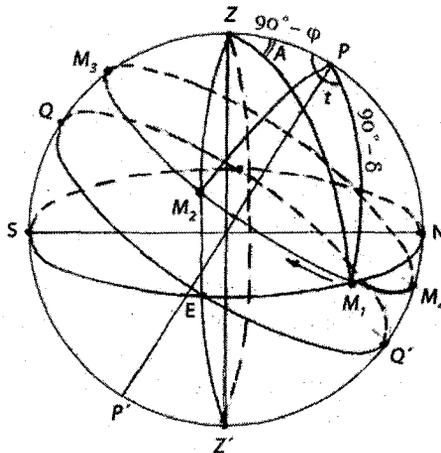


Рис. 26. Моменты прохождения светил

$$z = \varphi - \delta, \text{ светило } M_1 \text{ к югу от зенита;}$$

или

$$h = 90^\circ - \varphi + \delta; \text{ если } \delta = \varphi, \text{ то светило кульминирует в зените:}$$

$$z = 0^\circ,$$

$$h = +90^\circ.$$

$z = \delta - \varphi$, светило M_2 к северу от зенита;

$$h = 90^\circ + \varphi - \delta.$$

$z = 180^\circ - (\varphi + \delta)$, светило M_3 в нижней кульминации.

$$h = \delta = (90^\circ - \varphi) = \varphi + \delta - 90^\circ. \quad (4.2)$$

Меридиональная высота (высота светила, находящегося на полуденной или полуночной части меридиана наблюдателя), а также продолжительность пребывания светила над горизонтом и положение точек его восхода и захода зависят от соотношения между склонением δ светила и широтой φ места наблюдения:

– на географическом полюсе ($\varphi = 90^\circ$) все звёзды (Солнце и Луна) описывают суточные круги, параллельные горизонту; высота h одной и той же звезды постоянна и равна её склонению δ ;

– на земном экваторе ($\varphi = 0^\circ$) суточные круги всех звезд перпендикулярны плоскости истинного горизонта; все небесные светила видны в течение 12 ч и столько же времени не видны;

– на произвольной широте ($0^\circ < \varphi < 90^\circ$) небесный экватор и суточные параллели всех светил наклонены под углом $90^\circ - \varphi$ к плоскости истинного горизонта.

Заметим, что световые лучи, идущие к Земле от небесных светил, искривляются в земной атмосфере, так как показатель преломления воздуха больше единицы.

Отклонение светового луча в атмосфере от своего первоначального направления по законам преломления называется рефракцией.

Это отклонение всегда происходит в сторону зенита, поэтому наблюдаемое светило кажется выше своего действительного положения. Другими словами, астрономическая рефракция всегда уменьшает зенитное расстояние z светила.

Приблизительное значение поправки ρ за рефракцию (для $z \leq 70^\circ$) может быть вычислено по формуле

$$\rho = 60,2 \frac{P}{760} \frac{273}{273 + t_c} \operatorname{tg} z, \quad (4.3)$$

где P – атмосферное давление (мм рт. ст.); t_c – температура воздуха по Цельсию в момент наблюдения, °С. Для светила, расположенного на горизонте, $\rho \approx 35'$.

Более точное значение поправки за рефракцию определяется по специальным таблицам (например, «Пулковские таблицы рефракции», «Мореходные таблицы» и др.).

Поправка ρ должна быть прибавлена к измеренному значению z .

Для светил, имеющих угловые размеры (Солнце, Луна), в моменты восхода и захода необходимо учитывать и величину полу диаметра видимого диска (например, для Солнца в среднем равную $16'$). Так, в момент видимого восхода верхнего края диска Солнца его центр (рис. 27) фактически находится ниже истинного горизонта на $51'$.

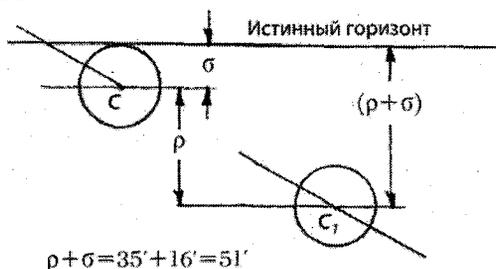


Рис. 27. Поправки на величину видимого диска Солнца

После восхода Солнце, поднимаясь по небосводу, достигает около полудня максимальной высоты, а затем снова опускается к земной поверхности. После захода Солнца за горизонт освещенность Земли уменьшается сначала очень быстро, потом медленнее и постепенно переходит в темноту. В связи с наличием атмосферы и её способностью рассеивать свет переход от дня к ночи совершается не сразу, растягиваясь на некоторый промежуток времени, называемый сумерками. В зависимости от глубины погружения Солнца под горизонт и соответствующей освещенности земной поверхности различают:

- сумерки гражданские (от момента захода Солнца до погружения его на глубину $6-8^\circ$);
- сумерки морские, или навигационные (с конца гражданских сумерек до погружения Солнца на 12° под горизонт);

– сумерки астрономические (с конца навигационных сумерек до погружения Солнца на глубину около 18°).

При значительном замутнении атмосферы конец астрономических сумерек затягивается до углов погружения $22\text{--}23^\circ$.

Сумерки переходят в ночь; исчезают последние следы зари, на небе видны звезды. Продолжительность сумерек зависит также от географической широты и времени года. С увеличением широты длительность сумерек увеличивается, и на некоторых широтах вечерние и утренние сумерки сливаются – наступают белые ночи. Самые длинные сумерки наблюдаются в дни летнего и зимнего солнцестояний, а самые короткие – в дни равноденствий.

Облака уменьшают освещенность во время сумерек и чем они плотнее, тем заметнее это уменьшение.

Снежный покров увеличивает освещенность только в начале гражданских сумерек (максимально на 10 %), а дальше его влияние практически не сказывается.

Условия космической съемки. Особенности движения Солнца по эклиптике непрерывно воздействуют на его склонение. Образно говоря, Солнце постоянно переходит с одной небесной параллели на другую: в каждый день года оно находится на определенной небесной параллели, склонение которой равно склонению Солнца в данный день, и поэтому в суточном вращении небесной сферы Солнце движется по этой параллели, восходя и заходя в точках её пересечения с истинным горизонтом и кульминируя в точках её пересечения с меридианом, обеспечивая прежде всего естественную освещенность земной поверхности.

Под естественной освещенностью земной поверхности обычно понимают падающий на единицу этой поверхности световой поток, создаваемый прямой и рассеянной солнечной радиацией днем или другими источниками (Луна) ночью.

Этим и объясняются различные пределы годичного изменения азимутов точек восхода и захода Солнца, его полуденной высоты, продолжительности дня и ночи на разных географических широтах, что ведет к неодинаковому освещению и обогреванию мест земной поверхности с разной географической широтой, является причиной смены времен года и существования климатических поясов на Земле и пр. Другими словами, естественная освещен-

ность определяет условия космической съемки, которая является составной частью дистанционного зондирования Земли.

Совокупность работ по получению изображений Земли в целом или специальный визуализированной информации (снимков) об изучаемых компонентах её географической оболочки с помощью космических аппаратов принято называть космической съемкой.

В качестве основных природных условий космической съемки чаще всего рассматривают источники электромагнитного излучения, изучаемые естественные объекты, процессы или явления, окружающую среду (атмосферу, земную поверхность и т.п.), которые не зависят от человека – они определяются, выбираются и учитываются с целью оптимизации съемочного процесса (например, время съемки: высота Солнца, его положение относительно изучаемого объекта, создаваемая общая освещенность исследуемой территории; прозрачность атмосферы и т.д.)

Для получения изображения каждого района Земли регулярно около полудня (в это время наблюдаемые районы освещены хорошо) используют так называемые солнечно-синхронные орбиты, плоскость которых поворачивается (прецессирует) синхронно с обращением Земли вокруг Солнца в восточном направлении с угловой скоростью около одного градуса в сутки (точнее 0,9856 градуса в сутки). Необходимая скорость прецессии зависит от наклона орбиты и её фокального параметра (расстояния её от центра Земли или высоты), а обеспечивается при запуске спутника выбором необходимого угла наклона орбиты к экватору.

Солнечно-синхронные орбиты замечательны тем, что условия освещенности подспутниковой полосы на земной поверхности остаются неизменными в течение длительного периода времени. В эту полосу из-за суточного вращения Земли попадают различные участки земной поверхности, но картина изменения высоты Солнца над ними повторяется от витка к витку. Требуемые же условия освещенности обеспечиваются соответствующим выбором момента запуска ИСЗ по местному времени, которым и определяется положение его плоскости орбиты относительно направления на Солнце: орбитальная плоскость спутника должна быть компла-

нарна* с направлением Земля–Солнце. Для солнечно-синхронной орбиты угол наклона:

$$i_{cc} \approx \arccos \left[-0,0986 \left(1 + \frac{H_A + H_{II}}{r_3} \right)^{-3,5} \right], \quad (4.4)$$

где H_A и H_{II} – соответственно расстояние от земной поверхности до точек апогея и перигея орбиты; r_3 – экваториальный радиус. Спутники, находящиеся на обратных наклонных солнечно-синхронных орбитах ($i_{cc} > 90^\circ$), проходят над определенной точкой земной поверхности в одно и то же местное время. Это свойство является важным при решении ряда метеорологических задач по материалам спутниковых наблюдений.

Контрольные вопросы

1. Что такое эклиптика?
2. Под каким углом эклиптика пересекается с экватором?
3. В каком направлении происходит движение Солнца по эклиптике?
4. Начертите небесную сферу с экватором и эклиптикой. Отметьте на чертеже четыре основные точки на эклиптике, назовите время восхода и захода Солнца?
5. От каких обстоятельств зависит время восхода и захода Солнца?
6. Как меняется в течение года суточный путь Солнца по небу для наблюдателя, находящегося в средних широтах? На экваторе Земли? На полюсе Земли?
7. Что такое тропики, как они называются и почему?
8. Чем объясняется смена времен года и сопутствующие этому изменения в продолжительности дня и ночи на разных географических широтах?
9. Чем определяется положение на Земле Северного полярного круга?
10. Охарактеризуйте атмосферную рефракцию и явление сумерек.
11. Что понимают под естественной освещенностью?
12. Воздействуют ли на естественную освещенность земной поверхности её снежный покров и облака в атмосфере?
13. Что называют космической съемкой?
14. Назовите основные компоненты природных условий космической съемки.
15. Чем замечательны солнечно-синхронные орбиты МСЗ?

Задачи

- 4.1. Рассчитать приближенно высоту h_\odot Солнца над горизонтом в полдень 12 июня для пункта, широта которого $\varphi = 43^\circ \text{ N}$.

* Векторы, лежащие в одной или в параллельных плоскостях, называются компланарными. Аналогично прямые, лежащие в одной плоскости, называются компланарными, а не лежащие в одной плоскости – некомпланарными. В частности, две скрещивающиеся прямые – некомпланарные.

- 4.2. Определить приближенно даты прохождения Солнца через зенит в пункте, широта которого $\varphi = 8^\circ \text{ S}$.
- 4.3. Определить приближенно широту φ пункта наблюдения, в котором Солнце прошло через зенит 5 апреля.
- 4.4. Приближенным расчетом определить, будет ли восход и заход Солнца 1 мая в Мурманске ($\varphi = 68^\circ 58' \text{ N}$). Найти высоту h_\odot Солнца над горизонтом в полдень и рассчитать приближенно его прямое восхождение α_\odot на 1 мая.
- 4.5. Какова продолжительность дня 4 августа на широте $\varphi = 53^\circ 30'$?
- 4.6. Вычислить продолжительность дня, время восхода и захода Солнца 19 декабря на широте $\varphi = 45^\circ 30'$.
- 4.7. Сколько часов и минут продолжается день на широтах: $\varphi_1 = 25^\circ$, $\varphi_2 = 40^\circ$, $\varphi_3 = 60^\circ$ 15 июля?
- 4.8. Сколько часов и минут продолжается день 15 ноября на тех же широтах, что и в предыдущей задаче?
- 4.9. Во сколько раз самый короткий день меньше самого длинного дня на следующих широтах: 10° , 30° и 60° ?
- 4.10. Наблюдатель находится на широте $59^\circ 30'$. На какой высоте над горизонтом наблюдателя будет находиться Солнце в полдень 21 февраля и 13 августа?
- 4.11. Широта станции $\varphi = 55^\circ 20'$. Чему равна максимальная высота Солнца для этой станции 14 ноября?
- 4.12. Сколько суток продолжается непрерывный день на широте 75° ?
- 4.13. Вычислить экваториальные координаты Солнца по его зенитному расстоянию, измеренному весной, в истинный полдень и указать день года, в который произведено измерение:

Алма-Ата, $z = 34^\circ 04'$	Москва, $z = 63^\circ 58'$;
Тбилиси, $z = 37^\circ 25'$	Ашхабад, $z = 47^\circ 50'$;
Петербург, $z = 42^\circ 22'$	Иркутск, $z = 59^\circ 32'$;
Николаев, $z = 40^\circ 19'$	Ташкент, $z = 52^\circ 37'$.
- 4.14. Преобразовать полученные в предыдущей задаче экваториальные координаты Солнца в эклиптические координаты.
- 4.15. Определить высоту h_\odot Солнца в Ялте и Петрозаводске в 4 ч дня по местному времени: а) 1 января и 1 июля; б) 1 февраля и 1 августа; в) 1 марта и 1 сентября; г) 1 апреля и 1 октября; д) 1 мая и 1 ноября; е) 1 июня и 1 декабря; ж) 15 января и 15 июля; з) 15 февраля и 15 августа.
- 4.16. По общим результатам предыдущей задачи построить график значений высоты, азимута и часового угла Солнца для одного и того же момента суток разных дней года в обоих городах и объяснить причину обнаруженной на графике закономерности изменения трех указанных координат Солнца.
- 4.17. Определить часовые углы и азимуты точек восхода и захода солнца, а также продолжительность гражданских и астрономических сумерек в тех же городах, в те же дни года.
- 4.18. По общим результатам задачи 4.17 построить графики изменения часовых углов и азимутов восхода и захода Солнца, а также продолжительности гражданских и астрономических сумерек на протяжении года в тех же городах.

- 4.19. Из сопоставления построенных в задаче 4.18 графиков найти и объяснить закономерности изменения однородных величин на протяжении года в разных пунктах земной поверхности.
- 4.20. Определить декретное время восхода и захода Солнца 4 октября 1967 г. во Владивостоке ($\varphi = 43^{\circ}07' N$; $\lambda = 8 \text{ ч } 47 \text{ мин } 29 \text{ с E}$).
- 4.21. Определить декретное время восхода и захода Луны 18 июня 1967 г. в Москве ($\varphi = 55^{\circ}45' N$; $\lambda = 2 \text{ ч } 30,3 \text{ мин E}$).
- 4.22. Вычислить моменты времени и азимуты точек восхода и захода Солнца: а) 21 марта в Архангельске; б) 22 июня в Архангельске; в) 23 сентября в Архангельске; г) 22 декабря в Архангельске; д) 21 марта в Ашхабаде; е) 22 июня в Ашхабаде; ж) 23 сентября в Ашхабаде; з) 22 декабря в Ашхабаде.
- 4.23. Вычислить для той же даты продолжительность дня и ночи и высоту Солнца в истинный полдень в том же городе.
- 4.24. По полученным результатам в задачах 4.22 и 4.23 для одного города построить график зависимости продолжительности дня и ночи, полуденной высоты и азимутов точек восхода и захода Солнца от его склонения.
- 4.25. Дать объяснение обнаруженной на графике закономерности.
- 4.26. Рассчитать приближенно продолжительность белых ночей для Санкт-Петербурга ($\varphi = 59^{\circ}57' N$).
- 4.27. Рассчитать приближенно продолжительность гражданских белых ночей для Архангельска ($\varphi = 64^{\circ}33' N$).
- 4.28. Рассчитать приближенно начало и конец гражданских белых ночей для пункта, расположенного на широте $\varphi = 60^{\circ} S$.
- 4.29. Рассчитать приближенно продолжительность сплошных астрономических сумерек для Москвы ($\varphi = 55^{\circ}45' N$).
- 4.30. Определить приближенным расчетом продолжительность полярного дня в Мурманске ($\varphi = 68^{\circ}58' N$).
- 4.31. Определить продолжительность полярной ночи в Мурманске.
- 4.32. Определить продолжительность даты начала и конца полярного дня в пункте, расположенном на широте $\varphi = 70^{\circ} S$.
- 4.33. Определить приближенно продолжительность полярной ночи в пункте, широта которого $\varphi = 69^{\circ} S$.
- 4.34. Определить приближенно продолжительность полярного дня в пункте, широта которого $\varphi = 70^{\circ} N$.

Материалы для работы

1. Модель (чертеж) небесной сферы.
2. Астрономический календарь (постоянная часть и ежегодник).
3. Морской астрономический ежегодник.
4. Таблицы тригонометрических функций и их логарифмов.
5. Линейка, циркуль, транспортир и карандаш.
6. Калькулятор (или компьютер).

Рекомендуемая литература

1. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. – М.: Наука, 1977; глава первая, § 28–33.
2. Говердовский В.Ф. Космическая метеорология, ч. I. Спутниковая метеорология. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009.
3. Пятизначные таблицы логарифмов чисел и тригонометрических функций. – М.: Геодезиздат, 1957.

Порядок выполнения работы

1. Построить (на чертеже или дисплее компьютера) небесную сферу и изобразить на ней большие круги, обозначающие меридиан наблюдателя, небесный экватор, эклиптику, ось мира PP' и ось эклиптики $ПП'$ (рис. 25). По небесному меридиану полюс эклиптики P отстоит от Северного полюса мира P на угол $\varepsilon = 23^\circ 27'$. Следовательно, в астрономическом треугольнике ΔPPM одна сторона $PP = \varepsilon$, другая сторона $PM = p = 90^\circ - \delta$ и третья сторона $PM = n = 90^\circ - \beta_\odot$, что следует из определения координат в соответствующих системах.

Направление Oy на точку весеннего равноденствия γ перпендикулярно к плоскости круга склонения $Q'PPQ$, на котором находятся полюсы P и P , и поэтому в астрономическом треугольнике угол при полюсе эклиптики $\angle MPP = 90^\circ - \lambda$, а угол при полюсе мира $\angle PPM = 90^\circ + \alpha$.

2. Поскольку Солнце находится на эклиптике ($\beta_\odot = 0^\circ$), для выражения связи между координатами α_\odot , δ_\odot и λ_\odot необходимо использовать прямоугольный сферический треугольник (рис. 28), образованный дугами небесного экватора (α_\odot), эклиптики (λ_\odot) и круга склонения (δ_\odot). Измеряя зенитное расстояние z'_\odot Солнца в момент его верхней кульминации и исправляя это расстояние за рефракцию (4.3), находят склонение δ_\odot Солнца, по которому вычисляют его прямое восхождение α_\odot и долготу λ_\odot по формулам:

$$\sin \alpha_\odot = \operatorname{tg} \delta_\odot \operatorname{ctg} \varepsilon, \quad (4.5)$$

$$\sin \lambda_\odot = \sin \delta_\odot \operatorname{cosec} \varepsilon. \quad (4.6)$$

Эти формулы позволяют вычислить положение Солнца на эклиптике и всегда знать положение точки весеннего равноденствия γ , хотя она на небе не видна.

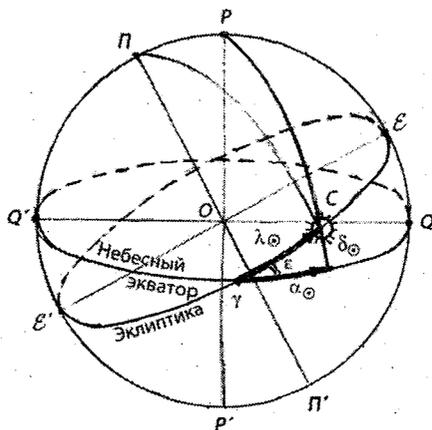


Рис. 28. Положение Солнца на эклиптике

3. Вывести формулы для преобразования экваториальных координат α_{\odot} и δ_{\odot} Солнца в эклиптические λ_{\odot} и β_{\odot} , упростить их и использовать полученные соотношения для решения рекомендованных задач.

а) Для приближенных расчетов суточное изменение прямого восхождения $\Delta\alpha_{\odot}$ Солнца обычно принимают равным 1° в течение всего года. При необходимости можно использовать и более точные значения $\Delta\alpha_{\odot}$: вблизи точек равноденствий равное $0,9^{\circ}$, вблизи точки летнего солнцестояния равное 1° , а вблизи точки зимнего солнцестояния равное $1,1^{\circ}$ в сутки.

б) Суточное изменение склонения $\Delta\delta_{\odot}$ Солнца в дни солнцестояний практически отсутствует (равно нулю), а около точек равноденствия $\Delta\delta_{\odot} \approx 0,4^{\circ}$ при $\Delta\lambda_{\odot} \approx 1^{\circ}$.

Это же изменение склонения $\Delta\delta_{\odot}$ Солнца в дни, отстоящие от точек солнцестояния на полмесяца (15 дней), возрастает до $\pm 0,1^{\circ}$; в дни, отстоящие от точек солнцестояния на месяц, $\Delta\delta_{\odot} \approx \pm 0,2^{\circ}$ и, соответственно, в дни, отстоящие на месяц от точек равноденствия, $\Delta\delta_{\odot} \approx \pm 0,35^{\circ}$, а на полтора месяца (45 дней) $\Delta\delta_{\odot} \approx \pm 0,3^{\circ}$.

Другими словами, суточное изменение прямого восхождения Солнца можно в среднем принять равным 1° . Для приближенных же расчетов склонения Солнца принимают, что в течение месяца (30 дней) перед каждым равноденствием и в течение месяца после

каждого равноденствия оно равно $\pm 0,4^\circ$, а в течение месяца перед каждым солнцестоянием и после него составляет $\pm 0,1^\circ$. В период же промежуточных, между указанными, месяцев его значение принимают равным $\pm 0,3^\circ$.

4. Решить предложенные задачи, используя рекомендуемые методические указания.

5. Проанализировать полученные результаты, оценить точность решения, принимая во внимание допущенные в ходе решения задачи ограничения и поправки.

6. В произвольной форме составить краткий отчет о проделанной работе, сопровождая его необходимыми иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками и т.п.).

Методические указания

1. Высота полюса мира h_P над горизонтом всегда равна астрономической широте φ места наблюдения (рис. 29), следствием этого является (рис. 30) равенство широты места наблюдения склонению зенита ($\varphi = \delta_z$), полярному расстоянию точки севера ($\varphi = P_N$) и зенитному расстоянию верхней точки экватора ($\varphi = z_Q$). Поскольку зенитное расстояние полюса мира

$$z_P = 90^\circ - h_P = 90^\circ - \varphi,$$

то величине $(90^\circ - \varphi)$ равны также полярное расстояние зенита ($P_z = 90^\circ - \varphi$), склонение точки севера ($\delta_N = 90^\circ - \varphi$) и высота верхней точки экватора ($h_Q = 90^\circ - \varphi$).

Зенитное расстояние z и высота светила h в моменты кульминации зависят прежде всего от его склонения δ и широты φ места наблюдения. Поэтому для определенной широты φ_0 склонение Солнца δ_\odot можно рассчитать по следующим соотношениям:

$$\delta_\odot = \varphi_0 - z_\odot \quad \text{или} \quad (4.7)$$

$$\delta_\odot = h_\odot + \varphi_0 - 90^\circ;$$

если оно находится между зенитом и точкой юга;

$$\delta_\odot = \varphi_0 + z_\odot \quad \text{или} \quad (4.8)$$

$$\delta_\odot = h_\odot - (90^\circ - \varphi_0);$$

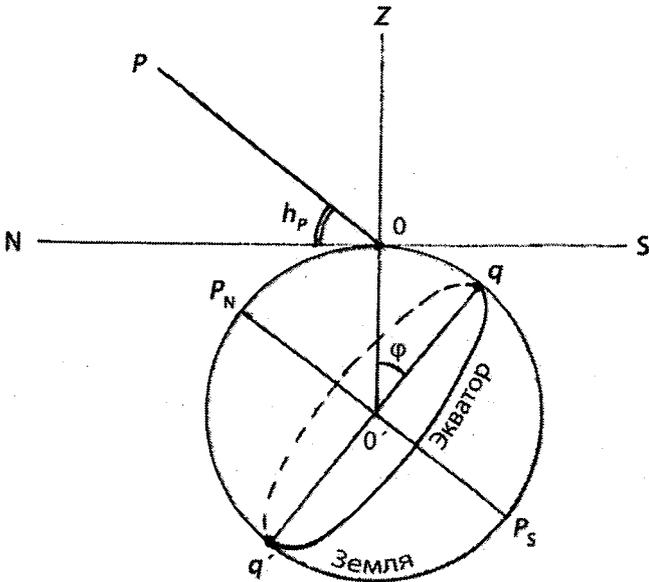


Рис. 29. Связь высоты Полюса мира с географической широтой

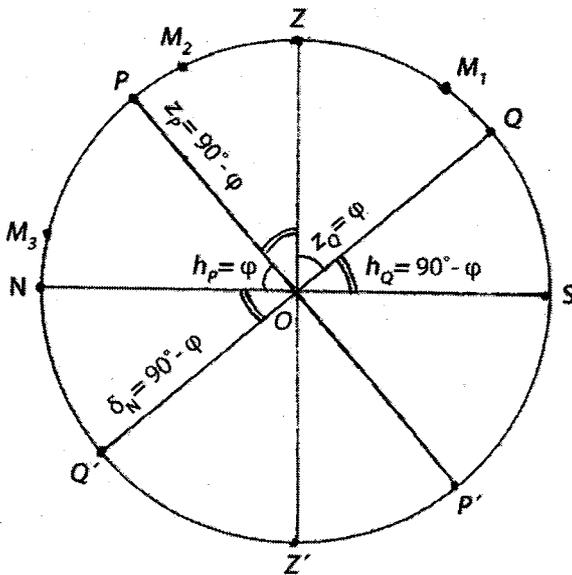


Рис. 30. Проекция небесной сферы на плоскость небесного меридиана

если Солнце наблюдается между зенитом и полюсом мира;

$$\delta_{\odot} = 180^{\circ} - \varphi_0 - z_{\odot} \quad \text{или} \quad (4.9)$$

$$\delta_{\odot} = 90^{\circ} - (\varphi_0 - h_{\odot});$$

если оно находится в нижней кульминации;

$$\delta_{\odot} = \varphi_0, z_{\odot} = 0 \quad \text{или} \quad (4.10)$$

$$h_{\odot} = +90^{\circ},$$

если светило кульминирует в зените.

Измеряя зенитное расстояние z_{\odot} Солнца в момент его верхней кульминации, то есть в истинный полдень, в каждый день наблюдений можно определить не только его склонение δ_{\odot} , но и прямое восхождение α_{\odot} для этого же момента по формуле:

$$\sin \alpha_{\odot} = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \varepsilon}, \quad (4.11)$$

причем ε – наклонение небесного экватора к эклиптике вычисляется из наблюдений, произведенных около дней летнего и зимнего солнцестояний, определяющих экстремальные значения этого угла.

Экваториальные координаты α_{\odot} и δ_{\odot} Солнца на каждый день содержатся в астрономических ежегодниках (астрономических календарях), в таблице, называемой эфемеридой Солнца. Прямое восхождение α_{\odot} Солнца может быть также подсчитано с достаточной степенью точности по соотношению:

$$\alpha_{\odot} = S_0 + T_k + 9,86 T_k, \quad (4.12)$$

где S_0 – звездное время в среднюю гринвичскую полночь (в 00 ч всемирного или Гринвичского времени) и T_k – момент верхней кульминации по среднему гринвичскому (всемирному) времени. Значение S_0 и T_k приводятся в эфемериде Солнца.

Если значение α_{\odot} достаточно знать с точностью до 2 мин ($0,5^{\circ}$), то поправка $9,86 T_k$ может быть принята равной 2 мин, а при меньшей точности и совсем опущена, то есть в первом случае

$$\alpha_{\odot} = S_0 + T_k + 2 \text{ [мин]}, \quad (4.13)$$

а во втором

$$\alpha_{\odot} = S_0 + T_k. \quad (4.14)$$

2. Известно, что светило (Солнце, Луна) восходит или заходит на заданной широте φ , если абсолютное значение его склонения

$$|\delta| < (90^\circ - |\varphi|). \quad (4.15)$$

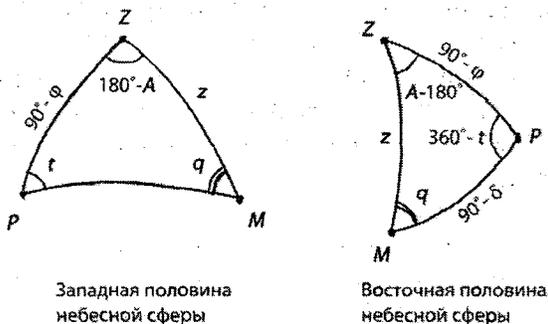


Рис. 31. Изменение элементов параллактического треугольника вследствие суточного движения небесной сферы

В общем случае для любого небесного тела M можно построить параллактический треугольник, вид которого зависит от широты φ места наблюдателя (от взаимного расположения Северного полюса мира P и зенита Z) и от момента наблюдения, т.е. от часового угла t (а затем и прямое восхождение $\alpha = s - t$) по измеренным (или известным) зенитному расстоянию Z и азимуту A этого небесного тела в момент звездного времени S . Другими словами, путем перехода от горизонтальных координат небесного тела к его экваториальным координатам.

Если небесное тело M находится в западной половине небесной сферы, можно вычислить его склонение δ и часовой угол t (а затем и прямое восхождение $t = s - t$) по измеренным (или известным) зенитному расстоянию z и азимуту A этого небесного тела в момент звездного времени s . Другими словами, путем перехода от горизонтальных координат небесного тела к его экваториальным координатам.

Если небесное тело M находится в восточной половине небесной сферы, то для вычисления зенитного расстояния Z и азимута A (для любого момента звездного времени S и для любой широты φ) по известному склонению небесного тела δ и его часовому

углу $t = s - \alpha$. Иначе говоря, осуществляется переход от экваториальных координат небесного тела к его горизонтальным координатам.

Аналогичным способом, на основе использования формулы сферической тригонометрии к соответствующему параллактическому треугольнику, вычисляют момент времени восхода и захода небесных тел и их азимутов в эти моменты, а также решают важнейшие задачи практической астрономии – определение географической широты места наблюдения φ и определение местного звездного времени.

При движении по суточной параллели (см. рис. 26) светило M последовательно занимает положение M_1, M_2, M_3 и M_4 и при этом непрерывно изменяются его часовой угол t , азимут A и зенитное расстояние $z = (90^\circ - h)$. Часовой угол t светила изменяется равномерно, пропорционально времени. Наименьшее значение азимута A наблюдаемого светила (восходящего и заходящего) соответствует положению M_1 в момент его восхода, а наибольшее – при его заходе в точке M_4 . Высота h светила непрерывно растет от 0 в положении M_1 при восходе до некоторого максимального значения в положении M_3 в момент верхней кульминации светила; затем при заходе высота светила убывает до нуля. В положении M_2 при прохождении светила через первый вертикал азимут его $A = 90^\circ$. В нижней кульминации (положение M_4 для заходящего светила) высота светила отрицательна.

Для вычисления изменения азимута ΔA и высоты Δh , соответствующих небольшому изменению часового угла Δt , можно использовать формулы:

$$\Delta A = -(\sin\varphi - \cos\varphi \operatorname{tg}h \cos A) \Delta t, \quad (4.16)$$

$$\Delta h = -\cos\varphi \sin A \Delta t. \quad (4.17)$$

При $h = 0^\circ$ или при $A = 90^\circ$, то есть при восходе и заходе, а также при прохождении светила через первый вертикал формула (4.16) принимает вид

$$\Delta A = -\sin\Delta t. \quad (4.18)$$

В этих случаях азимут изменяется равномерно, но с разными скоростями: в момент кульминаций ($A = 180^\circ$ и $A = 0^\circ$) скорость становится наибольшей.

При положении светила вблизи первого вертикала ($A \approx 90^\circ$, $\sin 90^\circ \approx 1$) изменение высоты Δh происходит равномерно и пропорционально времени Δt :

$$\Delta h = -\cos \varphi \Delta t. \quad (4.19)$$

Моменты восхода $T_в$ и захода $T_з$ Солнца, как и азимуты точек его восхода $A_в$ и захода $A_з$, зависят не только от склонения δ_\odot Солнца, но и от географической широты φ места земной поверхности. Моменты времени восхода и захода Солнца на разных географических широтах в различные дни года определяются по графику, на одной оси которого отложены даты, на другой – интервалы времени t , считаемые от полудня (часовые углы Солнца). Связь между датами и этими интервалами времени, различная для разных географических широт, обычно бывает представлена семейством кривых, каждая из которых действительна только для указанной географической широты φ . Для заданной даты и определенной широты интервал времени t можно вычислить и по данным астрономического ежегодника или календаря, тогда получим:

момент восхода Солнца

$$T_в = 12 \text{ ч} - t, \quad (4.20)$$

момент захода Солнца

$$T_з = 12 \text{ ч} + t, \quad (4.21)$$

то есть соотношения, по которым определяется продолжительность дня τ_d и продолжительность ночи τ_n .

3. Для определения продолжительности дня τ_d графическим способом (рис. 32) чертят окружность произвольного радиуса и проводят два взаимно перпендикулярных диаметра: небесный экватор EQ и ось мира PP' . При помощи транспортира откладывают от линии EQ угол $\angle QOS = \delta_\odot$ (склонение Солнца) и проводят перпендикулярную к OS линию AB . Эта линия отделяет освещенную часть Земли от неосвещенной. Затем строят угол $\angle QOM = \varphi_0$ (широта места наблюдения). Через точку M проводят параллельную экватору прямую MM_1 , и на этой прямой, как на диаметре, строят новую окружность (мысленно рассекается земной шар по линии MM_1 , и получившаяся плоскость поворачивается вокруг оси MM_1 до совмещения с плоскостью чертежа). Через точку пересечения прямых MM_1 и AB (через точку C) проводят прямую, параллель-

ную оси PP_1 , и измеряют дуги: $aM_в$ (дневная дуга) и $aM_н$ (ночная дуга). Величина дневной дуги, выражаемая в часах и минутах, дает продолжительность дня.

Пример: Определить продолжительность дня 25 мая на широте 56° , а также время восхода и захода Солнца.

Решение: а) В астрономическом ежегоднике (или справочнике) находим склонение Солнца 25 мая $\delta_\odot = +20^\circ 53'$ и откладываем угол $\angle QOS = 20^\circ 53'$.

Так как $\varphi_0 = 56^\circ$, то откладываем угол $\angle QOM = 56^\circ$ (рис. 32).

б) Измеряем дугу $aM_в$, которая оказывается равной 248° , что в единицах времени дает $248/15 = 16,53$ [ч] = 16 ч 32 мин (продолжительность дня).

в) От восхода Солнца до момента полдня прошло $\frac{16\text{ч}32\text{мин}}{2} = 8\text{ч}16\text{мин}$. Следовательно, время восхода Солнца $T_в = 12\text{ч} - 8\text{ч}16\text{мин} = 3\text{ч}44\text{мин}$, а время захода $T_з = 12\text{ч} + 8\text{ч}16\text{мин} = 20\text{ч}16\text{мин}$.

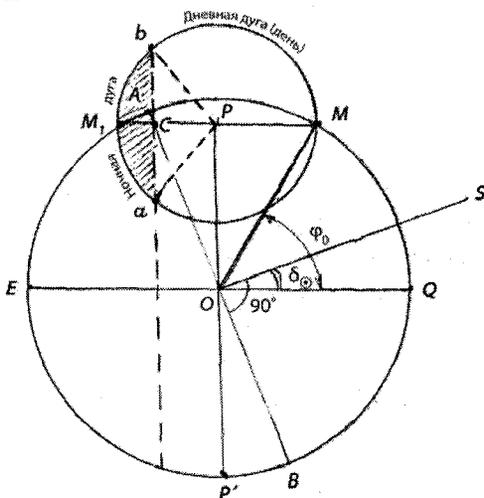


Рис. 32. Графический способ определения продолжительности дня

4. В момент восхода или захода Солнца центр его диска фактически находится ниже истинного горизонта на $51'$, то есть на высоте $h = -51'$. Из астрономического треугольника, построенного

для момента восхода Солнца (рис. 33), сторона ZC_1 определяется как зенитное расстояние Солнца и равна $90^\circ 51'$, так как

$$z = 90^\circ - h = 90^\circ - (-51') = 90^\circ 51'.$$

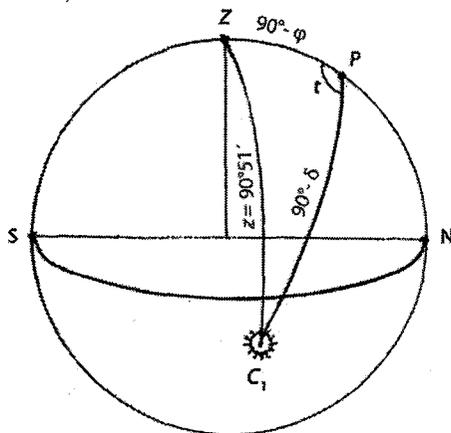


Рис. 33. Астрономический треугольник в момент восхода Солнца

Тогда часовой угол t_\odot Солнца, численно равный истинному солнечному времени захода Солнца, определяется равенством

$$\cos t_\odot = -\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg} \delta_\odot - 0,0148 \operatorname{sec} \varphi \operatorname{sec} \delta_\odot. \quad (4.22)$$

Истинное солнечное время восхода Солнца равно $(24 \text{ ч} - t_\odot)$.

Геоцентрическая высота (рис. 34) центра диска Луны в момент её восхода или захода равна $6,4'$ (в эфемеридах астрономических календарей даются геоцентрические координаты Луны и планет), поскольку учитывает величину параллакса светила. Вычисление времени восхода или захода Луны обычно достаточно производить с точностью не более ± 2 мин и формула для расчета имеет вид:

$$\cos t_\zeta = -\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg} \delta_\zeta. \quad (4.23)$$

Чаще всего время восхода и захода Луны выбирается из специальных таблиц астрономических ежегодников, которые обеспечивают получение результата с точностью $\pm 0,1$ ч, то есть ± 6 мин времени.

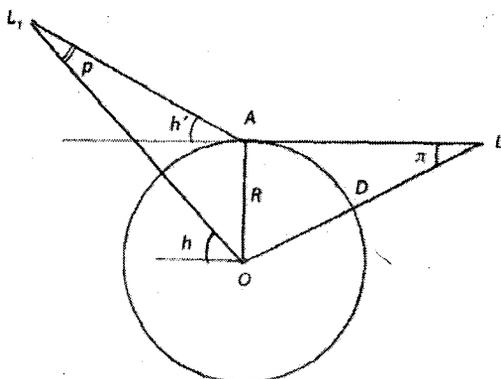


Рис. 34. Параллакс светила

Восход и заход Солнца по местному истинному солнечному времени можно вычислить по соотношениям:

$$\begin{aligned} T_b &= 12 [\text{ч}] - t_{\odot} + \eta, \\ T_z &= 12 [\text{ч}] + t_{\odot} + \eta, \end{aligned} \quad (4.24)$$

где η – уравнение времени, которое определяется так же, как α_{\odot} и δ_{\odot} Солнца, из астрономического ежегодника.

5. Продолжительность сумерек Δt зависит от географической широты φ места и от склонения δ_{\odot} Солнца, то есть от времени года, и вычисляется по формуле:

$$\cos(t + \Delta t) = \frac{\sin h - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta}, \quad (4.25)$$

где высота центра Солнца $h_{\odot} = -6^{\circ}$ для гражданских и $h_{\odot} = -18^{\circ}$ для астрономических сумерек, а часовой угол t_{\odot} восхода или захода Солнца определяется соотношением (4.22).

В астрономических ежегодниках приводятся удобные таблицы для определения начала и конца гражданских и навигационных сумерек.

Если центр диска Солнца в полночь опускается под горизонт меньше, чем на $6^{\circ}51'$, то гражданские сумерки продолжают всю ночь – это так называемые **белые ночи**, наблюдаемые весной и летом в умеренных и северных широтах. Условия непрекращающихся всю ночь сумерек в Северном полушарии:

$$\delta_{\odot} \geq (90^{\circ} - \varphi) - 6^{\circ}51' \text{ (гражданских)}, \quad (4.26)$$

$$\delta_{\odot} \geq (90^{\circ} - \varphi) - 18^{\circ} \text{ (астрономических)}. \quad (4.27)$$

Максимальное склонение Солнца равно $23,5^{\circ}$, поэтому белые ночи возможны уже начиная с широты $59,6^{\circ}$, а сплошные астрономические сумерки – с широты $48,5^{\circ}$.

6. Для различных мест полярного пояса ($66^{\circ}33' < \varphi < 90^{\circ}$) имеют место полярные дни и полярные ночи, продолжительность которых меняется в зависимости от изменения широты места наблюдения. Полярный день, то есть период, в течение которого Солнце не заходит, наступит и закончится при условии:

$$\delta_{\odot} \geq (90^{\circ} - \varphi) \text{ – для северных широт.} \quad (4.28)$$

Если это выражение (4.28) ещё исправить за рефракцию и полудиаметр видимого диска Солнца, то условие наступления и окончания полярного дня для Северного полушария принимает вид:

$$\delta_{\odot} \geq (90^{\circ} - \varphi) - 51'. \quad (4.29)$$

7. Если требуется по экваториальным координатам α и δ светила вычислить его горизонтальные координаты h и A на определенный момент T времени заданного дня года в пункте земной поверхности с географическими координатами φ и λ , то из астрономических календарей (ежегодников) выписывают значения α и δ светила, λ , η и φ пункта и звездное время S_0 в гринвичскую полночь, вычисляют звездное время S в заданный момент T в данном пункте, находят часовой угол t светила и выражают его в угловой мере с той же степенью точности, с которой заданы φ и δ . Однозначно определяющее значение зенитного расстояния z находят по теореме косинусов, то есть $\cos z$. Выбор формулы для вычисления азимута A зависит от значения t : если оно близко к 0° или к 180° , то лучше пользоваться теоремой синусов; если часовой угол t близок к 90° или к 270° , то рекомендуется использовать формулу пяти элементов.

Обратная задача, то есть определение экваториальных координат α и δ светила по его горизонтальным координатам h и A в заданный момент времени T , сводится к вычислению δ и t светила, так как α определяется по t и по звездному времени S . Освобо-

див высоту h светила от влияния рефракции, находят зенитное расстояние z светила, и по формуле косинусов, записанной для $\sin \delta$, определяют склонение светила δ . Часовой угол t при значениях азимута A , близких к 90° или к 270° , вычисляют по формуле пяти элементов, написанной относительно произведения $\cos \delta \cdot \cos t$. Обе формулы просто выводятся из аналогичных формул для определения $\cos z$ и $\sin z \cos A$. При остальных значениях A часовой угол проще вычислять по формуле синусов.

Преобразование экваториальных координат α и δ в эклиптические λ и β осуществляется через астрономический (сферический) треугольник, вершинами которого служат полюс мира P , полюс эклиптики P_3 и само светило M .

Лабораторная работа 5

Лучистая солнечная энергия – основа получения аэрокосмических изображений естественных объектов

Цель работы: изучить информационные ресурсы лучистой энергии Солнца для обеспечения дистанционного зондирования Земли аэрокосмическими методами.

Основным источником энергии, света и тепла, поступающих на Землю извне, является Солнце, дополнительными источниками – Луна и излучение Галактики. Некоторое количество тепла на поверхность и в атмосферу Земли приходит от внутренних ее областей. Однако большинство процессов и явлений, протекающих на земной поверхности, в атмосфере и гидросфере, обязаны своим происхождением непрерывному поступлению солнечной энергии, и их природу трудно понять без знания всех видов излучения Солнца и изменчивости его во времени.

Лучистая энергия Солнца в атмосфере и на земной поверхности

Погода и климатические особенности, имеющие своим источником солнечную энергию, возникают, однако, не непосредственно от Солнца, а через ряд промежуточных процессов и явлений, что делает неявной зависимость их от солнечной деятельности. Только всестороннее изучение природы Солнца и геофизических процессов обеспечивает выявление научно обоснованных связей, которые являются основой для анализа и прогноза погодо- и климатообразующих факторов.

Источник излучения. Главное тело Солнечной системы, ближайшая к Земле звезда, расположенная в общем фокусе всех планетарных орбит, Солнце представляет собой газообразное раскаленное небесное светило шарообразной формы.

В Солнце сосредоточено 99,866 % массы Солнечной системы. Среднее расстояние от Земли до Солнца 149 600 000 км; угловой

диаметр Солнца на этом расстоянии равен 31'59,3". Линейный диаметр Солнца составляет 1 391 715 км (это 109 экваториальных диаметров Земли).

В недрах Солнца, средняя плотность которого 1,41 г/см³ (0,256 средней плотности Земли), давление превышает 10 млрд атмосфер (1 атм \approx 10³ гПа), а температура – 5 млн градусов, возникают термоядерные реакции перехода водорода в гелий, и на разных расстояниях от центра солнечного шара физические свойства вещества (температура, давление, плотность, скорость движения частиц) не одинаковы. Энергия, выделяющаяся при этом, распространяется из недр Солнца через вышележащие слои путем поглощения и переизлучения световых квантов последовательными слоями. В верхнем слое Солнца толщиной около 100 тыс. км перенос энергии осуществляется и путем конвекции, когда горячие массы газа поднимаются вверх, а сравнительно холодные – опускаются вниз. Скорость таких движений составляет 1–2 км/с. Конвективные движения порождают волны сжатия, которые, в свою очередь, генерируют звуковые волны.

Энергия, которая поступает на Землю от Солнца, излучается самыми внешними его слоями – фотосферой, хромосферой и короной, называемыми атмосферой Солнца.

Почти все видимое излучение Солнца исходит из нижней части солнечной атмосферы – фотосферы, толщина которой составляет 100–300 км. Температура фотосферы понижается наружу от 5700 до 4500 К. Здесь происходят регулярные движения вещества вверх и вниз, обусловленные конвекцией и проявляющиеся в возникновении так называемой грануляции (зернистой структуры, пятен, гранул). В атмосфере можно также наблюдать солнечные факелы, флоккулы (лат. *floculi* – клочки), волокна, достигающие длины свыше 1 млн км.

Хромосфера расположена над фотосферой и простирается до 10–15 тыс. км над видимым краем Солнца. Здесь существуют области с различными кинетическими температурами – от 5000 до 1 млн градусов. Причиной столь сильного разогрева слоев солнечной атмосферы является энергия акустических (звуковых) волн, возникающих в фотосфере в результате движения элементов конвекции. Яркость хромосферы в сотни раз меньше яркости фото-

сферы. Неоднородная структура выражена резче, чем грануляция в фотосфере: возникают хромосферные вспышки, протуберанцы (нем. Protuberanzen – вздутие) – гигантские фонтаны и облака раскаленных газов. Наиболее мелкие структурные образования называются спикулами (лат. spiculae – изгиб, извив), имеют продолговатую форму и вытянуты преимущественно в радиальном направлении. Через спикулы происходит обмен веществом с вышележащей короной. Спикулы образуют особую структуру, называемую хромосферной сеткой, порождаемую волновыми движениями в солнечной атмосфере.

Солнечная корона – наиболее разреженная часть атмосферы Солнца, расположена выше хромосферы и простирается на высоту, равную нескольким солнечным радиусам. Кинетическая температура в короне – около 1 млн градусов. Важной особенностью короны является ее лучистая структура, причем лучи достигают десятка и более солнечных радиусов. Внутренняя часть короны также богата структурными особенностями, напоминающими дуги, шлемы, отдельные облака (коронарные конденсации). Излучение короны очень слабое, поляризованное и, по-видимому, является рассеянным светом фотосферы, свободными электронами.

Скорость истечения плазмы вблизи Солнца мала (порядка десятков километров в секунду), но по мере удаления от Солнца она растет, делается сверхзвуковой и вблизи орбиты Земли имеет величины порядка нескольких сотен километров в секунду. В атмосферу Земли из космического пространства вторгается не только волновое, но и корпускулярное (лат. corpusculum – мельчайшая частица) излучение.

Корпускулярные потоки заряженных частиц, непрерывно испускаемые Солнцем и движущиеся во всех направлениях со сверхзвуковыми скоростями, называются солнечным ветром.

Корпускулярное излучение обычно подразделяют на низкоэнергетические частицы солнечных корпускулярных потоков (солнечная плазма, солнечный ветер) с энергией протонов 10^3 – 10^4 эВ, и высокоэнергетичные протоны (космические лучи) с энергией более 10^6 эВ. Первые приходят от Солнца, особенно во время хромосферных вспышек, а вторые (жесткие космические лучи) – главным образом из Галактики.

Потоки плазмы, покидающие солнечную корону, уносят с собой и магнитное поле Солнца, которое «замешано» в них. Поскольку силовые линии регулярной составляющей межпланетного магнитного поля имеют вид спиралей Архимеда, в окрестностях Земли сказываются лишь те силовые линии, которые выходят не из центра солнечного диска, а от его западного края, и потоки высокоэнергетичных протонов и электронов проникают к Земле в основном от вспышек, расположенных в западной части диска Солнца (рис. 35).

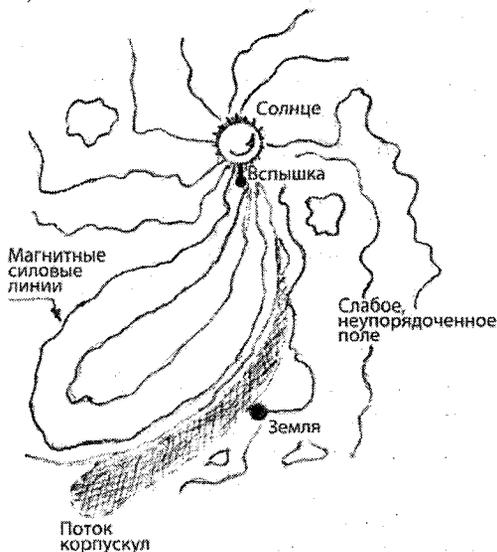


Рис. 35. Межпланетное магнитное поле по данным измерений отечественных и зарубежных космических аппаратов (реконструкция на 12 ноября 1960 г.)

Прямые измерения солнечного ветра и магнитного поля в нем показали, что у магнитного поля – секторная структура: в одних секторах оно направлено от Солнца, в других – к нему. На подобную регулярную картину обычно накладываются различные неоднородности, которые проявляются в основном по мере удаления солнечной плазмы от Солнца как результат развития различных видов плазменной неустойчивости. Здесь сказывается также прохождение ударных волн и набегание более быстрого потока на медленно протекающие потоки.

Характер излучения. Солнечная атмосфера весьма беспокойна. Быстро меняющиеся, активные образования, возникающие временами в солнечной атмосфере, резко отличаются от окружающих невозмущенных областей, свойства и структура которых совсем или почти совсем не меняются со временем.

Совокупность явлений, наблюдающихся в различных областях Солнца (пятна, факелы, волокна, вспышки, протуберанцы, возмущенные места короны и др.) принято называть солнечной активностью.

В фотосфере, хромосфере и короне проявления солнечной активности весьма различны, но все они связаны одной причиной – магнитным полем, всегда присутствующим в активных областях. Совокупность всех проявлений солнечной активности периодически меняется: основные циклы определяются как одиннадцатилетний, двадцатидвухлетний и вековой. Исследования земных проявлений солнечной активности обнаруживают двадцатисемидневный период, возникающий вследствие вращения Солнца вокруг своей оси и движения Земли вокруг Солнца.

В качестве меры солнечной активности чаще всего используют условное число Вольфа, пропорциональное сумме общего числа пятен f и удесятиренного числа их групп g , то есть

$$W = k(f + 10g), \quad (5.1)$$

где W – число Вольфа; k – коэффициент пропорциональности, зависящий от разрешающей способности телескопа. Число Вольфа хорошо коррелирует с той частью излучения Солнца, которая оказывает определенное влияние на земные процессы (например, существенное тепловое воздействие на верхнюю атмосферу, на ее ионизацию, на активизацию фотохимических процессов и образование некоторых химических соединений, которые в нижних слоях атмосферы практически не наблюдаются и пр.). Во время минимума солнечной активности эти числа от дня ко дню меняются от 0 до 11, а во время максимума – от 40 до 190. При совпадении максимумов различных циклов числа Вольфа резко увеличиваются и превышают значение 200.

Существуют и другие критерии оценки солнечной активности.

Солнце непрерывно испускает во все стороны отдельные порции – кванты электромагнитного излучения, каждый из которых несет определенную энергию.

Совокупность всех видов квантов, испускаемых Солнцем, называется спектром электромагнитного излучения, или просто спектром Солнца.

Кванты обладают не только различными значениями энергии, но и разными длинами волн λ электромагнитного излучения, в зависимости от значений которых весь спектр Солнца (рис. 36) принято делить на ряд областей: гамма-лучи ($\lambda < 10^{-5}$ мкм), рентгеновское излучение (10^{-5} мкм $< \lambda < 10^{-2}$ мкм), ультрафиолетовая радиация ($0,01$ мкм $< \lambda < 0,39$ мкм), видимый свет ($0,39$ мкм $< \lambda < 0,76$ мкм), инфракрасная радиация ($0,76$ мкм $< \lambda < 0,3$ см) и радиоволновое излучение ($\lambda > 0,3$ см).

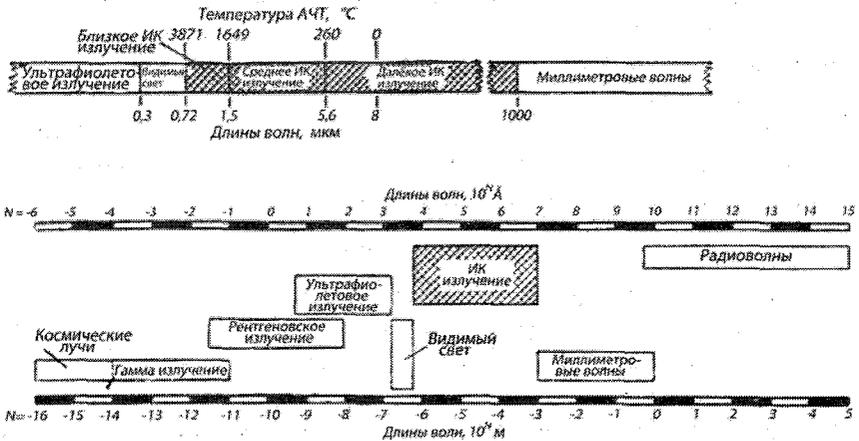


Рис. 36. Спектр Солнца

Свыше 99 % солнечной энергии приходится на участок спектра, заключенный между 0,10 и 4,0 мкм, поэтому солнечную радиацию иногда называют коротковолновой (в отличие от инфракрасного длинноволнового излучения Земли и атмосферы, свыше 99 % которой приходится на интервал длин волн от 3–4 до 80–120 мкм).

Основная часть (более 95 %) излучения Солнца приходится на область так называемого оптического диапазона 0,29–2,4 мкм, включающего видимое излучение спектра или видимый свет

(0,39–0,76 мкм), близкие участки ультрафиолетового (0,29–0,39 мкм) и инфракрасного (0,76–2,4 мкм) излучений.

Видимое излучение Солнца подразделяется на семь цветов:

Цвет	Длина волны, мкм
Фиолетовый	0,390–0,455
Синий	0,455–0,485
Голубой	0,485–0,505
Зеленый	0,505–0,575
Желтый	0,575–0,585
Оранжевый	0,585–0,620
Красный	0,620–0,760

Наибольшей интенсивности непрерывный солнечный спектр достигает в сине-зеленой части, у длин волн $\lambda = 0,43\text{--}0,50$ мкм.

Излучательная способность Солнца близка к излучательной способности абсолютно черного тела с температурой около 6000 К.

Видимое и инфракрасное излучения, приходящие к Земле через атмосферу, характеризуются постоянством во времени и чрезвычайно большой интенсивностью. Так, поток излучения в видимой области составляет 47 %, а в инфракрасной области – 45 % полного потока энергии, поступающего от Солнца. Остальные 8 % приходятся на долю ультрафиолетового излучения, главным образом, близкой его части.

Интенсивность излучения Солнца в области коротких волн (диапазоны ультрафиолетового и рентгеновского излучения) сравнительно мала и подвержена значительным изменениям во времени, но ее влияние на свойства верхней атмосферы Земли (например, на состояние ионосферы, на динамический режим стратосферы и нижней мезосферы, на компоненты зонального ветра, на содержание озона и т. п.) чрезвычайно велика, а проблема изучения связей солнечной активности с процессами и явлениями земной атмосферы (проблема солнечно-земных связей) еще далеко не решена. В частности, остается неясным механизм связи с солнечной активностью погодо- и климатообразующих процессов, наблюдаемых в тропосфере и стратосфере.

В радиодиапазоне ($\lambda = 1\text{--}20$ см) интенсивность солнечного спектра значительно больше, чем должна быть у тела с температурой около 6000 К. Убывание интенсивности радиоспектра Солнца с ростом длины волны в диапазоне метровых волн происходит так-

же, как у абсолютно черного тела, имеющего температуру 1 000 000 К. Другой особенностью солнечного радиоизлучения является его изменчивость, нестабильность, увеличивающаяся с ростом длины волны. Подобным свойством обладает и рентгеновское излучение Солнца.

Между солнечной активностью и радиоизлучением Солнца в сантиметровом и дециметровом диапазонах спектра существует высокая корреляция.

Полная мощность солнечного излучения, называемая светимостью Солнца, равна $3,9 \cdot 10^{23}$ кВт. Солнечное излучение со всеми возможными длинами волн создает энергетическую освещенность, величина которой оценивается в $1,4 \cdot 10^3$ кВт/м².

Энергетической светимостью (или энергетической освещенностью, если энергия поступает от других тел) называется поверхностная плотность лучистого потока, определяемая количеством энергии излучаемой (или получаемой) телом через единичную поверхность в единицу времени во всех направлениях (в пределах полусферы).

Количество лучистой энергии Солнца, приходящей на верхнюю границу атмосферы (при среднем расстоянии Земли от Солнца), принято характеризовать солнечной постоянной. Международная комиссия по радиации рекомендует в качестве стандартного значения солнечной постоянной величину

$$I_0 = 1,37 \text{ кВт/м}^2. \quad (5.2)$$

При любом другом расстоянии поток энергии от Солнца определяется соотношением

$$I^* = \frac{I_0}{\frac{r^2}{r_0^2}}, \quad (5.3)$$

где r и r_0 – соответственно реальное и среднее расстояние между Землей и Солнцем.

В большинстве районов Земли солнечная радиация поступает не перпендикулярно к единичной площадке, а под некоторым углом h_{\odot} , называемым угловой высотой Солнца. Значение h_{\odot} на географической широте φ в момент, когда часовой угол Солнца равен t_{\odot} , определяется соотношением

$$\sin h_{\odot} = \sin \varphi \sin \delta_{\odot} + \cos \varphi \cos \delta_{\odot} \cos t_{\odot}, \quad (5.4)$$

где δ_{\odot} – склонение Солнца в истинный полдень данных суток. Из (5.4) следует, что в истинный полдень, когда $t_{\odot} = 0^{\circ}$,

$$h_{\odot} = 90^{\circ} - \varphi + \delta_{\odot}. \quad (5.5)$$

Поэтому поток солнечной энергии или инсоляции (лат. *insolatio* – освещение) чаще определяется по формуле

$$I = \frac{I_0}{R^2} \sin h_{\odot}, R^2 = \left(\frac{r}{r_0} \right)^2. \quad (5.6)$$

Наряду с понятием солнечной постоянной, включающей энергию всех длин волн (ее называют также астрономической солнечной постоянной), существует понятие метеорологической солнечной постоянной, представляющей собой поток солнечной радиации на верхней границе атмосферы в спектральном интервале 0,346–2,4 мкм (она равна $\sim 1,25$ кВт/м²): из спектра солнечной радиации исключается та часть излучения, которая никогда не достигает тропосферы и не оказывает влияния на ее тепловой режим.

Влияние атмосферы. Солнечная радиация, поступающая на верхнюю границу атмосферы Земли, прежде чем дойти до земной поверхности, частично поглощается в атмосфере, а частично – рассеивается молекулами воздуха и содержащимися в ней твердыми и жидкими примесями.

Атмосфера по своим свойствам весьма неоднородна в пространстве и крайне изменчива во времени. Она постепенно переходит в межпланетную среду, поэтому верхняя граница ее достаточно неопределенна (условно определяется на высоте 3000 км, где плотность атмосферы практически уравнивается с плотностью межпланетной среды: 1 частица на 1 см³). Чаще всего атмосферу представляют как смесь газов, в которой взвешены твердые и жидкие частицы вещества – от тонкого аэрозоля до плотных облаков со всеми возможными промежуточными стадиями. По отношению к потоку солнечной радиации атмосфера фактически всегда представляет собой мутную среду. Это связано не только с содержанием в ней большого количества примесей – взвешенных в воздухе твердых и жидких частиц различных размеров (пыль, дым, аэрозоль, облака и т. п.), но и с наличием молекулярных комплексов

газов, в которых меняются число молекул и расстояния между ними, определяя колебания плотности воздуха.

Поглощение излучения газами квантовая теория объясняет как извлечение отдельных квантов энергии из потока радиации молекулами, составляющими поглощающую среду. Так, например, солнечная радиация, достигающая земной поверхности, резко обрывается на длине волны 0,3 мкм (рис. 37), что объясняется поглощением радиации озоном. Общая масса озона в атмосфере составляет около $3 \cdot 10^{15}$ г, но несмотря на такое ничтожное количество, этот газ играет большую роль в тепловом режиме атмосферы, в создании оптимальных условий для органической жизни на Земле.

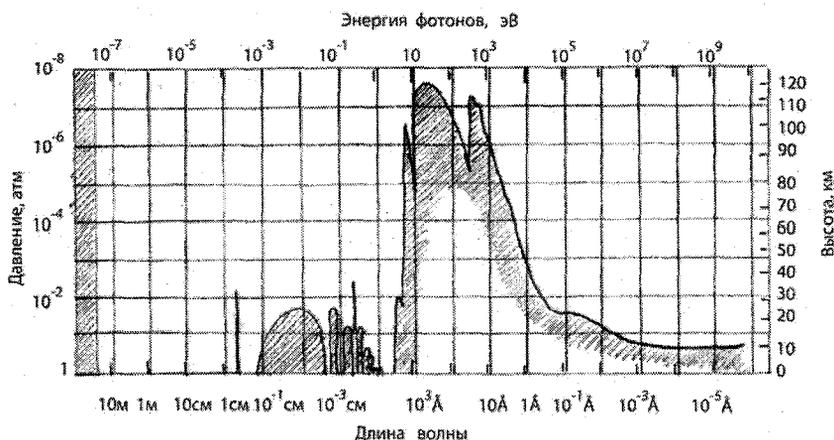


Рис. 37. Проникновение электромагнитного излучения в атмосферу Земли

Масса водяного пара в атмосфере больше, чем других поглощающих газов, поэтому на его долю приходится основная часть поглощенной лучистой энергии Солнца. Во всей атмосфере одновременно содержится около $1,3 \cdot 10^{19}$ г влаги, что эквивалентно слою осажденной воды в 2,5 см. Прозрачность чистого воздуха убывает с увеличением оптической толщины* водяного пара: при реальных значениях содержания (массы) водяного пара в столбе

* Оптическая толщина — величина, обратная оптической массе, ослабляющей поток в e раз. Оптическая масса атмосферы — это соотношение масс наклонного (определяемого расстоянием, проходимым солнечным лучом в земной атмосфере) и вертикального столбов с одним и тем же основанием 1 м^2 .

воздуха, через который проходит солнечное излучение, поток радиации ослабляется за счет поглощения на 5–10 %.

Водяной пар непрерывно поступает в приземный слой атмосферы за счет испарения с поверхности Мирового океана, влажных поверхностей суши, растительного покрова. Благодаря турбулентному перемешиванию, которое происходит в атмосфере, он распределяется над всей земной поверхностью, в отдельных местах атмосферы достигает состояния насыщения, в результате чего переходит в жидкое или твердое состояние, образуются дымки, туманы и облака.

Отсутствие или наличие облачности изменяет количественные характеристики основных эффектов взаимодействия излучения Солнца с атмосферой. Во время конденсации водяного пара выделяется тепло, которое нагревает окружающий воздух и играет немаловажную роль в тепловом режиме атмосферы.

Содержание углекислого газа в воздухе значительно меньше, чем содержание водяного пара и озона: его количество колеблется от 0,02 до 0,04 %. Важную роль в регулировании содержания углекислого газа в атмосфере играет Мировой океан, поглощая его при повышенном содержании в атмосфере и выделяя при пониженном.

Солнечную радиацию поглощают атмосферные примеси (пыль, например). При сильном замутнении атмосферы поглощение солнечной радиации различными примесями может быть значительным.

В результате поглощения электромагнитное излучение преобразуется в другие виды энергии (главным образом, в тепловую, а в верхних слоях атмосферы в процессе ионизации также в электрическую). Процесс поглощения солнечной радиации в атмосфере носит селективный (лат. *selectio* – выбор), избирательный характер.

Принято считать, что поглощение в атмосфере происходит раньше, чем рассеяние, так как рассеиваемая энергия также поглощается.

Сущность рассеяния заключается в особой форме взаимодействия переменного поля падающей электромагнитной волны с частицей среды, благодаря которому эта частица становится источником новых электромагнитных волн – рассеянной радиации. Физи-

ческие свойства среды и рассеивающих частиц обычно характеризуются комплексным показателем преломления:

$$m = n(1 + i\chi), \quad (5.7)$$

где n – абсолютный показатель преломления; χ – характеристика поглощения, связанная с показателем поглощения k соотношением

$$4\pi\chi = k\lambda. \quad (5.8)$$

Другими словами, рассеяние излучения в атмосфере, так же как и его поглощение, зависит от длины волны λ , и происходит вследствие разнонаправленного отражения его частицами воздуха (молекулами газов, центрами концентрации аэрозолей – пыль, твердые частицы дыма, капли воды и т. п.), а также облачностью.

Для облаков, например, угловые характеристики рассеяния и отражения зависят от совокупности оптических (показатели поглощения, рассеяния и индикатриса рассеяния) и геометрических (толщина и количество облаков) параметров. Необходимо отметить, что угловые характеристики отраженного от облаков солнечного излучения мало исследованы. Основные трудности расчета индикатрис рассеяния связаны с ограниченным объемом данных о вертикальных профилях концентрации, микроструктуре и фазовом составе облачных частиц, в особенности для облаков верхнего яруса и вертикального развития, состоящих из кристаллов или смеси капель с кристаллами.

Молекулами газов рассеивается коротковолновая часть солнечного излучения (по закону Релея, поскольку размер рассеивающих частиц значительно меньше длины волны излучения), а аэрозолями рассеивается длинноволновая часть видимого (оптического) излучения (по закону Ми). В общем, атмосферное рассеяние уменьшает прямую солнечную радиацию и повышает рассеянное, диффузное излучение атмосферы, имеющее различные частотные характеристики и даже вызывающее свечение воздуха. Интенсивность рассеяния солнечного излучения, так же как интенсивность его поглощения, возрастает с длиной пути луча в атмосфере.

Основные формы взаимодействия солнечного излучения с атмосферой в различных спектральных интервалах (табл. 5.1) опре-

деляют потоки уходящего солнечного излучения на основе уравнения переноса радиации с учетом многократного рассеяния при заданных оптических характеристиках аэрозоля и облачности. Это часто используют в различных математических моделях при решении определенных тематических задач.

Таблица 5.1

Формы взаимодействия солнечного излучения с атмосферой

Состояние атмосферы	Спектральный интервал, мкм		
	0,25–0,4 (ультрафиолетовое излучение)	0,4–0,75 (видимое излучение)	0,75–4,0 (ближнее инфракрасное излучение)
Отсутствие облачности	Релеевское рассеяние, поглощение озоном	Релеевское и аэрозольное рассеяние, поглощение аэрозодем	Поглощение кислородом, водяным паром, ослабление аэрозодем
Облачность	Релеевское рассеяние, поглощение озоном, рассеяние в облаках	Рассеяние в облаках, поглощение аэрозодем	Рассеяние в облаках, поглощение водяным паром и облачными частицами

Практически решенной считается задача расчета уходящего ультрафиолетового излучения для безоблачной атмосферы. При расчетах излучения, рассеянного и поглощенного атмосферным аэрозодем, используются модели аэрозоля, общим недостатком которых является малая статистическая обеспеченность. Наиболее полно исследованы оптические характеристики слоистообразной облачности нижнего и среднего ярусов, для которой предложена экспериментальная модель «среднего» слоистообразного облака, хотя эта модель далеко не полностью статистически обоснована.

Таким образом, принято считать, что атмосфера прозрачна для лучистой энергии Солнца – видимого света: лишь сравнительно небольшая часть этого излучения поглощается и рассеивается ею. В видимой области излучение Солнца имеет непрерывный спектр, на фоне которого заметно множество (десятки тысяч!) темных (фраунгоферовых) линий поглощения – это следствие ослабления солнечной энергии за счет поглощения атмосферным озоном, водяным паром, углекислым газом, кислородом и другими химическими элементами.

Инфракрасная область солнечного спектра (до $\lambda = 15$ мкм) частично поглощается при прохождении через атмосферу.

По мере увеличения длины волны излучения воздействие атмосферы уменьшается, и она становится практически прозрачной для волн микроволнового диапазона спектра.

В оптическом диапазоне (0,4–5,5 мкм) через атмосферу проходит около 80 % потока солнечной энергии и если поглощение и рассеяние излучения в ней не очень велики, то эта радиация отражается земной поверхностью и может быть зафиксирована сенсорными системами на борту аэрокосмического носителя (аэростата, вертолета, самолета, ракеты, искусственного спутника Земли). При этом важно помнить, что положение Солнца определяет спектр и интенсивность потока солнечной радиации, который затем поглощается и отражается. Процессы же поглощения и рассеяния энергии уменьшают интенсивность солнечного излучения на земной поверхности и даже меняют диапазон этого излучения.

Освещенность облачности и земной поверхности. Солнечная энергия, проникая через атмосферу и достигая земной поверхности, частично отражается, а частично поглощается естественными объектами системы Земля–атмосфера. Другими словами, лучистая энергия Солнца не только освещает Землю, значительная часть ее отражается обратно в мировое пространство. Процесс отражения солнечной радиации от земной поверхности и от поверхности облаков имеет довольно сложную природу: отчасти – это зеркальное отражение (от поверхности воды), отчасти – рассеянное (от шероховатой поверхности почвы), а отчасти – это сложное (диффузное) многократное отражение луча света (в густой траве, от листьев в кронах деревьев, внутри мутной водной среды и т. п.). При отражении света от естественных поверхностей всегда происходит частичное поглощение энергии. Доля солнечной радиации, отраженная той или иной поверхностью, называется альбедо:

$$A = \frac{Q_{\text{отр}}}{Q}, \quad (5.9)$$

где A – альбедо; $Q_{\text{отр}}$ – отраженная солнечная радиация, то есть отразившаяся часть суммарной радиации Q . Часть суммарной ра-

диации $Q_{\text{погл}}$, поглощенная земной поверхностью и облаками, составляет

$$Q_{\text{погл}} = Q(1 - A). \quad (5.10)$$

Эту величину называют остаточной солнечной радиацией или коротковолновым радиационным балансом. Необходимо отметить, что можно говорить о суммарном альбедо по отношению ко всему солнечному спектру, изучать альбедо в отдельных областях спектра излучения или только по отношению к видимому свету. В последнем случае лучистая энергия $d\Phi_{\lambda}^{(R)}$, заключенная в спектральном интервале $(\lambda, \lambda + d\lambda)$, проходит за единицу времени через площадку dS в направлении R , составляющим с нормалью n к этой площадке угол ϑ (рис. 38). Лучистая энергия, характеризующаяся выражением

$$d\Phi_{\lambda}^{(R)} = G_{\lambda} \cos \vartheta dS d\lambda d\omega, \quad (5.11)$$

где $d\omega$ – телесный угол конуса вокруг направления R , определяет величину энергетической яркости G_{λ} , то есть количество лучистой энергии, заключенное в единичном интервале длин волн и единичном телесном угле и проходящее в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную солнечным лучам.

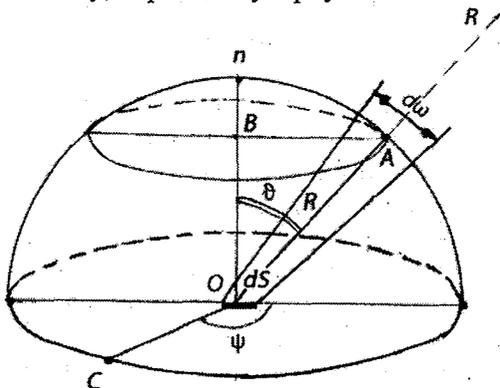


Рис. 38. К определению энергетической яркости

Если за яркость B_0 светящегося элемента в некотором направлении принять силу света I , испускаемую в этом направлении с единицы видимой поверхности:

$$B_0 = \frac{I}{dS \cos \vartheta} = \frac{d\Phi}{dS \cos \vartheta d\omega}, \quad (5.12)$$

а за освещенность E – полный световой поток, падающий на единицу площади dS :

$$E = \frac{d\Phi}{dS}, \quad (5.13)$$

которая изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния r от источника света до поверхности и прямо пропорционально косинусу угла падения лучей (закон Ламберта)

$$E = \frac{\cos \vartheta}{r^2}, \quad (5.14)$$

то, используя соотношения (5.11)–(5.14), можно показать, что яркость B поверхности в целом связана с освещенностью соотношением

$$B = \frac{1}{\pi} \eta E, \quad (5.15)$$

причем η – коэффициент отражения (альбедо), определяемый физическими свойствами отражающей естественной поверхности; E – освещенность, зависящая от угловой высоты Солнца, прозрачности атмосферы, наклона отражающей поверхности и ее шероховатости.

Яркость (оптическая плотность) аэрокосмических изображений интерпретирует тоновые соотношения, отображающие энергетическую сущность, физические параметры естественных излучающих или отражающих объектов.

Практический интерес представляют данные об альбедо облаков – индикатора погодообразующих процессов на космических изображениях. Оно существенно зависит от совокупности оптических (показатели поглощения, рассеяния и индикатриса рассеяния) и геометрических (количество, форма, вертикальная протяженность облаков) параметров. Наибольшими значениями альбедо характеризуются слоистообразные и кучево-дождевые облака (табл. 5.2). Альбедо увеличивается, а функция пропускания (безразмерное отношение потока радиации, вышедшего из слоя облаков, к вошедшему в этот слой потоку излучения) уменьшается

с ростом так называемого водозапаса (массы капель воды в вертикальном столбе единичного сечения) облака.

Таблица 5.2

Среднее значение альbedo облаков различных форм

Форма облаков	Альbedo, %
Кучево-дождевые	86
Кучевые облака хорошей погоды над сушей, более 8 баллов	29
Слоисто-кучевые облака над сушей, более 8 баллов	68
Слоисто-кучевые облака над океаном, сплошной массив	60
Слоистые облака, просвечивающие, над океаном	42
Перисто-слоистые облака, плотные	74
Перистые облака над сушей	36
Перисто-слоистые облака над сушей	32

Альbedo, функции пропускания и поглощения зависят от высоты Солнца, но это влияние заметно при угловых высотах меньше 30° .

Связь между альbedo верхней границы облаков $A_{\text{вр}}(N)$, альbedo собственно самих облаков $A_{\text{обл}}$ и количеством N облаков (в долях единицы) характеризуют соотношением

$$A_{\text{вр}}(N) = A_{\text{вр}}(0)(1 - N) + A_{\text{обл}}N, \quad (5.16)$$

где $A_{\text{вр}}(0)$ – альbedo безоблачной атмосферы на уровне верхней границы облаков. Альbedo собственно облаков $A_{\text{обл}}$ при увеличении количества облачности до 6–7 баллов практически остается постоянным (31–34 %), а потом быстро возрастает и при сплошной облачности приближается к величине $A_{\text{вр}}(N)$. Поэтому расчеты радиационных потоков, отраженных от сплошной облачности, проводятся, чаще всего, для различных зенитных углов Солнца в предположении, что угловое распределение рассеянного от облачности излучения подчиняется закону Ламберта, а рассеянием в надоблачном слое атмосферы можно пренебречь. Такое допущение считается особенно справедливым для облаков, верхняя граница которых располагается на высоте не менее 3 км. Учет количества облачности осуществляется с помощью коэффициентов

$$n = \frac{A(N)}{A(N=10)}, \quad (5.17)$$

определяющих изменение общего потока отраженной радиации при изменении облачности от 10 до 0 баллов. Альbedo облака зависит также и от альbedo земной поверхности (фона), над которой оно располагается.

Отражение земной поверхностью. Альbedo земных поверхностей различного вида изменяется в сравнительно узких пределах (табл. 5.3). Исключением являются снег и вода. Среднее альbedo снега 60 %, но при свежеснежавшем снеге величина альbedo может возрастать до 90 %. Альbedo водной поверхности в значительной степени зависит от угла падения солнечных лучей и мутности водной среды.

Таблица 5.3

Альbedo естественных поверхностей

Поверхность	Альbedo	Поверхность	Альbedo
Свежий, сухой снег	0,80–0,90	Поля ржи и пшеницы	0,10–0,25
Чистый, влажный снег	0,60–0,70	Картофельные поля	0,15–0,25
Загрязненный снег	0,40–0,50	Хлопковые поля	0,20–0,25
Морской лед	0,30–0,40	Луга	0,15–0,25
		Сухая степь	0,20–0,30
Темные почвы	0,05–0,15	Тундра	0,15–0,20
Влажные серые почвы	0,10–0,20		
Сухие глинистые или серые почвы	0,20–0,45	Хвойные леса	0,10–0,15
Сухие светлые песчаные почвы	0,25–0,45	Лиственные леса	0,15–0,20

Альbedo существенно зависит от влажности почвы, с увеличением которой оно уменьшается, поскольку происходит увеличение поглощаемой радиации. Альbedo различных поверхностей имеет хорошо выраженный дневной и годовой ход (зависимость от угловой высоты Солнца).

По характеру спектральной зависимости виды земной поверхности принято подразделять на три класса:

– первый класс объединяет различные типы почв, поля с редкой растительностью, пашни и пустыни, альbedo которых монотонно возрастает с увеличением длины волны в интервале от 0,4 до 1,0 мкм. Для них практически отсутствует временная изменчивость альbedo;

– ко второму классу относят поверхности, покрытые сплошной растительностью, для которых характерны слабый минимум

альbedo в области длин волн 0,65–0,68 мкм (обусловленный полосой поглощения хлорофилла) и значительное увеличение (в 2–3 раза) альbedo на участке длин волн 0,70–1,00 мкм. Характерной особенностью является дневной ход альbedo с минимумом в полуденное время, а также сезонные изменения, связанные с высыханием растений;

– третий класс объединяет водные и заснеженные поверхности, альbedo которых почти постоянно в диапазоне длин волн 0,50–0,80 мкм и незначительно (примерно на 0,1) убывает вне этого диапазона. Эти поверхности характеризуются широким интервалом колебаний альbedo, связанного с изменением структуры отражающей поверхности вследствие ее замерзания или таяния. Свежевыпавший сухой снег обладает абсолютным максимумом альbedo, равным 0,9 в диапазоне длин волн 0,5–0,7 мкм.

В пределах каждого указанного класса существует более детальное подразделение поверхностей на подклассы.

По спутниковым данным об альbedo подстилающая поверхность Земли подразделяется на четыре класса: поверхности, покрытые растительностью, пустыни, водные поверхности и поверхности, покрытые снегом или льдом.

Необходимо заметить, что при измерениях характеристик отражения используются спектральные приборы, размещенные на земной поверхности, самолетах и искусственных спутниках Земли. В зависимости от угла поля зрения используемой аппаратуры, высоты, на которой она расположена, и углов визирования размеры исследуемого участка поверхности, находящегося в поле зрения, могут изменяться в широких пределах. Эти размеры определяют минимальный пространственный масштаб усреднения характеристик отражения солнечной радиации.

С использованием наземных приборов масштаб усреднения не превышает нескольких десятков метров, определяются локальные характеристики отражения однородных участков земной поверхности и собираются наиболее полные сведения об альbedo и угловых зависимостях отражения.

При измерениях с самолета минимальный масштаб усреднения лежит в пределах от нескольких сотен метров до десятков километров.

Минимальный пространственный масштаб усреднения при измерениях со спутников в зависимости от высоты их полета составляет 50–110 км для аппаратуры с малым углом зрения и 1260–2130 км для аппаратуры с углом зрения, приближающимся к 180°.

Разные масштабы усреднения могут приводить к значениям альbedo, разность между которыми в некоторых случаях превосходит 0,5. Величина альbedo зависит также от диапазона спектра, в котором производятся измерения, сезона года, а иногда и от времени суток. Чистая атмосфера Земли отражает около 0,10 части солнечной радиации.

Учитывая величины альbedo земной поверхности, атмосферы и облаков, можно вычислить альbedo Земли как планеты. Результаты вычислений определяют широкий диапазон значений: от 0,34 до 0,45. Измерить альbedo Земли как планеты очень сложно, так как оно зависит от трудно поддающихся учету различных факторов.

Контрольные вопросы

1. Каковы масса и размеры Солнца в сравнении с Землей?
2. Откуда возникает энергия Солнца?
3. Опишите строение солнечной атмосферы.
4. При каких условиях можно видеть хромосферу, корону и протуберанцы?
5. Что такое солнечные пятна, как меняется их число?
6. Что называют солнечным ветром?
7. Что называют спектром Солнца?
8. Дайте общую характеристику спектру Солнца.
9. Почему в солнечном спектре присутствуют темные линии, с чем эти линии связаны?
10. Приведите примеры связи между солнечными и земными явлениями.
11. В чем состоит практическое значение изучения солнечно-земных связей в погодо- и климатообразующих процессах?
12. Какие участки спектра излучения включают в состав так называемого оптического диапазона для исследования системы Земля–атмосфера?
13. Что такое солнечная постоянная, чему она равна?
14. Охарактеризуйте понятие метеорологической солнечной постоянной.
15. Почему по отношению к потоку солнечной радиации атмосфера представляет собой мутную среду?
16. Охарактеризуйте поглощение солнечного излучения основными газовыми компонентами атмосферы.
17. Что такое молекулярное рассеяние атмосферы?
18. Поясните аэрозольное ослабление лучистой энергии в атмосфере.
19. Что такое альbedo и как оно характеризует различие между естественными объектами системы Земля–атмосфера?

20. Почему на космических снимках, получаемых в видимом диапазоне спектра излучения, возможно распознавание облачности и земной поверхности?

Задачи

5.1. Экстраполяцией наземных, ракетных и спутниковых измерений на верхнюю границу атмосферы получено следующее распределение спектральной плотности энергетической освещенности солнечной радиацией, перпендикулярной к лучам поверхности [I_{0_2} , кВт/(м² · мкм)] по длинам волн (λ мкм):

λ	I_{0_2}	λ	I_{0_2}	λ	I_{0_2}	λ	I_{0_2}
0,16	0,000	0,38	1,120	0,60	1,666	1,40	0,336
0,18	0,001	0,40	1,429	0,62	1,602	1,60	0,244
0,20	0,011	0,42	1,727	0,64	1,544	1,80	0,159
0,22	0,057	0,44	1,810	0,66	1,486	2,00	0,103
0,24	0,063	0,46	2,066	0,68	1,427	3,00	0,031
0,26	0,130	0,48	2,074	0,70	1,369	4,00	0,009
0,28	0,222	0,50	1,942	0,72	1,314	5,00	0,004
0,30	0,514	0,52	1,833	0,75	1,235	6,00	0,002
0,32	0,830	0,54	1,783	0,80	1,107	7,00	0,001
0,34	1,076	0,56	1,695	1,00	0,746	8,00	0,001
0,36	1,068	0,58	1,715	1,20	0,484	10,00	0,000

Предлагается представить графически и проанализировать спектр солнечного излучения, приходящего к Земле. Определить по графику длину волны, на которую приходится наибольшая энергия. В какой области спектра лежит эта волна? Проинтегрировать функцию $I_{0_2}(\lambda)$ в пределах длин волн от 0,16 до 10,00 мкм и найти солнечную постоянную. Указать причины отличия полученного результата от стандартного значения, рекомендованного Международной комиссией по радиации. Вычислить доли ультрафиолетовой ($\lambda < 0,40$ мкм), видимой ($\lambda = 0,40-0,76$ мкм) и инфракрасной ($\lambda > 0,76$ мкм) радиации в общем притоке солнечного излучения к Земле.

Примечание. При вычислении определенного интеграла функции $I_{0_2}(\lambda)$ в указанных пределах использовать общую формулу трапеций.

5.2. Вычислить энергетическую освещенность солнечной радиацией, перпендикулярной к лучам поверхности на верхней границе атмосферы 2 января (Земля в перигелии) и 3 июля (Земля в афелии). Определить относительные отклонения найденных значений от солнечной постоянной.

5.3. Вычислить энергетическую освещенность солнечной радиацией горизонтальной поверхности на верхней границе атмосферы при высотах Солнца 0, 15, 30, 45, 60, 75 и 90°. Построить и проанализировать график функции $I_0^*(h)$.

5.4. Определить энергию солнечного излучения, приходящего к верхней границе всей атмосферы за час, сутки и год. Найти средние по всей поверхности ат-

мосферы значения энергетической экспозиции за те же интервалы времени. Высотой атмосферы по сравнению с радиусом Солнца пренебречь.

- 5.5. Подсчитать теоретические суточные суммы солнечной энергии на экваторе и на широтах 30, 60, 90° с. ш. в дни весеннего равноденствия и осеннего равноденствия, полагая, что в эти дни склонение Солнца $\delta_{\odot} = 0$. Результаты расчета представить графически и проанализировать.
- 5.6. Найти оптические массы атмосферы, проходимые солнечными лучами при всех высотах Солнца, кратных 10°. Построить график функции $m(h_{\odot})$. Проанализировать причины характера полученной зависимости. Использовать табл. 5.4.
- 5.7. Найти оптические массы атмосферы, проходимые солнечными лучами в полдень 21 июня и 22 декабря на широтах 68, 56 и 41° с. ш. Какое значение имеет изменение m с широтой и в течение года для прихода солнечной радиации к земной поверхности?
- 5.8. При высоте Солнца 30° прямая радиация на перпендикулярную лучам поверхность составила 0,72 кВт/м², а при высоте Солнца 55° – 0,82 кВт/м². Вычислить коэффициент прозрачности для обоих случаев. Допустив, что исходные данные получены в один и тот же день в одном и том же пункте, можно ли утверждать, что за время, прошедшее между измерениями, изменилось оптическое состояние атмосферы? Какая другая причина могла вызвать изменение коэффициента p ?
- 5.9. В некотором пункте в один и тот же день дважды измерена прямая радиация на перпендикулярную лучам поверхность: при высоте Солнца 90° она составила 0,98 кВт/м², а при высоте Солнца 30° – 0,70 кВт/м². Допуская, что в период между измерениями оптическое состояние атмосферы не изменялось, вычислить коэффициент прозрачности и солнечную постоянную. Почему полученное значение I_0 отличается от значения, принятого в настоящее время (1,37 кВт/м²)?
- 5.10. При высоте Солнца 42° прямая радиация на перпендикулярную лучам поверхность равна 0,63 кВт/м². Определить фактор мутности и пояснить смысл полученного результата.
- 5.11. На Европейской территории России воздушные массы в среднем характеризуются следующими факторами мутности: континентальный арктический воздух – 2,45; морской воздух умеренных широт – 2,66; континентальный воздух умеренных широт – 3,09; континентальный тропический воздух – 3,49. Средний коэффициент прозрачности идеальной атмосферы 0,92. Рассчитать средний коэффициент прозрачности для каждой из указанных воздушных масс. Как изменяются фактор мутности и коэффициент прозрачности при изменении запыленности воздуха?
- 5.12. Вычислить прямую радиацию на перпендикулярную лучам поверхность при высоте Солнца 53° и коэффициенте прозрачности 0,751. Определить долю вычисленной величины от солнечной радиации, приходящей к такой же поверхности на верхней границе атмосферы. Как изменится результат, если при том же оптическом состоянии атмосферы увеличится (уменьшится) высота Солнца или при постоянной высоте Солнца изменится состояние атмосферы?

- 5.13. Вычислить прямую радиацию на перпендикулярную солнечным лучам поверхность на 55° с. ш. 15 июля при высотах Солнца $10, 20, 30^\circ$ и т. д. до максимальной высоты, возможной в данный день, если неприведенный коэффициент прозрачности равен $0,710$. Построить* и проанализировать график дневного изменения прямой солнечной радиации. Пояснить, почему прямая радиация изменяется с изменением высоты Солнца при неизменной прозрачности атмосферы? Какие периодические изменения в связи с этим испытывает прямая солнечная радиация? Какова ее широтная изменчивость, связанная с зависимостью от высоты Солнца?

Примечание. На графике каждую высоту Солнца отложить дважды: до и после полудня.

- 5.14. Вычислить прямую радиацию на перпендикулярную лучам поверхность при высотах Солнца 30 и 60° , если коэффициент составляет $0,500; 0,600; 0,700; 0,800$. Построить и проанализировать график зависимости $I(p)$ при заданных высотах Солнца.
- 5.15. Прямая радиация на перпендикулярную лучам поверхность при высоте Солнца 34° составила $0,78$ кВт/м². Определить прямую радиацию на горизонтальную поверхность. Всегда ли между этими величинами сохраняется такое соотношение?
- 5.16. Средняя за месяц рассеянная радиация в одном из пунктов на 42° с. ш. в июне составляет:

Срок, ч	5	7	9	11	13	15	17	19
Рассеянная радиация D , кВт/м ²	0,02	0,11	0,20	0,21	0,21	0,18	0,11	0,02

Условно принимая, что эти данные относятся к 15 июня и что поступление рассеянной радиации на земную поверхность начинается за 1 ч до восхода Солнца и прекращается через 1 ч после его захода, построить и проанализировать график суточного хода рассеянной радиации. Вычислить среднюю для данного месяца суточную сумму. Какие факторы и как влияют на суточный ход рассеянной радиации? Как изменится суточная сумма при рассмотрении зимнего месяца или более северного (южного) района? При анализе графика отметить: было ли изменение рассеянной радиации беспорядочным или упорядоченным, какой вид оно имело (монотонный рост, простая волна, двойная волна и т. п.); в какое время суток рассеянная радиация была минимальной; в какое время суток и на протяжении какого периода она была максимальной; время наступления максимума и его значение; типичен ли такой ход для ясного дня или дня с переменной облачностью?

- 5.17. Определить суммарную радиацию, если при высоте Солнца 30° прямая радиация на перпендикулярную лучам поверхность составляет $0,42$ кВт/м², а рассеянная радиация – $0,14$ кВт/м². Может ли рассеянная радиация быть больше прямой радиации на горизонтальную поверхность? Может ли суммарная радиация состоять только из прямой или только из рассеянной радиации? От каких факторов зависит соотношение между прямой и рассеянной радиацией, поступающей к земной поверхности?

- 5.18. Альbedo свежеспаханного влажного чернозема около 10 %, а чистого сухого снега около 90 %. Если суммарная радиация на этих участках одинакова, то какой участок больше поглощает и во сколько раз? Как влияет различие в альbedo на количество поглощенной радиации? Как это сказывается на тепловом режиме разных участков земной поверхности и прилегающих к ней слоев атмосферы при одинаковом поступлении солнечной радиации?
- 5.19. Среднее значение альbedo поверхности Черного моря летом:

Высота Солнца, град	20	30	40	50	60
Альbedo, %	10	7	6	6	5

Построить график функции $A(h_{\odot})$ и указать причину уменьшения альbedo моря при увеличении высоты h_{\odot} Солнца (волнением моря пренебречь).

- 5.20. Определить количество солнечной радиации, поглощаемой поверхностью снега, альbedo которого составляет 80 %, в истинный полдень 20 февраля на 60° с. ш., если коэффициент ослабления C [см. формулу (5.20)] равен 0,25, а рассеянная радиация составляет $0,07 \text{ кВт/м}^2$.
- 5.21. Вычислить освещенность горизонтальной поверхности Земли и коэффициент пропускания атмосферы при высоте Солнца $19,3^{\circ}$, если коэффициент прозрачности атмосферы равен 0,71. Использовать табл. 5.4.
- 5.22. В безоблачный день прямая солнечная радиация, измеренная при массах атмосферы 2, 3, 4 и 5, равнялась соответственно 0,82; 0,68; 0,59 и $0,54 \text{ кВт/м}^2$. Вычислить при заданных массах атмосферы: а) освещенность земного участка, перпендикулярного солнечным лучам, используя световой эквивалент солнечной радиации k (см. табл. 5.5); б) освещенность горизонтальной земной поверхности; в) коэффициенты прозрачности для светового потока; г) коэффициенты пропускания: какую часть (в %) светового солнечного потока задерживают в отдельности только первая, только вторая, только третья, только четвертая и только пятая масса атмосферы? Использовать табл. 5.4. Ответить на вопросы: а) почему каждая последующая масса атмосферы ослабляет (задерживает) меньшую долю светового потока по сравнению с предыдущей и коэффициент прозрачности увеличивается с увеличением числа пройденных масс? б) соответствуют ли эти изменения коэффициента прозрачности фактическим изменениям мутности атмосферы?; в) наблюдалось бы это явление, если бы измерения были выполнены монохроматическими потоками солнечной радиации?
- 5.23. Отношение длин волн красного ($0,76 \text{ мкм}$) и фиолетового ($0,38 \text{ мкм}$) лучей равно 2. Во сколько раз (приблизительно) различаются: поперечные сечения молекулярного рассеяния; объемные коэффициенты молекулярного рассеяния; плотности потоков света, рассеянного единицами объема вперед и назад? Для каких лучей они больше?
- 5.24. Вычислить коэффициенты пропускания для слоя облаков толщиной 100 м и потери энергии при прохождении этого слоя волнами видимой части спектра электромагнитного излучения – от $0,38$ до $0,78 \text{ мкм}$. Значительно ли изменяются коэффициенты аэрозольного ослабления и пропускания, а также потери энергии излучения для всех длин волн видимой части спектра? Как называ-

- ется такое ослабление? Почему некоторые облака и многие туманы имеют белый цвет? Использовать табл. 5.6.
- 5.25. Определить освещенность Солнцем горизонтальной поверхности на острове Диксон в день летнего солнцестояния (в истинный полдень $\delta_{\odot} = 23,26^{\circ}$) в полдень и в полночь, если широта острова $73,5^{\circ}$, а среднее месячное значение коэффициента прозрачности атмосферы 0,79. Использовать табл. 5.4.
- 5.26. Какая поверхность – горизонтальная или вертикальная – в полдень в день осеннего равноденствия будет больше освещена прямыми солнечными лучами (в истинный полдень $\delta_{\odot} = -0,03^{\circ}$) на острове Хейса (широта $80,5^{\circ}$) и во сколько раз? Использовать табл. 5.4.
- 5.27. Какова максимальная возможная освещенность горизонтальной поверхности в полдень в день весеннего равноденствия (в истинный полдень $\delta_{\odot} = 0,13^{\circ}$) на экваторе, в Санкт-Петербурге (60° с.ш.); на ст. Восток в Антарктиде ($78,5^{\circ}$ ю.ш.). Во сколько раз освещенность на экваторе больше, чем в Санкт-Петербурге и на ст. Восток? Ослабление света в атмосфере не учитывать.
- 5.28. Вычислить освещенность горизонтальных площадок в пунктах, перечисленных в предыдущей задаче, с учетом ослабления света в атмосфере, если средние месячные коэффициенты прозрачности соответственно равны 0,70; 0,79; 0,80; 0,84. Во сколько раз освещенность на экваторе больше, чем в Санкт-Петербурге и на ст. Восток? Почему изменились соотношения освещенностей по сравнению с ответами к предыдущей задаче, хотя в Антарктиде и Санкт-Петербурге прозрачность воздуха больше, чем на экваторе? Использовать табл. 5.4.
- 5.29. Какую освещенность создает прямой солнечный свет на поле, покрытом травой, если яркость поля равна $3,5 \cdot 10^3$ кд/м², а альbedo 0,22? Считать, что трава отражает по закону Ламберта.
- 5.30. Освещенность снежных и фирновых полей на склонах гор Кавказа в летний полдень может достигать 120 000 лк. Определить яркость и светимость снежных полей, если коэффициент отражения снега равен 0,85.

Материалы для работы

1. Астрономический календарь (постоянная часть и ежегодник).
2. Лист миллиметровой бумаги для построения графиков.
3. Калькулятор (или компьютер) для вычислений.

Рекомендуемая литература

1. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. – М.: Наука, 1977; гл. IX.
2. Говердовский В.Ф. Космическая метеорология. Ч. I. Спутниковая метеорология. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009.
3. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. – М.: Мир, 1988.
4. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. – СПб.: Гидрометеоздат, 2000.
5. Пятизначные таблицы логарифмов чисел и тригонометрических функций. – М.: Геодезиздат, 1957.

Порядок выполнения работы

1. Прежде чем приступить к решению задач, внимательно ознакомьтесь с преамбулой (фр. *preambule* – предисловие; лат. *praeeambulus* – предшествующий, идущий впереди) лабораторной работы.

2. Обратите внимание на то обстоятельство, что для решения предлагаемых задач необходимы определенные знания из астрономии, физики атмосферы и общей метеорологии, поскольку итогом выполнения лабораторной работы является не только численный ответ на задачу, но и разносторонний анализ его физического смысла: для этого во многих задачах помимо исходных данных сформулирован ряд вопросов в порядке обсуждения полученных результатов.

3. К обязательному решению рекомендуется задача 5.1. По результатам решения некоторых других задач также предусматривается построение различных графиков, характеризующих пространственное или временное распределение метеорологических величин и их анализ.

4. Отчет по решению той или иной задачи составляется в произвольной форме, но с обязательным освещением всех поставленных вопросов.

Методические указания

1. Ослабление солнечной радиации в атмосфере

а) Прямая солнечная радиация при ее прохождении от верхней границы атмосферы до земной поверхности ослабевает в соответствии с законом Буге для полной радиации (неразложенной по спектру):

$$J = J_0 p^m, \quad (5.18)$$

где J – энергетическая освещенность прямой солнечной радиацией площадки на земной поверхности, перпендикулярной лучам Солнца; J_0 – солнечная постоянная; p – интегральный коэффициент прозрачности атмосферы; m – оптическая масса атмосферы, пройденная солнечными лучами (табл. 5.4).

Значения m при разных угловых высотах h° Солнца

h_{\odot}°	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	39,6	27,0	19,8	15,4	12,4	10,4	8,9	7,8	6,9	6,18
10	5,60	5,12	4,72	4,37	4,08	3,82	3,59	3,39	3,21	3,05
20	2,90	2,77	2,65	2,55	2,45	2,36	2,27	2,20	2,12	2,06
30	2,00	1,94	1,88	1,83	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,59
40	1,55	1,52	1,49	1,46	1,44	1,41	1,39	1,37	1,34	1,32
50	1,30	1,28	1,27	1,25	1,24	1,22	1,20	1,19	1,18	1,17
60	1,15	1,14	1,13	1,12	1,11	1,10	1,09	1,09	1,08	1,07
70	1,06	1,06	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03	1,02	1,02
80	1,015	1,012	1,010	1,007	1,005	1,004	1,002	1,002	1,001	1,00
90	1,00									

При $h_{\odot}^{\circ} > 30^{\circ}$ значения m могут быть найдены также по формуле

$$m = 1/\sin h_{\odot}. \quad (5.19)$$

Другими характеристиками ослабления солнечной радиации при ее прохождении через атмосферу могут служить коэффициент ослабления C :

$$C = \frac{J_0 - J}{J \cdot m}, \quad (5.20)$$

и фактор мутности T :

$$T = \lg p / \lg p_i, \quad (5.21)$$

где p_i – коэффициент прозрачности идеальной атмосферы, значение которого изменяется в зависимости от величины m :

m	1	2	3	4	5	8	10
p_i	0,906	0,916	0,922	0,927	0,935	0,941	0,946

Значения T определяются с точностью до сотых.

Результаты отдельных экспериментальных расчетов становятся соизмеримыми, когда значения коэффициентов прозрачности p , найденные при разных (фактических) параметрах m , приводят к величине $m = 2$ (см. Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971).

б) Энергетическая освещенность прямой солнечной радиацией горизонтальной поверхности (J^*) измеряется непосредственно или вычисляется по формуле

$$J^* = J \sin h_{\odot}. \quad (5.22)$$

Энергетическая освещенность прямой солнечной радиацией поверхности, наклоненной к горизонту под углом α и ориентированной в любую сторону (J_n), определяется соотношением

$$J_n = J [\sin h_{\odot} \cos \alpha + \cos h_{\odot} \sin \alpha \cos(A_{\odot} - A_n)], \quad (5.23)$$

где A_{\odot} – азимут Солнца; A_n – азимут поверхности, то есть угол между направлением на юг и горизонтальной проекцией нормали к поверхности (значения азимутов отсчитываются от юга к северу через запад, от 0 до 180° , или через восток, от 0 до -180°); h_{\odot} – высота Солнца, определяемая соотношениями (5.4) или (5.5).

Энергетическая освещенность рассеянной солнечной радиацией (D) измеряется непосредственно, а суммарной солнечной радиацией (Q) либо измеряется непосредственно, либо вычисляется по сумме

$$Q = J^* + D. \quad (5.24)$$

в) Коэффициент отражения A (альbedo) солнечной радиации земной поверхностью определяется как соотношение

$$A = Q_{\text{отр}} / Q, \quad (5.25)$$

где $Q_{\text{отр}}$ – отраженная солнечная радиация. Часть суммарной радиации (Q_n), поглощенная земной поверхностью, составляет

$$Q_n = Q(1 - A). \quad (5.26)$$

Эту величину часто называют остаточной солнечной радиацией или коротковолновым радиационным балансом, обозначая через B_k .

г) Освещенность земной поверхности, создаваемую прямым солнечным светом, ослабленным в атмосфере, можно вычислить по формулам:

$$E_{\text{норм}} = E_0 p^m = E_0 p_i^{Tm} \quad (5.27)$$

и
$$E_{\text{зоп}} = E_0 p^m \sinh = E_0 p_i^{Tm} \sinh, \quad (5.28)$$

где $E_{\text{норм}}$ и $E_{\text{гор}}$ – освещенности, создаваемые прямой солнечной радиацией у земной поверхности на площадке, перпендикулярной солнечным лучам, и на горизонтальной площадке, соответственно; E_0 – световая солнечная постоянная (135 000 лк); p – интегральный световой коэффициент прозрачности идеальной атмосферы; m – оптическая масса атмосферы (см. табл. 5.4).

Освещенность горизонтальной поверхности Земли, создаваемая рассеянным светом от всего небосвода ($E_{\text{гор}}^D$), яркость которого везде одинакова и равна $B_{\text{н}}$, описывается формулой

$$E_{\text{гор}}^D = \pi B_{\text{н}}. \quad (5.29)$$

Это равенство хорошо выполняется при слоистообразных облаках, закрывающих небо полностью, и при наличии снежного покрова. При рассеянном освещении, если отражение света происходит по закону Ламберта (5.14), яркость естественных ландшафтов $B_{\text{л}}$ связана с освещенностью $E_{\text{гор}}^D$ соотношением

$$\pi B_{\text{л}} = A E_{\text{гор}}^D, \quad (5.30)$$

где A – альbedo данного ландшафта.

Данные об освещенности получают путем пересчета энергетической освещенности прямой, рассеянной или суммарной радиацией на соответствующие величины освещенности с помощью светового эквивалента радиации (табл. 5.5).

Таблица 5.5

Световой эквивалент солнечной радиации K (10^3 лк / кВт·м⁻²)
в зависимости от высоты Солнца h_{\odot} и облачности

Солнечная радиация	Облачность, баллы	h_{\odot}°			
		30	40	50	60
Прямая	0–3 (☉ ²)	89±4	94±4	98±4	100±4
Суммарная	0–6(☉ ²), 1–10 (☉)	97±6	100±4	101±4	102±4
Рассеянная	0–6(☉ ²)		117±17		
Рассеянная (суммарная)	3–10(☉ ⁰); 7–10 (II)		103±10		

Освещенность горизонтальной поверхности прямым и рассеянным солнечным светом вычисляется каждая в отдельности только в том случае, если облачность не превышает 3 баллов. Если ко-

личество облаков более 3 баллов, то вычисляется суммарная радиация и по ней суммарная освещенность. Суммы освещенности прямым и рассеянным солнечным светом, а также суммарная освещенность, составленная за час, день, месяц, сезон, вегетационный период, год, называются количеством освещения. Они характеризуют световой климат (режим) каждого района.

2. Трансформация оптического излучения в атмосфере

В оптический диапазон электромагнитных волн обычно включают ультрафиолетовое излучение (от 0,01 до 0,38–0,40 мкм), видимое излучение (от 0,38–0,40 мкм до 0,76–0,78 мкм) и инфракрасное излучение (от 0,76–0,78 мкм до 1 мм).

а) Уменьшение интенсивности потока монохроматического излучения J_λ , прошедшего сквозь мутную атмосферу вследствие поглощения и рассеяния его составными частицами воздуха и аэрозолями, характеризуется законом Ламберта:

$$J_\lambda = J_{0\lambda} e^{-\tau_\lambda m}, \quad (5.31)$$

где $J_{0\lambda}$ – поток монохроматического излучения на верхней границе атмосферы; m – оптическая масса атмосферы; τ_λ – безразмерная величина оптической толщины (или оптической плотности) атмосферы;

$$\tau_\lambda = \int_0^\infty \alpha_\lambda(h) dh, \quad (5.32)$$

причем α_λ – коэффициент ослабления, определяемый суммой

$$\alpha_\lambda = \sigma_{\lambda m} + \sigma_{\lambda a} + \alpha_{\lambda \text{озон}} + \alpha_{\lambda \text{в.пар}}. \quad (5.33)$$

Здесь $\sigma_{\lambda m}$ и $\sigma_{\lambda a}$ – объемные коэффициенты соответственно молекулярного и аэрозольного рассеяния; $\alpha_{\lambda \text{озон}}$ и $\alpha_{\lambda \text{в.пар}}$ – объемные коэффициенты, характеризующие поглощение озонном и водяным паром. Следовательно, оптическая толщина атмосферы также является суммой:

$$\tau_\lambda = \tau_{\lambda m} + \tau_{\lambda a} + \tau_{\lambda \text{озон}} + \tau_{\lambda \text{в.пар}}, \quad (5.34)$$

где $\tau_{\lambda m}$, $\tau_{\lambda a}$, $\tau_{\lambda \text{озон}}$, $\tau_{\lambda \text{в.пар}}$ – оптическая толщина соответственно молекулярной, аэрозольной, озонной атмосферы и атмосферы водяного пара.

Величина τ_λ связана с коэффициентом прозрачности p_λ атмосферы соотношением

$$p_\lambda = e^{-\tau_\lambda}. \quad (5.35)$$

Энергетические потери (%) направленного потока, прошедшего m масс атмосферы, составляет

$$(1 - q_\lambda)100 = (1 - p_\lambda^m)100$$

или

$$q_\lambda = \frac{J_\lambda}{J_{0\lambda}} = p_\lambda^m,$$

где q_λ – спектральный коэффициент направленного пропускания атмосферы, причем $0 \leq p_\lambda \leq 1$ и $0 \leq q_\lambda \leq 1$; p_λ и q_λ – безразмерные величины.

Коэффициенты прозрачности, обусловленные молекулярным и аэрозольным рассеянием, описываются формулами

$$p_{\lambda_m} = e^{-\sigma_{\lambda_m}} \quad (5.36)$$

и

$$p_{\lambda_a} = e^{-\sigma_{\lambda_a}}, \quad (5.37)$$

а общий коэффициент прозрачности определяется как произведение

$$p_\lambda = p_{\lambda_m} p_{\lambda_a} p_{\lambda_{озон}} p_{\lambda_{в.пар}}, \quad (5.38)$$

где p_{λ_m} , p_{λ_a} , $p_{\lambda_{озон}}$, $p_{\lambda_{в.пар}}$ – коэффициенты прозрачности соответственно молекулярной, аэрозольной, озонной атмосферы и атмосферы водяного пара.

б) Общее ослабление солнечной радиации $\Delta J_{общ}$ при прохождении ею m оптических масс атмосферы обуславливается молекулярным рассеянием ΔJ_m , аэрозольным ослаблением (за счет рассеяния) ΔJ_a и поглощением водяным паром $\Delta J_{в.пар}$:

$$\Delta J_{общ} = \Delta J_m + \Delta J_a + \Delta J_{в.пар} \quad (5.39)$$

или

$$\Delta J_{общ} = J_0 - J_n, \quad (5.40)$$

где J_n – прямая радиация, наблюдаемая у земной поверхности.

Величина ΔJ_m рассчитывается теоретически, в частности, при $m = 2$ она равна $0,25 \text{ кВт/м}^2$. Для определения величины $\Delta J_{в.пар}$ обычно используется график (рис. 39). Аэрозольное ослабление ΔJ_a определяется как остаточный член из соотношения (5.39):

$$\Delta J_a = \Delta J_{\text{общ}} - \Delta J_M - \Delta J_{\text{в.пар.}} \quad (5.41)$$

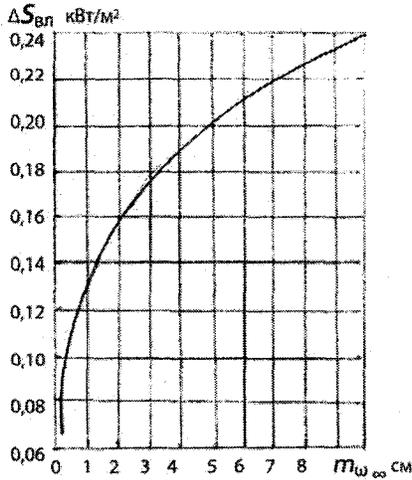


Рис. 39. Зависимость величины солнечной радиации, поглощенной водяным паром, от содержания водяного пара в единичном столбе атмосферы

в) Коэффициент прозрачности p_a (актинометрический) для интегрального солнечного потока связан с коэффициентом прозрачности p_c для световых потоков уравнением регрессии

$$p_c = 1,09 p_a - 0,11. \quad (5.42)$$

Коэффициент направленного пропускания равен

$$q_\lambda = \frac{E_{\text{норм}}}{E_0} = \frac{E_{\text{гор}}}{E_{0\sin h}} = p^m, \quad (5.43)$$

но поскольку $p = p_i^T$, то

$$T = \frac{\lg p}{\lg p_i}, \quad (5.44)$$

причем

$$T = 1 + W + R, \quad (5.45)$$

где W – влажная мутность; R – остаточная мутность:

$$R = \frac{\sigma_a}{\sigma_M}. \quad (5.46)$$

Если $R > 1$, то $\sigma_a > \sigma_m$ и преобладает аэрозольное ослабление.
 Если $R < 1$, то $\sigma_a < \sigma_m$ и преобладает молекулярное ослабление.

3. Рассеяние солнечного излучения в атмосфере

а) *Молекулярное рассеяние.* Монохроматический лучистый поток j_λ , рассеянный под углом θ малой сферической частицей объемом v , согласно теории Релея, определяется по формуле

$$j_\lambda = \frac{9\pi^2 v^2 J_\lambda}{\lambda^4 r^2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \left(\frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right) \right|, \quad (5.47)$$

где J_λ – падающий на частицу лучистый поток; r – расстояние до рассеивающей частицы; m – комплексный показатель преломления частицы: $m = n - ix$, причем n – показатель преломления; i – показатель поглощения, x – длина пути ослабления радиации.

По теории Релея–Кабанна объемный коэффициент молекулярного рассеивания воздуха, для которого можно принять $m = n$, равен

$$\sigma_m(\lambda, z) = \frac{32\pi^3 (n-1)^2}{3N(z)\lambda^4} \left(\frac{6+6d}{6-7d} \right), \quad (5.48)$$

причем $N(z)$ – число молекул воздуха в единице объема на высоте z ; $(n-1)$ – оптический индекс рефракции; d – фактор деполяризации (или средний коэффициент оптической анизотропии) молекул воздуха, равный 0,035, поэтому множитель $(6+6d)/(6-7d) = 1,061$ в выражении (5.48).

Оптическая толщина (плотность) молекулярной однородной атмосферы высотой H описывается соотношением

$$\tau_m = \frac{32\pi^3 (n-1)^2 1,061 H}{3N(z)\lambda^4} \frac{P}{P_0} = \sigma_m \frac{P}{P_0} H, \quad (5.49)$$

где P и P_0 – давление воздуха у земной поверхности и нормальное давление 1013,2 гПа соответственно. Выражение для нормированной индикатрисы молекулярного рассеяния имеет вид

$$\kappa_m(\theta) = 3/16\pi(1 + \cos^2\theta). \quad (5.50)$$

Объемный коэффициент молекулярного рассеяния $\sigma_m(\lambda, z)$ может быть представлен в виде

$$\sigma_m(\lambda, z) = \sigma_m^0(\lambda)N(z) = \frac{32\pi^3(n-1)^2 1,061}{3\lambda^4 N_0^2}, \quad (5.51)$$

а в случае обратного молекулярного рассеяния – формулой

$$\sigma_{\text{пм}}(\lambda, z) = \alpha_{\text{пм}} \sigma_m(\lambda, z) = \sigma_{\text{пм}}^0(\lambda)N(z) = \frac{32\pi^3(n-1)^2 1,061 \cdot 0,119}{3\lambda^4 N_0^2}, \quad (5.52)$$

где N_0 – число молекул в единице объема воздуха у земной поверхности при нормальных условиях ($N_0 = 2,55 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$).

б) *Аэрозольное ослабление.* Объемный коэффициент аэрозольного рассеяния σ_a выражается формулой

$$\sigma_a = \pi a^2 K(\rho, m)N, \quad (5.53)$$

где N – число аэрозольных частиц в единице объема; $K(\rho, m)$ – функция безразмерного параметра $\rho = 2\pi a/\lambda$ и комплексного показателя преломления частиц m ; a – радиус частицы; λ – длина волны.

Однако строгие расчеты $\sigma_a(\lambda)$ довольно сложны даже при известных параметрах микроструктуры атмосферного аэрозоля (как правило, его характеристики и вертикальное распределение неизвестны), поэтому для оценок используют эмпирические формулы:

$$\sigma_a(\lambda) = \frac{3,91}{S_m} \left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^{0,585 S_m^{1/3}} \quad (5.54)$$

или

$$\sigma_a(\lambda) = \left[\frac{3,91}{S_m} - 0,0116 \right] \left(\frac{0,55}{\lambda} \right), \quad (5.55)$$

где $\sigma_a(\lambda)$ – измеряется в км^{-1} , а видимость S_m – в километрах.

При наиболее типичных параметрах микроструктуры атмосферной дымки, туманов и водяных облаков для оценки общего коэффициента аэрозольного ослабления можно воспользоваться данными табл. 5.6.

Таблица 5.6

Коэффициенты $\sigma_a(\lambda)$ для наиболее вероятных значений параметров микроструктуры аэрозольных образований

λ , мкм	0,31	0,51	0,69	0,81	1,06	2,00	4,55	5,27	10,6
$\sigma_a(\lambda)$, км^{-1}	Атмосферная дымка при видимости 10 км								
	0,65	0,32	0,29	0,25	0,18	0,09	0,04	0,03	0,01
	Туманы и облака при видимости 0,2 км								
	19,5	19,6	19,7	19,7	19,9	20,3	21,6	22,2	19,6

Лабораторная работа 6

Информационные основы дистанционного зондирования системы Земля–атмосфера из космоса

Цель работы: изучить возможности естественных источников информации, используемых для характеристики состояния атмосферы, облачности и подстилающей земной поверхности методом дистанционного зондирования Земли из космоса.

Планета Земля, как известно, основную энергию получает от Солнца в виде электромагнитного излучения, максимум которого приходится на видимую область спектра (на длине волны 0,47 мкм).

Солнечное излучение, дошедшее до Земли, частично отражается в мировое космическое пространство, а частично поглощается земной поверхностью и атмосферой, превращаясь во внутреннюю энергию, потенциальную энергию, в скрытую теплоту и кинетическую энергию. Полученную Землей лучистую энергию Солнца (в диапазоне длин волн от 0,15 до 4,0 мкм) обычно называют солнечной радиацией или коротковолновым солнечным излучением. Собственное же тепловое излучение системы Земля–атмосфера (в диапазоне длин волн от 4 до 80–120 мкм) называют земной радиацией или длинноволновым уходящим (тепловым) излучением.

Разность между величинами поглощенного коротковолнового солнечного излучения и длинноволнового уходящего излучения определяют как радиационный баланс системы Земля–атмосфера. Изучение радиационного баланса и его составляющих позволяет исследовать закономерности излучения Земли как планеты, ее географической оболочки, погодо- климатообразующих процессов, а также тепловое состояние различных естественных объектов.

Информационные аспекты дистанционного зондирования

Интегральные значения поглощенной и излучаемой системой «Земля–атмосфера» энергии практически эквиваленты, близки

друг к другу. Спектральные же распределения поглощаемой и излучаемой радиации отличаются весьма существенно (рис. 40). Поэтому для дистанционного зондирования очень важны отражательные и поглощательные свойства различных естественных объектов, а также одного и того же объекта но в разных состояниях (влажного и сухого).

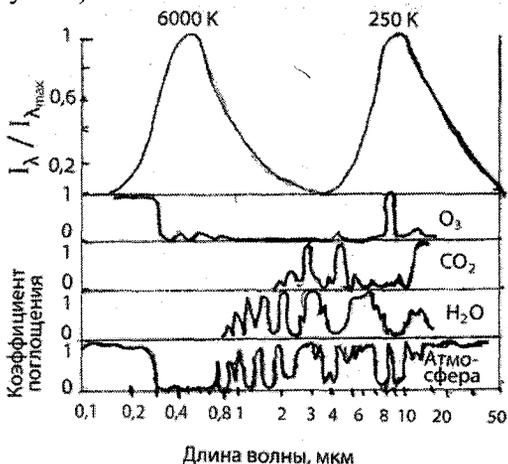


Рис. 40. Спектр поглощения излучения в атмосфере

Энергия и спектр уходящего (вторичного) излучения, его интенсивность и ширина диапазона зависят от температуры излучающего тепло объекта (иногда это излучение называют температурным). Для дистанционного зондирования важно то, что разные естественные объекты нагреваются по-разному и по-разному отдают свое тепло, то есть имеют разную эмиссию (от лат. emissio — испускание). Средняя температура Земли близка к 290 К (17 °С), поэтому максимум ее вторичного (эмиттерного) излучения приходится на длину волны 9,7 мкм.

Источники информации. Для аэрокосмической съемки и дистанционного зондирования Земли в настоящее время активно используют ультрафиолетовый (0,27–0,4 мкм), видимый, или световой (0,4–0,78), ближний, или фотографический, инфракрасный (0,7–1,1 мкм), тепловой инфракрасный (3,5–5,0 и 8,0–15 мкм), микроволновый или сверхвысокочастотный (0,3–10 см) диапазоны спектра электромагнитного излучения.

Объектами обследования с метеорологических спутников Земли в видимом и ближнем инфракрасном (0,38–1,3 мкм) диапазонах являются облака и открытые участки земной поверхности (суша и море). Особый интерес в метеорологическом отношении представляют космические изображения облачности, которую чаще всего воспринимают как индикатор (лат. *indicator* – указатель) погодообразующих процессов, погодных условий и явлений.

Возможность обнаружения облачности на фоне подстилающей поверхности Земли заключается в их различной способности отражать падающую на них солнечную радиацию, благодаря чему эти естественные объекты характеризуются различной яркостью. Коэффициент отражения, или отражательная способность (альбе́до), определяется количественным отношением между отраженными и падающими потоками электромагнитных волн.

Изучение состояния естественных объектов по их собственному тепловому (уходящему инфракрасному или микроволновому) излучению основано на наличии энергетических контрастов между облаками и подстилающей земной поверхностью (фоном), между сушей и морем, между различными типами облаков и т.п., обусловленных различием температуры их излучающих поверхностей.

Эмиссия возникает вследствие поглощения веществом падающего потока энергии. Мощность потока вторичного теплового (инфракрасного) излучения значительно меньше мощности отраженного от земной поверхности потока энергии, но оно все же может быть зафиксировано спутниковой аппаратурой в так называемых «окнах прозрачности» атмосферы (диапазонах длин волн 3,5–5 мкм и 8–12 мкм).

В типичных энергетических условиях системы Земля–атмосфера аппроксимация интенсивности теплового излучения для длин волн микроволнового диапазона (закон Релея–Джонса) определяет соотношение

$$B = 2kT_{\text{я}}/\lambda^2, \quad (6.1)$$

где B – яркость; $T_{\text{я}}$ – яркостная (радиояркостная) температура; λ – длина волны излучения; k – постоянная Больцмана. Отношение яркостной температуры $T_{\text{я}}$ к физической температуре T определяет смысл относительной излучательной способности

$$r = T_{\text{я}}/T \quad (6.2)$$

как функции физических особенностей объекта, излучающего в микроволновом (сверхвысокочастотном) радиодиапазоне. Необходимо отметить, что радиояркая температура зависит от длины волны излучения.

Фотографические, телевизионные и сканерные способы аэрокосмических съемок и дистанционного зондирования считают пассивными, поскольку в них используется естественное отраженное или вторичное тепловое излучение объектов, обусловленное солнечным излучением. Радарные и лидарные методы называют активными, так как они работают в диапазонах излучения, создаваемого искусственным источником направленного действия.

Преобразование излучения. Излучением принято называть процесс, при котором энергия может распространяться в пространстве без посредства материальной среды. Этим излучение отличается от процессов конвективного и адвективного переноса тепла, а также от молекулярной и турбулентной теплопроводности, при которых перенос энергии осуществляется только при наличии среды. Однако излучение обладает двойственной природой: коротковолновая лучистая энергия воспринимается как потоки корпускул или квантов, но существование единой скорости распространения волн, явления интерференции, отражения, преломления, дифракции и другие соответствуют волновой его сущности. Взаимодействие излучения с веществом (средой) определяется все же длиной волны, которую обычно используют для классификации радиационных свойств компонентов системы Земля-атмосфера. При взаимодействии энергии, излучаемой (или отражаемой) каким-либо источником, с поглощающим веществом (или средой) прежде всего теряется некоторая часть этой энергии. Так, например, при прохождении через атмосферу солнечное излучение взаимодействует с содержащимися в ней частицами пыли, дыма, кристалликами льда, каплями воды, молекулами газов. Происходящие при этом процессы рассеяния и поглощения энергии уменьшают интенсивность солнечной радиации на земной поверхности и даже меняют диапазоны излучения (рис. 40).

Полное количество лучистой энергии, проходящей через единицу площади поверхности за единицу времени, называют потоком радиации F всех длин волн:

$$F = \int_0^{\infty} F_{\lambda} d\lambda, \quad (6.3)$$

где F_{λ} – плотность распределения лучистой энергии по длинам волн вблизи определенной волны λ (спектральная плотность потока радиации) или монохроматический поток. Если поток F_{λ} проходит через некоторый слой вещества, то часть его поглощается (F'_{λ}), часть отражается (F''_{λ}) и часть проходит сквозь него (F'''_{λ}).

Тогда

$$F_{\lambda} = F'_{\lambda} + F''_{\lambda} + F'''_{\lambda}. \quad (6.4)$$

Разделив обе части равенства (6.4) на величину F_{λ} , получим

$$\frac{F_{\lambda}}{F_{\lambda}} = 1 = \frac{F'_{\lambda}}{F_{\lambda}} + \frac{F''_{\lambda}}{F_{\lambda}} + \frac{F'''_{\lambda}}{F_{\lambda}} = \alpha_{\lambda} + r_{\lambda} + d_{\lambda}, \quad (6.5)$$

где α_{λ} – поглощательная способность (или относительный коэффициент поглощения); r_{λ} – отражательная способность (или альбедо) и d_{λ} – относительный коэффициент пропускания. Эти величины безразмерны и изменяются в пределах от 0 до 1.

Полосой поглощения называют диапазон длин волн, в котором энергия излучения поглощается в атмосфере или на земной поверхности (рис. 41).

Полоса поглощения обуславливается извлечением тех дискретных количеств энергии, которые способны вызвать изменение колебательных уровней энергии молекулы. Колебательные уровни энергии имеют лишь многоатомные молекулы [например, кислород, озон, водяной пар, углекислый газ и др., поглощающие излучение в атмосфере (см. рис. 40)].

Тонкая структура полосы поглощения – ряд отдельных пиков интенсивности поглощения в пределах данной полосы называется линиями поглощения (рис. 41 и 42).



Рис. 41. Полоса поглощения (схема)

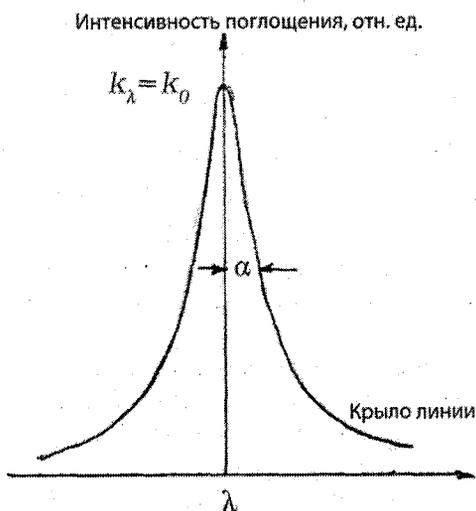


Рис. 42. Отдельная спектральная линия

Отдельные линии вносят одинаковый вклад в изменение энергии колебательного уровня, но отличаются друг от друга различным вкладом в изменение энергии вращательного движения молекулы.

Если симметричная линия достаточно удалена от соседних линий поглощения, её форма может быть описана как функция длины волны соотношением

$$k_{\lambda} = \frac{k_0 \alpha^2}{(\lambda - \lambda_0)^2 + \alpha^2}, \quad (6.6)$$

где k_{λ} – значение коэффициента поглощения в центре линии; α – полуширина линии, то есть расстояние от центра линии до точки, в которой $k_{\lambda} = \frac{k_0}{2}$. Для такой линии интенсивность поглощения асимптотически стремится к нулю при удалении от центра (на «крыльях» линии).

В атмосфере, например, поглощение излучения газом с определенным количеством молекул определяется числом спектральных линий в полосе поглощения и их расположением, полушириной и формой линии (особенно формой «крыльев»), давлением и температурой воздуха:

$$\alpha = \alpha_0 \left(\frac{p}{p_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6.7)$$

где T, p – температура и давление в реальных условиях; T_0, p_0 – температура и давление некоторого стандарта атмосферы (на определенной высоте).

Если в слой (рис. 43), содержащий поглощающее излучение вещество массой m , входит монохроматический поток $F_{\lambda}(0)$, а выходящий из этого слоя поток обозначить через $F_{\lambda}(m)$, то функцию поглощения (ослабления) можно определить как безразмерное отношение вида

$$A_{\lambda}(m) = \frac{F_{\lambda}(0) - F_{\lambda}(m)}{F_{\lambda}(0)} = 1 - \frac{F_{\lambda}(m)}{F_{\lambda}(0)} = 1 - \Phi_{\lambda}(m), \quad (6.8)$$

где $\Phi_{\lambda}(m) = \frac{F_{\lambda}(m)}{F_{\lambda}(0)}$ – функция пропускания.

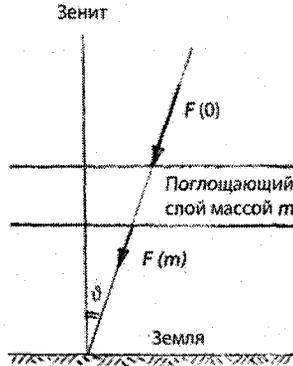


Рис. 43. Поглощение излучения в слое атмосферы

По закону Кирхгофа

$$\frac{F_{\lambda}}{\alpha_{\lambda}} = B(\lambda, T), \quad (6.9)$$

то есть отношение излучательной способности к поглощательной в условиях термодинамического равновесия не зависит от природы тела (объекта): оно является функцией $B(\lambda, T)$ длины волны и температуры. Для абсолютно черного тела (АЧТ), поглощательная способность которого $\alpha_{\lambda} = 1$, излучательная способность равна:

$$E_{\lambda, \text{АЧТ}} = B(\lambda, T)$$

и определяется законом Планка

$$B(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (6.10)$$

где $B(\lambda, T)$ – мощность (яркость) излучения; λ – длина волны; c_1 и c_2 – постоянные; T – физическая температура.

Для диапазона температур 200–300 К, характерного для системы Земля–атмосфера, основная часть уходящего теплового излучения сосредоточена в области спектра 3–50 мкм. В соответствии с законом Вина

$$\lambda_m T = \text{const}, \quad (6.11)$$

где λ_m – длина волны, при которой величина $B(\lambda, T)$ наибольшая, максимум излучения системы приходится на «окно прозрачности»

атмосферы 8–12 мкм (при незначительном поглощении озоном на длине волны 9,6 мкм). Тепловое же состояние объектов может быть оценено по закону Стефана–Больцмана:

$$B(\lambda, T) = \sigma T^4 \text{ рад}, \quad (6.12)$$

где σ – постоянная; $T_{\text{рад}}$ – радиационная температура.

Под радиационной температурой понимают температуру АЧТ, излучение которого равно излучению реального объекта, зафиксированному инфракрасной аппаратурой метеорологического спутника Земли.

Обстоятельством, значительно упрощающим анализ уходящего теплового излучения, является существование в большей части атмосферы (до высоты 50 км) локального термического равновесия, в условиях которого «каждый элементарный объем атмосферы излучает количество энергии, близкое к поглощенному им количеству энергии» (закон Кирхгофа). Следовательно, совокупность процессов поглощения и рассеяния радиации в плоскопараллельной модели атмосферы может быть описано уравнением радиационного переноса:

$$J(\lambda) = \varepsilon B(\lambda, T) \Phi[\nu, T(p), q(p), \psi]_{p=p_0} - \int_0^{p_0} B(\lambda, T) \frac{\partial \Phi[\nu, T(p), q(p), \psi]}{\partial p} dp, \quad (6.13)$$

где $J(\lambda)$ – интенсивность излучения (спектральная яркость), в интервале, центрированном относительно пространственной частоты $\nu = 1/\lambda$ на верхней границе атмосферы, регистрируемого аппаратурой МСЗ; λ – длина волны излучения; ε – излучательная способность (коэффициент) поверхности; $B(\lambda, T)$ – мощность излучения абсолютно черного тела; $T(p)$ и $q(p)$ – соответственно вертикальные профили температуры и концентрации поглощающих компонентов в зависимости от давления; $P[\dots]$ – функция пропускания вверх на уровне давления p и для угла визирования ψ , отсчитываемого от вертикали в точке измерения; p_0 – давление на уровне подстилающей поверхности.

Поскольку вид функции пропускания определяется не только характеристиками конкретных спектральных линий или полос, но и состоянием атмосферы, в каждом спектральном интервале излучение разных слоев атмосферы будет иметь разный удельный вес.

Другими словами, вклад уходящего излучения отдельных слоев атмосферы в различных участках спектра электромагнитного излучения неодинаков.

Внутри определенной полосы поглощения можно выделить интервалы, каждый из которых соответствует преимущественно излучению одного более или менее тонкого слоя атмосферы. В этом случае, грубо говоря, можно считать, что до измеряющей аэрокосмической аппаратуры доходит излучение столба какой-либо атмосферной газовой составляющей, представляющее собой (математически) свертку вида:

$$\varphi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(x-y) f_1(y) dy, \quad (6.14)$$

где $f_1(y)$ – зависимость интенсивности излучения столба газа единичной массы от высоты; $f_2(x-y)$ – функция, определяющая долю излучения, пропускаемого на каждой высоте. Такие функции (свертки) пропускания в последнее время стали называть весовыми.

Весовая функция (рис. 44) имеет максимум на некоторой высоте, потому что в верхних слоях атмосферы газа мало, а излучение нижних слоев почти полностью поглощается на пути излучения. Поскольку поглощение и излучение зависят от частоты, упомянутый максимум для различных частот располагается на разной высоте, что может быть использовано для восстановления вертикального профиля плотности (давления) и температуры.

Оценка информации. Вычисление интенсивности и других количественных характеристик излучения по заданным функциям пропускания и известным распределениям параметров состояния атмосферы с использованием уравнения радиационного переноса (6.13) составляет содержание прямой задачи, а восстановление распределений метеорологических величин по измеренным спектральным яркостям – обратной задачи спутниковой метеорологии. «Обращение» радиационных данных в метеорологические величины чаще всего осуществляют по измерениям в инфракрасном и микроволновом диапазонах спектра электромагнитного излучения в полосах поглощения углекислого газа (4,3 и 15 мкм), водяного пара (6,3 и 18 мкм или 0,8 и 1,35 см), кислорода (5 мм).

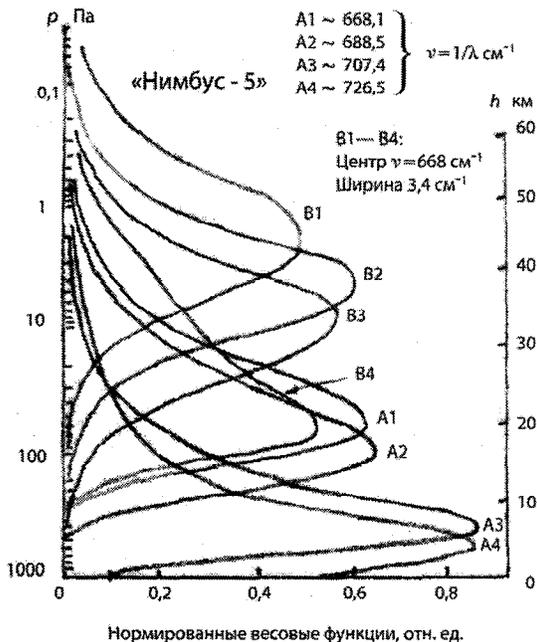


Рис. 44. Весовые функции для различных спектральных интервалов в полосе 15 мкм углекислого газа (стандартная атмосфера)

Задача восстановления параметров, как и другие обратные задачи, является некорректно поставленной: любые небольшие изменения в исходных данных (в регистрируемых сигналах), приводят к значительным изменениям получаемого решения. Поэтому дистанционное зондирование целесообразно проводить в одной из линий (полос) поглощения атмосферы, где земное излучение не доходит до аппаратуры, а регистрируемое излучение обеспечивается практически лишь одной атмосферной составляющей (например, по линиям поглощения углекислого газа вблизи волны длиной 15 или 4,3 мкм).

Изучение термического состояния системы Земля–атмосфера в глобальном масштабе представляет научный интерес не только в связи с исследованиями по общей циркуляции атмосферы или для климатологии, но имеет и практическую ценность в связи с необходимостью располагать соответствующей информацией для анализа и прогноза погоды.

Радиационное изменение температуры $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_p$ в результате

преобразований лучистой энергии в атмосфере может быть представлено соотношением:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_p = \frac{F_\lambda}{c_p}, \quad (6.15)$$

где

$$F_\lambda = -\frac{1}{p} \frac{\Delta F}{\Delta z} = g \frac{\Delta F}{\Delta p} \quad (6.16)$$

– отнесенный к единице массы лучистой приток тепла, пропорциональный дивергенции полного потока радиации F ;

$$\Delta F = F(z + \Delta z) - F(z)$$

– перепад полного потока в слое толщиной Δz , а

$$F(z) = -R(z) = -S(z) \cos \vartheta - D \downarrow(z) + D \uparrow(z) - F \downarrow(z) + F \uparrow(z) \quad (6.17)$$

– поток на произвольном уровне z .

В (6.17) использованы обозначения: $R(z)$ – радиационный баланс; $S(z)$ – прямая солнечная радиация, приходящая на единичную нормальную поверхность; ϑ_\odot – зенитный угол Солнца; $D \downarrow(z)$ и $D \uparrow(z)$ – нисходящий поток рассеянной и восходящий поток отраженной солнечной радиации; $F \downarrow(z)$ и $F \uparrow(z)$ – нисходящий и восходящий потоки длинноволновой радиации.

В первом приближении основой для оценки трансформации излучения в атмосфере могут послужить две сравнительно простые модели (рис. 45) при ясном и облачном небе.

Ясное небо. Среднее значение солнечной радиации, поступающей на верхнюю границу атмосферы, принимают за 100 %. За счет поглощения на пути до тропопаузы она уменьшится на 2 %. В тропосфере 20 % излучения будет поглощено, а 20 % радиации будет рассеяно, причем в последнем случае половина энергии уйдет к верхней границе атмосферы, а другая – к нижней. Таким образом, до земной поверхности дойдет 68 % солнечной радиации. Если среднее альbedo системы Земля–атмосфера при ясном небе

заданном уровне в нижней атмосфере или уточнить отражающие свойства облачного слоя при облачном небе и т.п.).

В научных исследованиях потоки радиации в безоблачных слоях атмосферы рассчитываются по известным соотношениям (и для коротковолновой радиации, и для длинноволнового излучения), а внутри облачного слоя определяются путем линейной интерполяции между значениями на границах облака (в подоблачном и надоблачном слоях). Принято считать, что все облака, кроме перистых, не пропускают прямую солнечную и длинноволновую радиацию. При расчетах перистые облака также считаются прозрачными, однако их количество (баллы) уменьшается вдвое. При несплошной однослойной облачности полный поток радиации обычно представляют в виде суперпозиции потоков при ясном небе F_0 и при сплошной облачности F_{10} :

$$F = (1 - N)F_0 + NF_{10}, \quad (6.18)$$

где N – количество облачности в долях единицы.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под излучением?
2. Чем определяется взаимодействие излучения со средой?
3. Что называется коротковолновым солнечным излучением?
4. Что называют длинноволновым тепловым излучением?
5. Что такое радиационной баланс системы Земля–атмосфера?
6. Назовите диапазоны спектра электромагнитного излучения, используемые в настоящее время для аэро- и космической съемки, а также для дистанционного зондирования Земли.
7. Охарактеризуйте отражательные и поглощательные свойства естественных объектов.
8. Дайте общую характеристику видимого (и ближнего инфракрасного) диапазона спектра электромагнитного излучения.
9. Расскажите об инфракрасном тепловом диапазоне спектра.
10. Охарактеризуйте микроволновый диапазон спектра излучения.
11. В чем отличие пассивных методов дистанционного зондирования от активных?
12. Что такое «полоса поглощения излучения»?
13. Опишите тонкую структуру полосы поглощения.
14. Дайте определение функции поглощения и функции пропускания.
15. Что представляет собой весовая функция?
16. Что называют уравнением радиационного переноса?
17. Охарактеризуйте содержание прямой и обратной задач спутниковой метеорологии.

Задачи

- 6.1. Рассчитать среднее количество солнечной радиации, приходящееся на единицу поверхности Земли за пределами атмосферы (среднюю инсоляцию), если солнечную постоянную считать $S_0 = 1376 \text{ Вт/м}^2$.
- 6.2. Определить среднюю радиационную температуру излучений Земли как планеты, учитывая, что солнечная постоянная равна $S_0 = 1376 \text{ Вт/м}^2$, среднее альbedo Земли равно 0,4, а средняя многолетняя температура на земном шаре не меняется со временем. Рассчитать также температуру поверхности Земли, лишенной атмосферы, для значений альbedo 0,1 и 0,8.
- 6.3. Как изменится солнечная постоянная, а также рассчитанные в предыдущей задаче радиационные температуры излучения Земли, если радиационная температура излучения Солнца понизится на 100 К.
- 6.4. Рассчитать эффективные поглощающие массы от верхней границы атмосферы до указанных ниже уровней среднезональных профилей влажности на широтах 10 и 60° Северного полушария в июле:

P , гПа	$\varphi = 10^\circ \text{с.ш.}$		$\varphi = 60^\circ \text{с.ш.}$	
	T К	q , ‰	T К	q , ‰
0	0	0	0	0
100	196	0,002	226	0,002
200	216	0,051	232	0,028
300	235	0,339	238	0,133
400	254	1,30	244	0,400
500	267	2,40	256	1,000
550	271	3,13	260	1,36
600	275	3,98	264	1,81
650	279	4,97	268	2,36
700	283	6,10	272	3,00
750	286	7,52	274	3,62
800	289	9,15	277	4,32
850	292	11,00	280	5,10
900	294	12,74	282	5,84
950	297	14,64	283	6,64
1000	299	16,70	285	7,50

Примечание. В таблице обозначены: T – температура (К) и q – массовая доля водяного пара (лат. promille – на тысячу, тысячная доля какого-либо числа, обозначается знаком ‰).

- 6.5. Определить прямую солнечную радиацию и отраженную от земной поверхности радиацию в безоблачной атмосфере на уровнях 0, 200, 400, 600, 800 и 1000 гПа для зенитных углов Солнца, равных 0 и 50°, широты $\varphi = 10^\circ$. Соответствующий профиль влажности взять из задачи 6.4; альbedo подстилающей поверхности считать равным $A = 0,15$.

- 6.6. Используя результаты, полученные в предыдущей задаче, рассчитать изменение температуры $\frac{\partial T}{\partial t}$ за счет поглощения коротковолновой солнечной радиации для слоев толщиной 200 гПа, а также среднее для всей атмосферы радиационное изменение температуры (в К/сут.).
- 6.7. Рассчитать восходящую и нисходящую коротковолновую радиацию на уровнях 0 и 1000 гПа, а также на границах облачного слоя для широт, равных 10° и 60° с.ш. (см. задачу 6.4). Зенитный угол Солнца считать равным 50°. Сплошной слой (10 баллов) высокослоистых облаков расположен на уровне 600–550 гПа. Альbedo подстилающей земной поверхности равно 0,1.
- 6.8. Определить изменение температуры за счет поглощения коротковолновой радиации (в К/сут.) для надоблачного, облачного и подоблачного слоев, а также для всей атмосферы в среднем, используя результаты решения задачи 6.7.
- 6.9. Рассчитать восходящую и нисходящую длинноволновую (земную) радиацию в безоблачной атмосфере на широте 10° с.ш. на уровнях 0, 200, 400, 600, 800 и 1000 гПа. (профили температуры и влажности приведены в задаче 6.4).
- 6.10. Используя результаты решения предыдущей задачи 6.9, рассчитать изменения температуры за счет длинноволновой радиации (в К/сутки) для слоев толщиной 200 гПа, а также в среднем для всей атмосферы.
- 6.11. Определить радиационный баланс на уровнях 0, 200, 400, 600, 800 и 1000 гПа, а также полные радиационные изменения температуры для слоев толщиной 200 гПа и для всей атмосферы в среднем для условий, указанных в задачах 6.5 и 6.9.
- 6.12. Рассчитать восходящий и нисходящий поток длинноволновой радиации на уровнях 0 и 1000 гПа, а также на границах облачного слоя при сплошной (10 баллов) высокослоистой облачности, расположенной в слое 600–550 гПа (профили температуры и влажности взять из задачи 6.4 для широт 10° и 60° Северного полушария).
- 6.13. Оценить изменения температуры за счет длинноволнового (земного) излучения (в К/сут.) для надоблачного, облачного и подоблачного слоев, а также для всей атмосферы в среднем, используя результаты, полученные в задаче 6.12.
- 6.14. Рассчитать радиационный баланс на уровнях 0, 550, 600 и 1000 гПа, а также полные радиационные изменения температуры для надоблачного, облачного и подоблачного слоев и для всей атмосферы в среднем, соблюдая условия, сформулированные в задачах 6.7 и 6.12.
- 6.15. Как изменяется коротковолновая нисходящая радиация на уровне земной поверхности; коротковолновая радиация, отраженная обратно в мировое пространство; радиационное нагревание атмосферы, подстилающей земной поверхности и системы Земля–атмосфера:
а) при увеличении высоты Солнца; б) при увеличении влажности; в) при появлении облачности; г) при увеличении альbedo земной поверхности?
- 6.16. Как изменяется уходящее в мировое пространство длинноволновое излучение, нисходящее длинноволновое излучение на уровне подстилающей земной поверхности и радиационное выхолаживание атмосферы, земной поверхности и системы Земля–атмосфера:

- а) при увеличении температуры земной поверхности и атмосферы; б) при увеличении влажности; в) при появлении облачности?
- 6.17. При каких условиях появление облачности приводит к «потеплению» на уровне подстилающей земной поверхности, а при каких – к «похолоданию»?
- 6.18. Средняя за год для всей планеты в целом температура географической оболочки составляет около 15°C , а наиболее характерные экстремальные ее значения около 50 и -50°C . Считая земное излучение близким к излучению абсолютно черного тела, имеющего такую же температуру, найти длины волн, на которые приходится наибольшая энергия при указанных температурах. Каким участкам длин волн соответствуют метеорологические термины «коротковолновая радиация» и «длинноволновое излучение»?
- 6.19. Считая излучение Солнца и системы Земля–атмосфера близкими к излучению абсолютно черных тел с температурами соответственно 6000 K и 15°C , определить, во сколько раз энергетическая светимость планеты Земля меньше, чем Солнца.
- 6.20. Вычислить энергетическую светимость оголенной сухой почвы на земной поверхности при температурах 40 и -40°C . Значительно ли меняется излучение почвы от лета к зиме? Изменится ли ответ, если учесть, что зимой почва может быть покрыта снегом?
- 6.21. Определить радиационную температуру поверхности сухого торфа, если его энергетическая светимость составляет $0,49\text{ кВт/м}^2$.
- Примечание.* Определив δT^4 , найти $T_{\text{рад}}$ по табл. 6.4.
- 6.22. Энергетическая освещенность поверхности влажного песка длинноволновой радиацией составляет $0,83\text{ кВт/м}^2$. Какое количество длинноволнового излучения поглощается и какое отражается? Чем различается отражение поверхностью коротковолновой и длинноволновой радиации?
- 6.23. Температура излучающей поверхности, покрытой редкой травой, равна 30°C ; температура воздуха 20°C , парциальное давление водяного пара $16,0\text{ гПа}$; небо ясное. Вычислить поглощенную часть встречного излучения, земное излучение и разность между ними. Приход или расход длинноволновой радиации преобладает в данном случае? Возможно ли обратное соотношение между ними? Как называется найденная разность? О каком соотношении двух первых величин свидетельствует ее знак? Часто ли наблюдается такое соотношение?
- 6.24. Вычислить при ясном небе излучение поверхности, температура которой 20°C , $\varepsilon = 0,90$; встречное излучение при температуре воздуха 15°C и парциальном давлении водяного пара $9,0\text{ гПа}$; поглощенную часть встречного излучения, эффективное излучение и длинноволновый радиационный баланс. Каков смысл полученных знаков для двух последних величин? Нагревание или выхолаживание поверхности происходит в данном случае за счет длинноволнового излучения?
- 6.25. Каким станет эффективное излучение естественного объекта, составляющее при ясном небе $0,25\text{ кВт/м}^2$, если половина неба будет покрыта облаками верхнего, среднего и нижнего яруса? Как влияет облачность на эффективное излучение? Почему облака разных ярусов неодинаково уменьшают эффективное излучение?

- 6.26. Вычислить эффективное излучение поверхности чистого снега, температура которого $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, если температура воздуха $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, парциальное давление водяного пара $4,0\text{ гПа}$, наблюдается 4 балла облаков среднего и 5 баллов облаков нижнего яруса.
- 6.27. Вычислить радиационный баланс земной поверхности, если поглощенная часть прямой радиации на горизонтальную поверхность составляет $0,35\text{ кВт/м}^2$, рассеянной радиации $0,08\text{ кВт/м}^2$, встречного излучения $0,30\text{ кВт/м}^2$, а земное излучение равно $0,40\text{ кВт/м}^2$. О чем говорит знак ответа?
- 6.28. Определить радиационный баланс земной поверхности, если коротковолновый баланс равен $0,38\text{ кВт/м}^2$, а длинноволновый $-0,10\text{ кВт/м}^2$.
- 6.29. Рассчитать радиационный баланс поверхности чистого снега, если суммарная радиация равна $0,14\text{ кВт/м}^2$, альбедо 90% , температура поверхности и воздуха $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, парциальное давление водяного пара $0,25\text{ гПа}$, небо ясное. Может ли радиационный баланс поверхности быть отрицательным при наличии прямой и рассеянной радиации?
- 6.30. По результатам спутниковых измерений установлено, что фактическое альбедо системы Земля–атмосфера составляет 29% . Известно, что годовая энергетическая экспозиция солнечной радиации на верхней границе атмосферы равна $10\,880\text{ МДж/м}^2$. Вычислить годовую сумму солнечной радиации, отраженной Землей как планетой в окружающее космическое пространство. Рассчитать баланс солнечной радиации на верхней границе атмосферы.

Материалы для работы

1. Карандаш, линейка.
2. Лист миллиметровой бумаги
3. Калькулятор (или компьютер)
4. Радиационная диаграмма

Рекомендуемая литература

1. *Говердовский В.Ф.* Космическая метеорология. Ч. I. Спутниковая метеорология. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009.
2. *Матвеев Л.Т.* Физика атмосферы. – СПб.: Гидрометеоздат, 2000.
3. Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды / Под ред. И.П. Ветлова и Н.Ф. Вельтищева. – Л.: Гидрометеоздат, 1982.

Порядок выполнения работы

1. Дать обоснованные ответы на вопросы задач 6.15, 6.16 и 6.17.
2. Если Вы не сумели правильно ответить на вопросы этих задач хотя бы частично, необходимо воспользоваться рекомендованной литературой и изучить теоретические основы требуемых ответов.

3. Если Вы справились успешно с заданием п.1 и ответили правильно на все вопросы, то можете приступить к решению любых задач, предусмотренных в лабораторной работе.
4. Решить рекомендованные преподавателем задачи.
5. Для решения задач графическим методом использовать радиационную диаграмму (см. п. II.6. Методических указаний к лабораторной работе).
6. Проанализировать полученные результаты.
7. Составить краткий отчет (в произвольной форме) о выполненной лабораторной работе.

Методические указания

I. Коротковолновая солнечная радиация.

1. При расчетах отдельных составляющих полного потока излучения по соотношению (6.17) руководствоваться схемой, представленной на рис. 46.

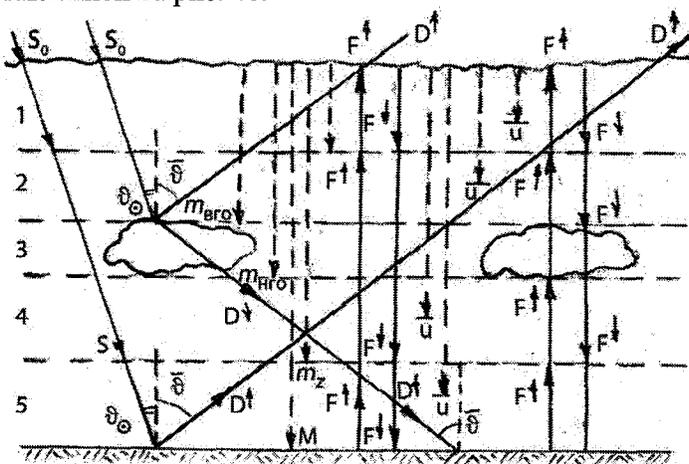


Рис. 46. Распределение лучистых потоков в атмосфере для различных видов радиации

2. Безоблачная атмосфера. Прямая солнечная радиация $S'(z)$ на единичную горизонтальную поверхность, вычисляется по формуле:

$$S'(z) = S(z) \cos \vartheta_{\square} = S_0 \cos \vartheta_{\square} P_{k1}(m_1). \quad (6.19)$$

Нисходящая рассеянная радиация отсутствует, то есть $D \downarrow(z) = 0$, а отраженная радиация равна

$$D \uparrow(z) = S_0 \cos \vartheta_{\square} P_{k2}(m_2). \quad (6.20)$$

3. Подоблачный слой. Прямая солнечная радиация отсутствует, то есть $S'(z) = 0$. Нисходящая радиация, прошедшая сквозь облако, вычисляется по отношению

$$D \downarrow(z) = S_0 \cos \vartheta_{\square} P_{k3}(m_3). \quad (6.21)$$

Восходящая радиация, отраженная подстилающей поверхностью, равна

$$D \uparrow(z) = AD \downarrow(0) = S_0 \cos \vartheta_{\square} P_{k5}(m_4), \quad (6.22)$$

где A – альбедо подстилающей земной поверхности.

4. Надоблачный слой. Поток прямой солнечной радиации $S'(z)$ определяется так же, как и в случае безоблачной атмосферы; $D \uparrow(z) = 0$. Восходящая радиация равна сумме потоков, отраженных подстилающей земной поверхностью и облаками:

$$D \uparrow(z) = S_0 \cos \vartheta_{\square} [P_{k5}(m_4) + P_{k4}(m_5)] \quad (6.23)$$

Примечание. Буквы P_k и m с индексами ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) обозначают функции пропускания и поглощающие массы для разных поглощающих слоев (см. рис. 46).

5. Интегральная функция пропускания для коротковолновой радиации в облачной атмосфере P_{ki} может быть представлена суммой:

$$P_{ki}(m_j) = a_i P_B + b_i P_{uk}(m_j), \quad (6.24)$$

где $P_B = 0,463$ – для солнечной радиации в видимой области спектра электромагнитного излучения, прошедшая через слой озона;

$$P_{uk}(m_j) = 0.062e^{-0.945\sqrt{m_j}} + 0.450e^{-0.0292\sqrt{m_j}} \quad (6.25)$$

– функция пропускания для инфракрасной части солнечной радиации, учитывающая поглощение излучения водяным паром и углекислым газом. Значение ρ_{uk} для разных поглощающих масс приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Функция пропускания для инфракрасной части солнечной радиации в зависимости от массы водяного пара на пути луча

m , кг/м ²	0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,000	0,512	0,51	0,509	0,508	0,508	0,507	0,507	0,506	0,506	0,505
m	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,00	0,512	0,505	0,502	0,500	0,499	0,497	0,496	0,495	0,494	0,493
0,10	0,492	0,491	0,490	0,489	0,489	0,488	0,487	0,487	0,486	0,485
0,20	0,485	0,484	0,484	0,483	0,483	0,482	0,482	0,481	0,481	0,480
0,30	0,480	0,479	0,479	0,478	0,478	0,478	0,477	0,477	0,477	0,476
0,40	0,476	0,476	0,475	0,475	0,474	0,474	0,474	0,474	0,473	0,473
0,50	0,473	0,472	0,472	0,472	0,471	0,471	0,471	0,471	0,470	0,470
0,60	0,470	0,469	0,469	0,469	0,469	0,468	0,468	0,468	0,468	0,468
0,70	0,467	0,467	0,467	0,467	0,466	0,466	0,466	0,466	0,465	0,465
0,80	0,465	0,465	0,465	0,464	0,464	0,464	0,464	0,464	0,463	0,463
0,90	0,463	0,463	0,463	0,462	0,462	0,462	0,462	0,462	0,462	0,461
m	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1,0	0,461	0,459	0,458	0,456	0,455	0,454	0,452	0,451	0,450	0,449
2,0	0,448	0,447	0,446	0,445	0,444	0,444	0,443	0,442	0,441	0,440
3,0	0,440	0,439	0,438	0,438	0,437	0,437	0,436	0,436	0,435	0,434
4,0	0,434	0,433	0,433	0,432	0,432	0,431	0,431	0,430	0,430	0,430
5,0	0,429	0,429	0,428	0,428	0,427	0,427	0,427	0,426	0,426	0,425
6,0	0,425	0,425	0,424	0,424	0,424	0,423	0,423	0,423	0,422	0,422
7,0	0,422	0,421	0,421	0,421	0,420	0,420	0,420	0,420	0,419	0,419
8,0	0,419	0,418	0,418	0,418	0,418	0,417	0,417	0,417	0,416	0,416
9,0	0,416	0,416	0,415	0,415	0,415	0,415	0,414	0,414	0,414	0,414

Окончание табл. 6.1

<i>m</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,413	0,411	0,409	0,407	0,405	0,404	0,402	0,400	0,399	0,397
20	0,396	0,395	0,393	0,392	0,391	0,390	0,388	0,387	0,386	0,385
30	0,384	0,383	0,382	0,381	0,380	0,379	0,378	0,377	0,376	0,375
40	0,374	0,374	0,373	0,372	0,371	0,370	0,369	0,369	0,368	0,367
50	0,366	0,366	0,365	0,364	0,363	0,363	0,362	0,361	0,360	0,360
60	0,359	0,358	0,358	0,357	0,356	0,356	0,355	0,354	0,354	0,353
70	0,353	0,352	0,351	0,351	0,350	0,350	0,349	0,348	0,348	0,347
80	0,347	0,346	0,346	0,345	0,344	0,344	0,343	0,343	0,342	0,342
90	0,341	0,341	0,340	0,340	0,339	0,339	0,338	0,338	0,337	0,337
<i>m</i>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
100	0,336	0,331	0,327	0,323	0,319	0,315	0,311	0,308	0,304	0,301
200	0,298	0,295	0,292	0,289	0,286	0,284	0,281	0,279	0,276	0,274
300	0,272	0,269	0,267	0,265	0,263	0,261	0,259	0,257	0,255	0,253
400	0,251	0,249	0,248	0,246	0,244	0,242	0,241	0,239	0,238	0,236
500	0,234	0,233	0,231	0,230	0,229	0,227	0,226	0,224	0,223	0,222

Коэффициенты a_i и b_i учитывают отражение и пропускание солнечной радиации облаками и отражение земной поверхностью. Для прямой солнечной радиации $a_1 = b_1 = 1$. коэффициенты a_2 и b_2 представляют собой альbedo подстилающей земной поверхности в видимой и инфракрасной областях спектра (обычно принимают $a_2 \approx b_2 = A$, где A – интегральное альbedo подстилающей поверхности – см. табл. 6.2, а также табл. 5.3).

Таблица 6.2

Альbedo различных подстилающих поверхностей			
Подстилающая поверхность	Интегральное альbedo	Видимая область спектра	Близкая инфракрасная область спектра
Песок белый (речной)	0,45	0,38	0,53
Чернозем	0,08	0,04	0,12
Зеленая растительность	0,23	0,05	0,43
Снег свежешвыпавший, сухой	0,85	0,89	0,81
Снег мокрый	0,57	0,66	0,47
Гладкая водная поверхность при угле падения радиации:			
< 30°	0,02	0,02	0,02
< 50°	0,03	0,03	0,03
< 60°	0,06	0,06	0,06
< 70°	0,013	0,13	0,13
< 80°	0,35	0,35	0,35
< 100°	1,00	1,00	1,00

Коэффициенты a_3 и b_3 представляют собой долю радиации пропущенной облаками, а a_4 и b_4 – альbedo облаков в видимой и инфракрасной областях спектра электромагнитного излучения. Коэффициенты $a_5 = a_2 a_3$ и $b_5 = b_2 b_3$ характеризуют ослабление видимой и инфракрасной радиации в результате прохождения сквозь облако и отражения от подстилающей земной поверхности. Радиационные характеристики облачности приводятся в табл. 6.3, а также в табл. 5.2.

Таблица 6.3

Радиационные характеристики облачности в коротковолновой области спектра

Область спектра	Доля радиации	Облака			
		Ci	As	St	Ns, Cb
Видимая	Пропущенная	0,79	0,46	0,34	0,24
	Отраженная	0,21	0,54	0,66	0,76
Близкая инфракрасная	Пропущенная	0,77	0,34	0,20	0,10
	Отраженная	0,19	0,46	0,50	0,60
	Поглощенная	0,04	0,20	0,30	0,30

6. Эффективная поглощающая масса, содержащаяся в единичном столбе атмосферы от верхней границы атмосферы до произвольного уровня z

$$m_z = \int_z^{\infty} \rho_n \left(\frac{p}{p_{ст}} \right)^n dz = \frac{1}{g} \int_0^{p(z)} q \left(\frac{p}{p_{ст}} \right)^n dp, \quad (6.26)$$

где $\rho_{в.п.}$ – плотность водяного пара; q – массовая доля водяного пара; $p_{ст}$ – стандартное давление, при котором измерены коэффициенты поглощения; $(p/p_{ст})^n$ – множитель, учитывающий зависимость коэффициентов поглощения от давления (обычно принимают $p_{ст} = 1000$ гПа, $n = 1$).

Для различных видов коротковолновой солнечной радиации эффективные поглощающие массы рассчитываются по разным соотношениям (рис. 46):

$$m_j = m_1 = m_z \sec \nu_{\odot} \quad (6.27)$$

– для прямой солнечной радиации;

$$m_j = m_2 = M \sec \nu_{\odot} \quad (6.28)$$

– для отраженной от земной поверхности радиации (при ясном небе);

$$m_j = m_3 = m_{вг0} \cdot \sec \nu_{\odot} + (m_z - m_{вг0}) \overline{\sec \nu_{\odot}} \quad (6.29)$$

– для пропущенной облаком радиации;

$$m_j = m_4 = m_{вг0} \cdot \sec \nu_{\odot} + (M - m_{вг0}) \overline{\sec \nu_{\odot}} \quad (6.30)$$

– для отраженной от земной поверхности радиации (при пасмурном небе);

$$m_j = m_5 = m_{вг0} \cdot \sec \nu_{\odot} \quad (6.31)$$

– для отраженной от облака радиации.

Здесь использованы обозначения: M – эффективная поглощающая масса всего атмосферного столба; $m_{вг0}$ – эффективная поглощающая масса над верхней границей облачности (в надоблачном слое); $\overline{\sec \nu_{\odot}} \approx 1,66$ – средний секанс угла, под которым распространяются отраженные или прошедшие сквозь облако лучи.

II. Длинноволновое уходящее (земное) излучение

1. Безоблачная атмосфера. Восходящая радиация определяется соотношением:

$$F\uparrow(z) = \sigma T_{\text{п}}^4 \rho_{\text{д}}(M - m_z) + \int_M^{m_z} \sigma T^4 d\rho_{\text{д}}(u - m_z), \quad (6.32)$$

а нисходящая радиация вычисляется по формуле:

$$F\downarrow(z) = \int_0^{m_z} \sigma T^4 d\rho_{\text{д}}(m_z - u) \quad (6.33)$$

2. Подоблачный слой. Восходящая радиация рассчитывается как в случае безоблачной атмосферы, по соотношению (6.32), а нисходящая – по соотношению:

$$F\downarrow(z) = \sigma T_{\text{нго}}^4 \rho_{\text{д}}(m_z - m_{\text{нго}}) + \int_{m_{\text{лн}}}^{m_z} \sigma T^4 d\rho_{\text{д}}(m_z - u) \quad (6.34)$$

3. Надоблачный слой. Восходящая радиация равняется

$$F\uparrow(z) = \sigma T_{\text{вго}}^4 \rho_{\text{д}}(m_{\text{вго}} - m_z) + \int_{m_{\text{лн}}}^{m_z} \sigma T^4 d\rho_{\text{д}}(u - m_z), \quad (6.35)$$

Нисходящая радиация определяется так же, как при безоблачной атмосфере, то есть выражением (6.33).

В формулах (6.32)–(6.35) используются обозначения: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4) = 0,816 \cdot 10^{-10} \text{ кал}/(\text{мин} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана–Больцмана; $T_{\text{п}}$ – температура подстилающей земной поверхности; $T_{\text{вго}}$ и $T_{\text{нго}}$ – соответственно температура на верхней и нижней границах облачности; T – температура на уровне $u(z)$; параметр интегрирования u меняется в интервале $(0 - m_z)$, то есть $0 \leq u \leq m_z$.

Значения потока излучения абсолютно черного тела при разных температурах приведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Поток излучения абсолютно черного тела σT^4 (Вт/м²), [$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴)]

ТК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
180	60	61	62	63	64	65	68	69	71	72
190	74	75	77	79	80	82	84	85	87	89
200	91	92	94	96	98	100	102	104	106	108
210	110	112	115	117	119	121	123	126	128	130
220	133	135	138	140	143	145	148	151	153	156
230	159	161	164	167	170	173	176	179	182	185
240	188	191	194	198	201	204	208	211	214	218
250	221	225	229	232	236	240	243	247	251	255
260	259	263	267	271	275	280	284	288	292	297
270	301	306	310	315	320	324	329	334	338	343
280	348	353	358	364	369	374	379	385	390	395
290	401	406	412	418	424	429	435	441	447	453
300	459	465	472	478	484	490	497	504	410	417
310	524	530	537	544	551	558	565	572	580	587
320	594	602	609	617	624	632	640	648	656	664

4. Интегральная функция пропускания для длинноволнового излучения

$$\rho_d(m_j) = 0,539 e^{-2,45\sqrt{m_j}} + 0,461 e^{-2,45\sqrt{m_j}} \quad (6.36)$$

учитывает поглощение водяным паром и углекислым газом (табл. 6.5).

В выражении (6.36) под m_j понимают эффективную поглощающую массу водяного пара $m_z - u$ (для радиации, дошедшей до уровня m_z от границ облака или подстилающей поверхности, она равна $m_{\text{вго}} - m_z$, $m_z - m_{\text{нго}}$ и $M - m_z$ соответственно).

Таблица 6.5

Функция пропускания для длинноволновой радиации
в зависимости от массы водяного пара

m , кг/м ²	0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,000	1	0,957	0,940	0,927	0,916	0,907	0,899	0,892	0,885	0,879
m	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,03	0,09
0,00	1,000	0,873	0,828	0,797	0,772	0,751	0,733	0,718	0,704	0,691
0,10	0,679	0,669	0,659	0,650	0,641	0,633	0,626	0,618	0,612	0,605
0,20	0,599	0,593	0,588	0,583	0,578	0,573	0,528	0,564	0,559	0,555
0,30	0,551	0,547	0,543	0,540	0,536	0,533	0,529	0,526	0,523	0,520
0,40	0,517	0,514	0,512	0,509	0,506	0,504	0,501	0,499	0,496	0,494
0,50	0,492	0,490	0,487	0,485	0,483	0,481	0,479	0,477	0,475	0,473
0,60	0,472	0,470	0,468	0,466	0,465	0,463	0,461	0,460	0,458	0,457
0,70	0,455	0,454	0,452	0,451	0,449	0,448	0,446	0,445	0,444	0,442
0,80	0,441	0,440	0,439	0,437	0,436	0,435	0,434	0,433	0,432	0,430
0,90	0,429	0,428	0,427	0,426	0,425	0,424	0,423	0,422	0,421	0,420
1,00	0,419	0,418	0,417	0,416	0,415	0,414	0,413	0,412	0,412	0,411

<i>m</i>	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1,0	0,419	0,410	0,402	0,395	0,388	0,382	0,376	0,371	0,366	0,362
2,0	0,358	0,354	0,350	0,347	0,343	0,340	0,337	0,334	0,332	0,329
3,0	0,326	0,324	0,322	0,319	0,317	0,315	0,313	0,311	0,309	0,307
4,0	0,305	0,303	0,301	0,300	0,298	0,296	0,295	0,293	0,292	0,290
5,0	0,288	0,287	0,286	0,284	0,283	0,281	0,280	0,279	0,277	0,276
6,0	0,275	0,274	0,272	0,271	0,270	0,269	0,268	0,266	0,265	0,264
7,0	0,263	0,262	0,261	0,260	0,259	0,258	0,257	0,256	0,255	0,254
8,0	0,253	0,252	0,251	0,250	0,249	0,248	0,247	0,246	0,245	0,244
9,0	0,244	0,243	0,242	0,241	0,240	0,239	0,238	0,238	0,237	0,236
10,0	0,235	0,234	0,234	0,233	0,232	0,231	0,230	0,230	0,229	0,228
<i>m</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,235	0,228	0,220	0,214	0,208	0,202	0,197	0,191	0,187	0,182
20	0,178	0,174	0,170	0,166	0,162	0,159	0,155	0,152	0,149	0,146
30	0,143	0,141	0,138	0,134	0,133	0,131	0,128	0,126	0,124	0,122
40	0,120	0,118	0,116	0,114	0,112	0,110	0,109	0,107	0,105	0,104
50	0,1021	0,1006	0,0991	0,0977	0,0963	0,0949	0,0935	0,0922	0,0909	0,0897
60	0,0884	0,0872	0,0861	0,0849	0,0838	0,0827	0,0816	0,0805	0,0795	0,0785
70	0,0775	0,0765	0,0756	0,0746	0,0737	0,0728	0,0719	0,0710	0,0702	0,0693

5. Интегралы вычисляются любым стандартным методом численного интегрирования, например методом трапеций. В этом случае формула (6.26) принимает вид:

$$m_z = m_i = \frac{1}{2g} \sum_{k=1}^i \left[g_{k-1} \left(\frac{p_{k-1}}{p_{ст}} \right) + g_k \left(\frac{p_{k-1}}{p_{ст}} \right)^n \right] (p_k - p_{r-1}), \quad (6.37)$$

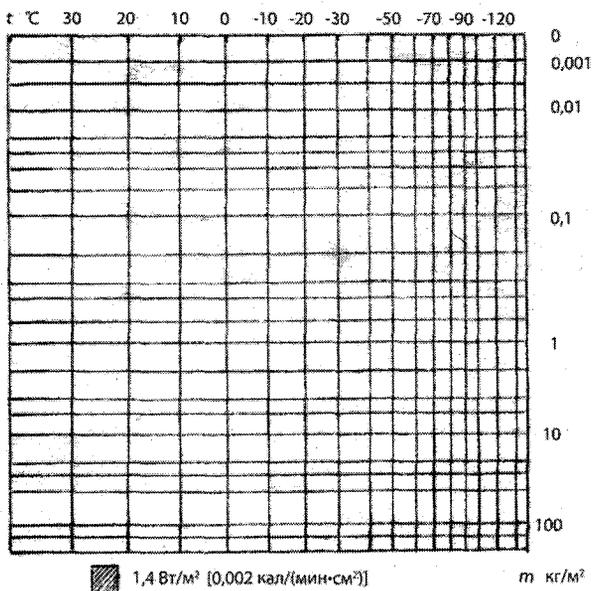
где $k = 0, 1, 2, \dots, l$ – номера уровней, на которых заданы значения $q(p)$.

Интегралы в формулах (6.32)–(6.35) заменяются суммами

$$\int_M^{m_z} \sigma T^A dp_{\bar{A}} (\bar{a} - m_z) = \frac{1}{2} \sum_{k=i+1}^l (\sigma T_{k-1}^A + \sigma T_k^A) \cdot \left[p_{\bar{A}} (|m_{k-1} - m_i|) - p_{\bar{A}} (|m_{k-1} - m_i|) \right]. \quad (6.38)$$

6. Потоки длинноволнового излучения можно определить графическим путем, используя специальную радиационную диаграмму (рис. 47).

По осям диаграммы (рис. 48) отложены значения σT^A и $\rho_d(m_j)$ и нанесены соответствующие им значения аргументов: температуры t и поглощающей массы m_j . Площадь элементарной полоски $abcd$ соответствует произведению $\sigma \cdot T^A \cdot dp_d(m_j)$.



Для решения практических задач масштаб увеличить в 2 раза.

Рис. 47. Радиационная диаграмма

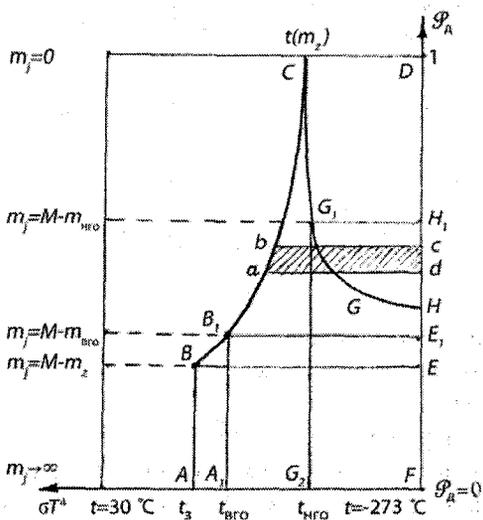


Рис. 48. Схема графического вычисления потоков длинноволновой радиации

В безоблачной атмосфере восходящий поток длинноволновой радиации на уровне m_z пропорционален площади $ABCD$, причем площадь $ABEF$ представляет собой излучение земной поверхности, а площадь $BCDE$ – собственное излучение атмосферы, дошедшее до уровня m_z (встречное излучение). Отрезок $AF = \sigma T_{\text{п}}^4$; отрезок $DE = \rho_{\text{д}}(M - m_z)^2$. Нисходящий поток на уровне m_z пропорционален площади $CDHG_1$.

Для пасмурного неба, если ниже уровня m_z расположено облако так, что его верхняя граница на уровне $m_{\text{вго}}$, то восходящий поток пропорционален площади A_1B_1CDEF (площадь $A_1B_1E_1F$ интерпретирует излучение облака), а нисходящий поток определяется так же, как и при ясном небе.

Если облако расположено выше уровня расчета m_z , восходящий поток имеет такую же величину, как и в случае безоблачной атмосферы, а нисходящий поток пропорционален площади $CDFG_2$ (причем площадь CDH_1G_1 эквивалентна собственному излучению слоя атмосферы от уровня m_z до нижней границы облака $m_{\text{вго}}$, а площадь $Y_1H_1FY_2$ – излучению облака, дошедшему до уровня m_z). При практическом использовании масштаб радиационной диаграммы (рис. 47) рекомендуется увеличить в два раза.

III. Эффективное излучение и радиационный баланс

1. Излучение земной поверхности либо измеряется непосредственно, либо вычисляется по формуле:

$$F_{\uparrow}(0) = \varepsilon \sigma T_{\text{п}}^4, \quad (6.39)$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана; $T_{\text{п}}$ – температура подстилающей земной поверхности; ε – коэффициент теплового излучения (табл. 6.6).

Таблица 6.6

Значения коэффициента теплового излучения для некоторых видов земной поверхности

Вид земной поверхности	Коэффициент ε	Вид земной поверхности	Коэффициент ε
Песок сухой	0,949	Торф сырой	0,983
Песок влажный	0,962	Трава густая	0,986
Почва сухая	0,954	Трава редкая	0,975
Почва влажная	0,968	Снег чистый	0,986
Торф сухой	0,970	Вода	0,960

2. При ясном небе нисходящий поток длинноволновой радиации у земной поверхности $F_{\downarrow}(0)$, называемый противоизлучением атмосферы, а также полный поток длинноволновой радиации $F_{\text{эф}}$, называемый эффективным излучением

$$F_{\text{эф}} = F_{\text{д}}(0) = F_{\uparrow}(0) - F_{\downarrow}(0) \quad (6.40)$$

можно приближенно оценить по значениям температуры и влажности у земной поверхности. Энергетическая освещенность подстилающей земной поверхности встречным излучением атмосферы (противоизлучением) измеряется непосредственно или определяется по формуле:

$$F_A = \sigma T_A^4 (0,61 + 0,05 \sqrt{e}), \quad (6.41)$$

где T_A – температура воздуха (К) на высоте 2 м над земной поверхностью; e – парциальное давление (гПа) водяного пара на этой же высоте.

Поглощенная и отраженная земной поверхностью части встречного излучения определяются соотношениями:

$$F_{\text{Ап}} = \varepsilon \cdot F_A \text{ и } F_{\text{Аотр}} = (1 - \varepsilon)F_A. \quad (6.42)$$

3. Эффективное излучение земной поверхности рассчитывается по уравнению:

$$F_{\text{эф}} = F_{\uparrow}(0) - \varepsilon F_A$$

или
$$F_{\text{эф}} = \varepsilon [\sigma T_o^4 - \sigma T_A^4 (0,61 + 0,05 \sqrt{e})]. \quad (6.44)$$

Величина эффективного излучения, взятая со знаком минус, представляет собой длинноволновый баланс $B_{\text{д}}$:

$$B_{\text{д}} = R_{\text{д}}(Z) = \varepsilon F_A - F_{\uparrow}(0). \quad (6.45)$$

В расчетной практике часто принимают $T_o = T_A$ и используют приближенную формулу:

$$F_{\text{эф}}^* = \varepsilon \sigma T_A^4 (0,39 + 0,05 \sqrt{e}). \quad (6.46)$$

При наличии облачности эффективное излучение определяется выражением:

$$F_{\text{эф обл}} = F_{\text{эф ясно}}(1 - cN), \quad (6.47)$$

где $F_{\text{эф ясно}}$ – эффективное излучение при ясном небе; N – количество облаков (в баллах), $c = 0,76$ – эмпирический облачный коэффициент (может изменяться в пределах от 0,50 до 0,82). Индивидуализируя коэффициент c для облаков разных ярусов, можно воспользоваться более точным соотношением

$$F_{\text{эф обл}} = F_{\text{эф ясно}}(1 - 0,076 n_{\text{н}} - 0,052 n_{\text{с}} - 0,022 n_{\text{в}}), \quad (6.48)$$

где $n_{\text{н}}$, $n_{\text{с}}$, $n_{\text{в}}$ – соответственно количество облаков нижнего, среднего и верхнего яруса (в баллах).

4. Радиационный баланс подстилающей земной поверхности, называемый ещё остаточной радиацией, характеризуется соотношением

$$B_{\text{п}} = R_{\text{п}}(0) = (S' + D) \cdot (1 - A) - F_{\text{эф}}, \quad (6.49)$$

где S' – прямая солнечная радиация на горизонтальную поверхность; D – рассеянная солнечная радиация; A – альbedo земной поверхности; $F_{\text{эф}}$ – эффективное излучение земной поверхности.

5. Радиационный баланс атмосферы определяется соотношением

$$B_{\text{А}} = R_{\text{А}}(\infty) = F_{\text{эф}} + Q_{\text{н}} - U_{\infty}, \quad (6.50)$$

где $Q_{\text{н}}$ – суммарная радиация, поглощенная вертикальным столбом атмосферы, имеющим единичное сечение и простирающимся от земной поверхности до верхней границы атмосферы; U_{∞} – длинноволновое излучение Земли и атмосферы, выходящее через верхнюю границу указанного столба атмосферы в космическое пространство (уходящее излучение).

6. Радиационный баланс системы Земля–атмосфера рассчитывают по формуле:

$$B_{\text{с}} = R_{\text{с}}(z) = (S' + D) \cdot (1 - A) + Q_{\text{н}} - U_{\infty}. \quad (6.51)$$

III. ПРИЕМ И ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ (МСЗ)

Основным источником информации, которая может быть получена при дистанционном зондировании Земли из космоса, является поле излучения земной поверхности и атмосферы, поскольку никакие другие характеристики не могут быть непосредственно измерены со спутника. Только измерение аппаратурой МСЗ интенсивности этого поля лежит в основе получения космических изображений Земли, а также различной дискретной информации о состоянии естественных объектов, образований, процессов и явлений, наблюдаемых в географической оболочке.

В современной аэрокосмической технике широко применяются методы (телевизионные, сканерные, радиолокационные, лидарные), использующие принцип сканирования по местности и/или по спектру излучения.

Принцип сканирования по местности заключается в последовательном просмотре отдельных элементов земной поверхности поперек траектории полета. Воспринятое объективом аппаратуры излучение через специальные фильтры, разделяющие его на требуемые поддиапазоны, фокусируется на детекторах, преобразуется в электрические сигналы, а затем либо запоминается на борту спутника (режим запоминания информации), либо сразу по радиоканалам транслируется на Землю (режим непосредственной передачи информации).

Специальные калибровочные сигналы (от эталонных излучателей, из открытого космоса и др.), замешиваемые в научную информацию, позволяют формировать изображение или поэлементно измерять распределение спектральных интенсивностей излучения естественных образований и объектов. Высота полета носителя и угол сканирования (отклонение луча визирования) относительно вертикали определяют ширину полосы обзора земной поверхности.

Сканирование по спектру электромагнитного излучения осуществляется управляемыми фильтрами.

Данные аэрокосмических измерений могут быть доставлены по радиоканалам на Землю двумя принципиально различными способами: или в виде изображений, или в форме электрических сигналов.

Орбита спутника определяется наклоном, средней высотой, эксцентриситетом и долготой восходящего узла. Для ИСЗ метеорологического и ресурсного назначения требуется, чтобы орбита была околополярной, солнечно-синхронной и близкой к круговой (в этом случае получаемые одной и той же аппаратурой изображения будут иметь одинаковые масштабы и разрешение). Соотношение между высотой орбиты и полосой обзора чаще всего выбирается таким, чтобы через определенное количество суток проекция орбиты на земной поверхности совпадала с начальной, а за прошедший период был осмотрен весь земной шар. Выведенный на такую орбиту спутник проходит над одними и теми же географическими районами в одно и то же местное солнечное время, то есть при примерно одинаковых условиях освещения.

Особый интерес для решения задач дистанционного зондирования представляет использование не просто кратной орбиты, а такой, при которой спутниковая трасса с заданной периодичностью проходит через определенный географический район (контрольный, тестовый полигон и т. п.), где одновременно проводятся комплексные (наземные, самолетные, судовые и пр.) подспутниковые наблюдения. Такие исследования необходимы для разработки единых методов интерпретации и использования данных спутниковых наблюдений.

Для обеспечения более оперативного обзора всей земной поверхности или более частого наблюдения одних и тех же географических районов, создаются космические системы из нескольких спутников.

Практическая ценность космических снимков существенно зависит от первичной обработки и, в первую очередь, от временной и географической привязки, которые выполняются в определенной последовательности сразу после приема информации.

Временная привязка снимков осуществляется по минутным меткам бортового единого времени (БЕВ), отмечаемым на космических снимках.

Для привязки снимка к местности необходимо знать точное время, когда была экспонирована, по крайней мере, одна точка (или строка) изображения. Время экспонирования остальных участков снимка и соответствующие им географические координаты могут быть рассчитаны с учетом элементов орбиты, характеристик спутниковой бортовой и приемной наземной аппаратуры.

Чаще всего географическая привязка снимка заключается в наложении определенным образом на изображение координат

ной сетки (палетки), рассчитанной заранее для некоторых стандартных орбит (например, долготы восходящих узлов которых отличаются на 1°). Уточнение географической привязки в пределах некоторой невязки (одного градуса) осуществляется за счет смещения изображения относительно края сетки (по минутным меткам и контурам наземных естественных объектов).

На персональных станциях приема данных дистанционного зондирования Земли из космоса географическая привязка осуществляется по специальной программе, реализуемой с помощью компьютера, путем расчета меридианов и параллелей отснятой территории с последующим впечатыванием (замешиванием) их в космический снимок (например, программа Geolocation, выполняющая функции географической привязки космических изображений в приемных станциях «Скан Экс»).

Между спутником и любым пунктом в его зоне видимости может быть установлена прямая радиосвязь, а между двумя пунктами, находящимися в зоне видимости одного и того же ИСЗ – связь через данный спутник.

Для получения радиосигналов, поступающих со спутников, работающих в режиме непосредственной (оперативной) передачи информации, используется специальная наземная аппаратура с направленной антенной. Антенна должна быть наведена на спутник, чтобы получить максимально возможный по мощности (амплитуде) сигнал при минимальном уровне шума. Процесс управления антенной, наведенной на движущийся ИСЗ, называется слежением. Для слежения требуется информация о пространственном положении спутника в зоне радиовидимости. Необходимыми данными для этого являются азимут спутника и его высота над линией горизонта наземного пункта приема информации, время входа (и выхода) спутника в зону радиовидимости. Комплекс этих данных определяет содержание целеуказаний на прием информации от спутника в режиме непосредственной передачи.

Эфемериды* спутников для расчета целеуказаний сообщаются в телеграммах соответствующих служб, передаваемых по линиям связи в виде сводок, закодированных специальным кодом.

* Эфемериды – астрономические сведения, указывающие заранее вычисленные положения (координаты) небесных тел для ряда последовательных моментов равномерно текущего времени (эфемеридного времени).

Лабораторная работа 7

Использование специальных кодов для передачи исходных данных по слежению за метеорологическими спутниками Земли

Цель работы: изучить коды, предназначенные для передачи сведений, необходимых для слежения за спутником, и приобрести практические навыки в декодировании и использовании телеграмм, закодированных такими кодами.

Система сбора и распространения метеорологической информации дает возможность оперативным метеорологическим подразделениям получать данные спутниковых наблюдений в режиме непосредственной передачи в виде региональных космических изображений облачности и земной поверхности. Для осуществления уверенного приема спутниковой информации необходимо, чтобы ИСЗ находился в поле зрения приемной антенны в течение всего времени прохождения спутником зоны радиовидимости данного пункта приема. Целеуказания для слежения за спутником рассчитываются заранее на основе прогностических эфемерид спутника, сообщаемых регулярно в телеграммах.

Кодовые формы для передачи эфемерид МСЗ

Заблаговременно на все пункты приема спутниковой информации рассылаются специальные телеграммы с данными для прогноза орбит, попадающих в зону видимости наземного пункта, расчета целеуказаний по слежению за спутником, осуществления приема, временной и географической привязки спутниковой информации. Эти телеграммы представляются в виде сводки, закодированной по отечественной кодовой форме FANAS (Forecast of the Ascending Nodes for the Automatic satellites) или ПБУАС (Прогноз восходящего узла автоматических спутников), а также по получившей широкое применение американской кодовой форме

TBUS (APT* PREDICT) или Бюллетень автоматической передачи изображений для спутников, имеющих восходящий участок орбиты в ночное (TBUS 1) или дневное (TBUS 2) время суток.

A. Кодовая форма TBUS (APT PREDICT)

TBUS 2 KWBC

APT PREDICT YYGGgg

MMYYSS

PART I

0N_rN_rN_rN_r 0Y_rY_rG_rG_r 0g_rg_rs_rs_r Q_rL₀L₀I₀I₀ Tggss LL₀L₀I₀I₀

N₄N₄N₄N₄G₄ G₄g₄g₄s₄s₄ Q₄L₀L₀I₀I₀

N₈N₈N₈N₈G₈ G₈g₈g₈s₈s₈ Q₈L₀L₀I₀I₀

N₁₂N₁₂N₁₂N₁₂G₁₂ G₁₂g₁₂g₁₂s₁₂s₁₂ Q₁₂L₀L₀I₀I₀

DAY PART II

02Z₀₂Z₀₂Q₀₂ L_aL_aI_aL₀L₀I₀ 04Z₀₄Z₀₄Q₀₄ L_aL_aI_aL₀L₀I₀

06Z₀₆Z₀₆Q₀₆ L_aL_aI_aL₀L₀I₀ 08Z₀₈Z₀₈Q₀₈ L_aL_aI_aL₀L₀I₀

10Z₁₀Z₁₀Q₁₀ L_aL_aI_aL₀L₀I₀etc.

NIGHT PART II

28Z₂₈Z₂₈Q₂₈ L_aL_aI_aL₀L₀I₀ 30Z₃₀Z₃₀Q₃₀ L_aL_aI_aL₀L₀I₀

32Z₃₂Z₃₂Q₃₂ L_aL_aI_aL₀L₀I₀etc.

DAY PART III

02Z₀₂Z₀₂Q₀₂ L_aL_aI_aL₀L₀I₀ 04Z₀₄Z₀₄Q₀₄ L_aL_aI_aL₀L₀I₀

06Z₀₆Z₀₆Q₀₆ L_aL_aI_aL₀L₀I₀ 08Z₀₈Z₀₈Q₀₈ L_aL_aI_aL₀L₀I₀

10Z₁₀Z₁₀Q₁₀ L_aL_aI_aL₀L₀I₀etc.

NIGHT PART III

56Z₅₆Z₅₆Q₅₆ L_aL_aI_aL₀L₀I₀ 58Z₅₈Z₅₈Q₅₈ L_aL_aI_aL₀L₀I₀

60Z₆₀Z₆₀Q₆₀ L_aL_aI_aL₀L₀I₀etc.

*APT – Automatic Picture Transmission – автоматическая передача изображений.

PART IV

Объяснение символов кода

TVBUS 2 – Бюллетень АПТ, издаваемый в США для метеорологических ИСЗ, имеющих восходящий участок орбиты в дневное время суток.

KWBC – Позывной сигнал радиостанции Вашингтона.

APT PREDICT – Прогноз автоматической передачи изображений (содержание сводки).

YYGGgg – Дата (число YY) и время (часы GG, минуты gg по Гринвичу) передачи телеграммы.

MMYYSS – Период (месяц MM, число YY) действия прогноза, название и номер (SS) спутника на мерной орбите.

PART I – Данные о периоде обращения и инкременте долготы (часть I) МСЗ, восходящем узле (долгота и время) спутника на мерной орбите.

0 – отличительный знак, указывающий что далее следует информация о пересечении экватора спутником на мерной (первой для данного периода) орбите.

$N_r N_r N_r N_r$ – Номер мерной орбиты.

$O Y_r Y_r G_r G_r$ – Отличительный знак (O), число ($Y_r Y_r$) и часы ($G_r G_r$) по Гринвичу.

$O g_r g_r s_r s_r$ – Отличительный знак (O), минуты ($g_r g_r$) и секунды ($s_r s_r$), когда спутник пересекает экватор в северном направлении на мерной орбите $N_r N_r N_r N_r$.

$Q_r L_0 L_0 I_0 I_0$ – Октант (Q_r) и долгота ($L_0 L_0$) с точностью до сотых долей градуса ($I_0 I_0$), на которой спутник пересекает экватор в северном направлении на мерной орбите. Сообщается тот октант, куда движется спутник, согласно коду ВМО 3300:

Северное полушарие		Южное полушарие	
цифра кода	долгота, град	цифра кода	долгота, град
0	0–90 з.д.	5	0–90 з.д.
1	90–180 з.д.	6	90–180 з.д.
2	180–90 в.д.	7	180–90 в.д.
3	90–0 в.д.	8	90–0 в.д.

Tggs – отличительный знак (Т) того, что далее следует период обращения, то есть интервал между последовательными пересечениями спутником экватора в минутах (gg) и секундах (ss). Целые сотни минут при кодировании отбрасываются.

LL₀L₀I₀I₀ – Отличительный знак (L) указывает, что в этой группе сообщается приращение (инкремент) долготы в градусах (L₀L₀) с сотыми долями (I₀I₀) между последовательными пересечениями спутником экватора.

N₄N₄N₄N₄G₄ G₄g₄g₄s₄s₄ – Данные о времени восходящего узла четвертой орбиты, следующей за мерной.

N₄N₄N₄N₄G₄ – Номер четвертой орбиты, следующей за мерной орбитой.

G₄g₄g₄s₄s₄ – Часы (G₄G₄), минуты (g₄g₄) и секунды (s₄s₄) по гринвичскому времени пересечения спутником экватора в северном направлении на четвертой (после мерной) орбите.

Q₄L₀L₀I₀I₀ – Октант (Q₄) и долгота (L₀L₀) с точностью до сотых долей (I₀I₀) градуса, на которой спутник пересекает экватор в северном направлении на четвертой (после мерной) орбите. Цифра сотен градусов долготы опускается при кодировании.

N₈N₈N₈N₈G₈ G₈g₈g₈s₈s₈ Q₈L₀L₀I₀I₀ – Номер (N₈N₈N₈N₈) восьмой орбиты, следующей за мерной; время (G₈G₈g₈g₈s₈s₈), октант (Q₈) и долгота (L₀L₀I₀I₀) восходящего узла этой орбиты. Кодированы, как и для четвертой орбиты после мерной.

N₁₂N₁₂N₁₂N₁₂G₁₂ G₁₂g₁₂g₁₂s₁₂s₁₂ Q₁₂L₀L₀I₀I₀ – Номер (N₁₂N₁₂N₁₂N₁₂) двенадцатой орбиты, следующей за мерной; время, октант и долгота восходящего узла этой орбиты. Кодированы, как и для четвертой орбиты после мерной.

DAY PART II – Высота спутника и координаты подспутниковой точки на дневной (день, часть II) стороне Земли в Северном полушарии через двухминутные интервалы, следующие после момента пересечения спутником экватора.

02Z₀₂Z₀₂Q₀₂ – Вторая минута от экватора (02); высота (Z₀₂Z₀₂) спутника в десятках километров (цифра тысяч километров опускается); октант (Q₀₂), в котором находится подспутниковая точка на второй минуте от экватора.

L_aL_aI_aL₀L₀I₀ – Целые (L_aL_a) и десятые доли (I_a) градуса широты; целые градусы (L₀L₀) и их десятые доли (I₀) долготы, то есть координаты подспутниковой точки на этой минуте.

10Z₁₀Z₁₀Q₁₀ L_aL_aI_aL₀L₀I₀ – Для десятой минуты (10) полета спутника к северу от экватора сообщаются высота (Z₁₀Z₁₀), октант (Q₁₀), широта (L_aL_aI_a) и долгота (L₀L₀I₀) подспутниковой точки. Кодированы, как и для второй минуты полета МСЗ.

NIGHT PART II – Высота спутника и координаты подспутниковой точки на ночной (ночь, часть II) стороне Земли в Северном полушарии через двухминутные интервалы, следующие после пересечения экватора.

28Z₂₈Z₂₈Q₂₈ L_aL_aI_aL₀L₀I₀ – Для 28-й минуты полета спутника к северу от экватора сообщаются высота (Z₂₈Z₂₈), октант (Q₂₈), широта (L_aL_aI_a) и долгота (L₀L₀I₀) подспутниковой точки. Кодированы, как и в части II, день.

PART III – Высота спутника и координаты подспутниковой точки на дневной (DAY) или ночной (NIGHT) стороне Земли в Южном полушарии через двухминутные интервалы, следующие после момента пересечения спутником экватора. Кодированы, как и в части II (день и ночь).

PART IV – Сообщаются дополнительные данные об элементах орбиты, радиочастотах передач информации, номерах каналов бортовой аппаратуры, работающей в режиме АПТ, и при необходимости словесные группы.

Б. Кодовая форма FANAS

В одной телеграмме этой формы могут передаваться данные как об одном, так и о нескольких отечественных и зарубежных МСЗ. Кодовая форма состоит из пяти разделов. В начале каждого

раздела указываются название страны, запустившей спутник, и наименование того спутника, для которого передаются данные соответствующего раздела:

Номер раздела	Содержание
1	Данные о периоде обращения МСЗ и инкременте долготы. Ежедневные данные о восходящем узле (времени пересечения экватора и долготы восходящего узла)
2	Данные о режиме работы бортовой метеорологической аппаратуры, радиочастоте передачи и возможном ее изменении
3	Данные о времени пересечения спутником заданных географических широт в Северном и Южном полушариях на восходящих и нисходящих участках орбиты
4	Информация по особенностям раскодирования содержания телеграммы. Передается по запросу
5	Орбитальные данные мерной орбиты на первые сутки периода действия телеграммы: широта и долгота подспутниковой точки для каждой четной минуты (от экватора) и высота спутника в этих точках. Нерегулярные сообщения о работе бортовой аппаратуры МСЗ, рекомендации, запросы, расписание передач информации с геостационарных спутников и очередной телеграммы FANAS

FANAS OMMJJ

Раздел 1. 11L_sS_sS_s T_sg_Tg_Ts_gs_g s_gs_gs_gs_gs_g L_TL_oL_oII IIII
 Y_oY_oG_rG_r0 g_fg_fs_fs_f0 QL_oL_oII Y_oY_oG_IG_I0 g_ig_is_is_i0
 QL_oL_oII Y_eY_eG_rG_r0 g_fg_fs_fs_f0 QL_oL_oII

Раздел 2. 22L_sS_sS_s
 и словесные группы

Раздел 3. 33L_sS_sS_s
 9H_bP_rL_aL_a g_Lg_Lg_Ls_Ls_L 9H_bP_rL_aL_a g_Lg_Lg_Ls_Ls_L

Раздел 4. (44L_s00)

Раздел 5. 55L_sS_sS_s
 g_Fg_Fs_Hs_Hs_Hs_H s_HL_aL_aII QL_oL_oII g_Fg_Fs_Hs_Hs_Hs_H
 s_HL_aL_aII QL_oL_oL_oL_o

и словесные группы

OMMJJ

Содержание отдельных разделов и групп кода

FANAS – Название кода, в котором дается прогноз местоположения спутника.

OMMJJ – Отличительная цифра (O), месяц (MM) и год (JJ) периода действия прогноза.

Раздел 1. 11L_sS_sS_s – Отличительные цифры (11); страна, запустившая спутник (L_s); название (номер, серия) спутника (S_sS_s). Кодировается по специальным таблицам.

T_sg_τg_τs_gs_g s_gs_gs_gs_gs_g – Данные о драконическом периоде* обращения ИСЗ: отличительная цифра (T_s), целые минуты (g_τg_τ), цифра сотен опускается, доли минуты с точностью до 0,0000001 (s_gs_gs_gs_gs_gs_g).

L_τL_oL_oΠ III – Сведения об инкременте долготы: отличительный знак (L_τ), целые градусы (L_oL_o), доли градуса с точностью до 0,0000001 (Π III).

Y_oY_oG_fG_fθ g_fg_fs_fs_fθ – Данные о времени пересечения спутником экватора для первого спутникового витка нечетного числа месяца (Y_oY_o); время восходящего узла в часах (G_fG_f), минутах (g_fg_f), секундах (s_fs_f) по гринвическому времени; отличительная цифра (θ).

QL_oL_oΠ – Долгота восходящего узла для первого суточного витка нечетного числа месяца: октант (Q), целые градусы (L_oL_o) и сотые доли градуса (Π). Цифра сотен опускается.

Y_oY_oG_fG_fθ g_fg_fs_fs_fθ – Данные о времени пересечения спутником экватора и долготы QL_oL_oΠ восходящего узла для последнего суточного витка нечетного числа месяца. Кодировается так же, как и для первого суточного витка нечетного числа месяца.

* Драконический период – промежуток времени между двумя последовательными прохождениями спутника через восходящий узел его орбиты на экваторе.

$Y_e Y_e G_f G_f 0$ $g_f g_f s_f s_f 0$ – Время пересечения спутником экватора и долгота $Q L_0 L_0$ II восходящего узла первого суточного витка четного числа месяца. Кодирован так же, как и для первого суточного витка нечетного числа месяца.

Раздел 2. $22 L_s S_s S_s$ – Отличительные цифры (22); страна запустившая спутник (L_s), название ($S_s S_s$) спутника. Кодирован так же, как и в разделе 1 кода.

Словесные группы – Сведения о режиме включения аппаратуры, радиочастоте передачи информации в режиме непосредственной передачи (НП) и о смене частоты радиопередачи. Время начала и конца работы аппаратуры в минутах после пересечения спутником экватора на восходящем узле на период в несколько дней, а для солнечно-синхронных ИСЗ – на середину месяца. Даты возможного изменения частоты передачи информации указываются в числах месяца.

Раздел 3. $33 L_s S_s S_s$ – Отличительные цифры (33), страна, запустившая спутник (L_s) и название ($S_s S_s$) спутника. Кодирован так же, как и в разделе 1 кода.

$9 H_b P_r L_a L_a$ – Информация о заданной географической широте: отличительная цифра (9), полушарие (H_b) Земли, кодируется Северное полушарие цифрой 1, Южное полушарие – цифрой 2; участок орбиты (P_r), кодируется цифрой 1 восходящий участок, а цифрой 2 – нисходящий участок; заданная географическая широта ($L_a L_a$) в целых градусах.

$g_L g_L g_L s_L s_L$ – Время пересечения спутником заданной географической широты. Отсчет времени (минуты $g_L g_L g_L$ и секунды $s_L s_L$) ведется от момента пересечения экватора на восходящем участке орбиты.

Раздел 4. $(44 L_s 00)$ – Передаваемая по запросу информация о раскодировании кода: отличительные цифры раздела (44); страна, запустившая спутник (L_s); отличительные цифры (00) словесных сообщений.

Раздел 5. $55 L_s S_s S_s$ – Отличительные цифры (55) данных о мерной орбите: страна, запустившая спутник (L_s), название спутника ($S_s S_s$). Кодирован так же, как и в разделе 1 кода.

g_Fg_FS_HS_HS_HS_H S_HL_aL_aII QL_oL_oII – Координаты подспутниковых точек для каждой четной минуты (g_Fg_F) полета ИСЗ: высота (S_HS_HS_HS_H) спутника над поверхностью Земли в целых и десятых долях километров (цифра тысяч опускается); целые градусы (L_aL_a) и сотые доли (II) градуса широты подспутниковой точки; октант (Q) земного шара, в котором находится подспутниковая точка; целые градусы (L_oL_o) и сотые доли (II) градуса долготы подспутниковой точки (цифра сотен градусов опускается).

Словесные группы – Данные о работе бортового комплекса ИСЗ, изменениях режима его работы, рекомендации, запросы, сеансы передач с геостационарных ИСЗ.

ОММJJ – Указания, подтверждающие период действия прогноза. Кодировается, как и в начале настоящих пояснений кода.

В какой бы кодовой форме* не была составлена телеграмма, специалист-гидрометеоролог должен понять ее содержание, уметь правильно раскодировать, а полученные результаты использовать для расчета целеуказаний по слежению за спутником в зоне радиовидимости пункта приема информации.

Пример телеграммы в кодовой форме FANAS

FANAS 00579

11201 T0209 59717 J2552 32349 =

01000 08520 05538 01230 08540 04040 02010 03540 06915 =

11304 T0232 94232 J2572 17006 =

01000 41530 22717 01230 00280 25072 02000 43260 22484 =
22201

ТВ С 82 МИН ДО 32 МИН =

ПЕРЕДАЧА АПТ НА ЧАСТОТЕ 137,5 МГЦ =
22304

ТВ С 82 МИН ДО 28 МИН 1–5 МАЯ =

ПЕРЕДАЧА НП НА ЧАСТОТЕ 137,3 МГЦ =
33201

* Кодовые формы для передачи орбитальных данных спутников совершенствуются и в оперативной практике могут иметь различные названия (например, кодовая форма «Орбита» в России).

91110 00251 91120 00603 91130 00914 91140 01253 91150 01638 =
33304
91170 02034 91270 03057 91260 03402 91250 03700 91240 03955 =
55201
02860 60704 00512 04861 31404 00681 06862 92105 00852 =
55221
1200 – 1245 2200 – 2300 =
55223
0735 – 0815 0900 – 0945 =
55304
02895 20694 07443 04894 21388 07381 06893 72082 07314 =
НАШ ТЕЛЕФОН: 2521571, ТЕЛЕГРАФНЫЙ: МОСКВА
ГОСГИМЕТ =
РЕГУЛЯРНЫЙ ПРОГНОЗ ПВУАС ПО ОТЕЧЕСТВЕННЫМ ИСЗ
ВЫСЫЛАЕТСЯ ПО ВТОРНИКАМ В 0945 ГМТ =
00579 =

**Пример расшифровки текста телеграммы
в кодовой форме FANAS**

1. Группы ПВУАС 00579
 - 1.1. ПВУАС – название кодовой формы.
 - 1.2. Период действия телеграммы ПВУАС – май 1979 г.
2. Группы 11201 T0209 59717 L2552 32349.
 - 2.1. Начало раздела 1 (11), спутник США (2) «Тайрос Н» (1) имеет период обращения (Т) 102,095717 мин и инкремент долготы (Л) 25,5232349°.
 - 2.2. Группы 01000 08520 05538 раскодируются: на первом суточном витке 1 мая (нечетного числа месяца) спутник пересекает экватор на восходящем узле в 00 ч 08 мин 52 с по Гринвичу (T_3), в нулевом октанте на 55,38° з.д.
 - 2.3. Группы 01230 08540 04040 раскодируются: на последнем суточном витке 1 мая (нечетного числа месяца) спутник пересекает экватор в 23 ч 08 мин 54 с по Гринвичу, в нулевом октанте на 40,40° з.д.
 - 2.4. Группы 02010 03540 06915 раскодируются: на первом суточном витке 2 мая (четного числа месяца) спутник пересекает экватор в 01 ч 03 мин 54 с по Гринвичу, в нулевом октанте на 69,15° з.д.

3. Группы 11304 T0232 94232 J2572 17006.

3.1. Раздел 1(11), спутник СССР (3), «Метеор-2» (4) имеет период обращения (T) 102,3294232 мин и инкремент долготы (J) – 25,7217006°.

3.2. Группы 01000 41530 22717 раскодируются: на первом суточном витке 1 мая (нечетного числа месяца) спутник пересекает экватор в 00 ч 41 мин 53 с по Гринвичу, во втором октанте на 127,17° в.д.

3.3. Группы 01230 00280 25072 раскодируются: на последнем суточном витке 1 мая (нечетного числа месяца) спутник пересекает экватор 23 ч 00 мин 28 с по Гринвичу, во втором октанте на 150,72° в.д.

3.4. Группы 02000 43260 22484 раскодируются: на первом суточном витке 2 мая (четного числа месяца) спутник пересекает экватор в 00 ч 43 мин 26 с по Гринвичу, во втором октанте на 124,84° в.д.

4. Группа 22201 раскодируется: начало раздела 2(22), спутник США(2), «Тайрос Н» (1).

4.1. Буквенно-цифровой текст: «ТВ с 82 мин до 32 мин» обозначает, что аппаратура в видимом участке спектра работает с 82 мин полета после пересечения экватора спутником на предыдущем витке до 32 мин полета спутника после пересечения им экватора на последующем витке.

4.2. Текст: «Передача АПТ на частоте 137,5 МГц» обозначает, что информация в режиме АПТ передается на частоте 137,5 МГц.

5. Группа 22304 раскодируется: начало раздела 2(22), спутник СССР (3) «Метеор-2» (4).

5.1. Буквенно-цифровой текст: «ТВ с 82 до 28 мин 1–5 мая» означает, что аппаратура в видимом участке спектра работает с 82 до 28 мин полета спутника от экватора в период с 1 по 5 мая.

5.2. Текст: «Передача НП на частоте 137,3 МГц» соответствует по смыслу п. 4.2.

6. Группа 33201: начало раздела 3(33) соответствует по смыслу п. 4.

- 6.1. Группы 91110 00251 раскодируются: спутник «Тайрос Н» (1) в Северном полушарии на восходящем участке орбиты пересекает географическую широту 10° через 2 мин 51 с полета от экватора.
- 6.2. Группы 91120 00603 91130 00914 91140 01253 91150 01638 раскодируются, как и в п. 6.1.
7. Группа 33304: начало раздела 3(33), соответствует по смыслу п.5.
- 7.1. Группы 91170 02034 раскодируются: спутник «Метеор-2» (4) в Северном полушарии на восходящем участке орбиты пересекает географическую широту 70° через 20 мин 34 с полета от экватора.
- 7.2. Последние две группы в строке раздела 3, то есть 91240 03955, раскодируются: спутник «Метеор-2» (4) в Северном полушарии на нисходящем участке орбиты пересекает географическую широту 40° через 39 мин 55 с полета от экватора.
8. Группа 55201: начало раздела 5(55), соответствует п.4.
- 8.1. Группы 02860 60704 00512 раскодируются: спутник «Тайрос Н»(1) на второй минуте полета к северу от экватора находится на высоте 860,6 км в точке с координатами $7,04^\circ$ с.ш. и $5,12^\circ$ з.д.
- 8.2. Группы 04861 31404 00681 и 06862 92105 00852 раскодируются, как и в п. 8.1.
- 8.3. Группы 55221 1200–1245 2200–2300 и 55223 0735–0815 0900–0945 раскодируются: спутник «АТС-1»(21) ведет передачи с 12 ч 00 мин до 12 ч 45 мин и с 22 ч 00 мин до 23 ч 00 мин по Гринвичу, а спутник «АТС-3»(23) – с 7 ч 35 мин до 8 ч 15 мин и с 9 ч 00 мин до 9 ч 45 мин по Гринвичу.
- 8.4. Группы 55304 02895 20694 07443 раскодируются: спутник «Метеор-2» (4) на второй минуте полета к северу от экватора находится на высоте 895,2 км в точке с координатами $6,94^\circ$ с.ш. и $74,43^\circ$ з.д.
- 8.5. Группы 04894 21388 07381 06893 72082 07314 раскодируются, как и в п. 8.4.
9. Группа 00579 – подтверждение периода действия телеграммы ПВУАС – май 1979 г.

Примечание. В телеграмме время и долгота восходящего узла даны не для всех витков. Для витков, не указанных в теле-

грамме, но проходящих в зоне видимости пункта приема информации, эти параметры могут быть легко вычислены по известному периоду обращения и долготному приращению (инкременту) между витками.

Контрольные вопросы

1. Что называют эфемеридами искусственных спутников Земли?
2. Для чего предназначаются телеграммы с данными эфемерид ИСЗ?
3. Расскажите об октантах земного шара. Как они используются при кодировании телеграмм с эфемеридами спутников Земли?
4. Охарактеризуйте часть 1 (Part I) кода TBUS (APT PREDICT).
5. Почему в телеграммах сообщается только долгота восходящего узла орбиты спутника?
6. Что называют периодом обращения ИСЗ? Расскажите об особенностях кодирования величины периода обращения спутника.
7. Поясните понятие приращения (инкремента) долготы восходящего узла орбиты спутника.
8. С какой целью группы NNNNG, Gggss и QL₀L₀I₀I₀ сообщаются в телеграммах для нулевого, четвертого, восьмого и двенадцатого витков ИСЗ?
9. Расскажите о содержании части 2 (Part II) кода TBUS (APT PREDICT).
10. С каким временным интервалом передаются в телеграммах координаты подспутниковых точек?
11. Охарактеризуйте основные разделы кодовой формы FANAS.
12. Чем отличается кодовая форма FANAS от кода TBUS (APT PREDICT)?

Материалы для работы

1. Бланк географической карты (см. приложение 2).
2. Телеграммы с орбитальными данными метеорологических спутников Земли.

Вариант 1. TBUS 1 KWBC 121 900

APT PREDICT

081535 NOAA 10

Part I

09927 01521 00117 02108 T0116 L2532

99310 34624 12235

99351 03131 23635

99391 71638 33507

Part II

02810 070227 04810 141243 06810 212260 08810 283278

10810 353298 12810 423321 14810 493348 16810 562382

18810 630429 20810 696502 22810 757632 24821 803903

26821 809354 28821 769673 30822 710775 32822 645694

34822 577642 36822 508606 38822 439577 40822 369554

42822 299533 44822 229515 46822 158498 48822 087481

50822 017466

Вариант 2. TBUS 1 KWBC 111 900

APT PREDICT

081435 NOAA 10

Part I

09912 01419 04205 00128 T0116 L2531

99160 22712 10256

99200 91219 25615

99241 55726 35487

Part II

02810 070028 04810 141044 06810 212061 08810 282079

10810 353099 12810 423122 14810 493149 16810 562184

18810 630231 20810 696303 22810 757433 24820 803704

26821 809156 28821 769474 30821 710625 32821 645707

34821 577758 36821 508795 38812 439776 40812 369752

42812 299732 44812 229713 46822 158696 48822 087680

50822 017664

Вариант 3. TBUS 2 KWBC 281900

APT PREDICT

073134 NOAA 9

Part I

08724 03117 02710 02220 T0203 L2551

87280 01526 12425

87320 70342 23368

87361 35159 33161

Part II

02860 069239 04860 139255 06860 209273 08850 279291

10850 349311 12850 418335 14850 487362 16850 555397

18850 622444 20850 687515 22850 748637 24850 795882

26851 807303 28851 773641 30852 717790 32852 653700

34852 587644 36852 519604 38842 450573 40842 381548

42842 311527 44842 241507 46842 171490 48842 101473

50842 031456

Вариант 4. TBUS 1 KWBC 301900

APT PREDICT

080235 NOAA 10

Part I

09742 00220 04431 01687 T0116 L2532

97460 32939 11815

97501 01446 24056

97541 65953 33928

Part II

02810 070186 04810 141202 06810 212219 08810 282237

10810 352257 12810 422280 14810 492307 16810 561341

18810 629388 20810 695460 22810 756589 24810 803858

26811 809309 28811 769630 30811 710783 32812 645735

34812 578683 36812 509646 38812 439618 40812 369594
42812 299574 44812 228555 46812 158538 48812 087522
50812 016506

Вариант 5. TBUS 1 KWBC 131900

APT PREDICT

081635 NOAA 10

Part I

09941 01620 03911 01556 T0116 L2531

99450 32418 11683

99491 00925 24187

99531 65433 34059

Part II

02810 070172 04810 141188 06810 212205 08810 283223

10810 353243 12810 423265 14810 493293 16810 562327

18810 630374 20810 696447 22810 757577 24820 803848

26821 809299 28821 769618 30821 710769 32822 645749

34822 577697 36822 508661 38822 439632 40822 369609

42822 299588 44822 229570 46822 158553 48822 088537

50822 017521

Вариант 6. TBUS 1 KWBC 101900

APT PREDICT

081335 NOAA 10

Part I

09898 01320 00410 00680 T0116 L2531

99020 24917 10808

99060 93424 25063

99101 61932 34935

Part II

02810 070085 04810 141101 06810 212118 08810 282136

10810 353155 12810 423178 14810 493205 16810 562240

18810 630287 20810 696360 22810 757480 24810 803760

26821 809212 28821 769531 30821 710682 32821 645763

34822 577785 36812 508748 38812 439719 40812 369696

42812 299675 44812 228657 46822 158640 48822 087624

50822 017608

Вариант 7. TBUS 1 KWBC 081900

APT PREDICT

081135 NOAA 10

Part I

09870 01120 04821 01784 T0116 L2532

98740 33328 11912

98781 01835 23959

98821 70342 33831

Part II

02810 070195 04810 141211 06810 212228 08810 282246
10810 353266 12810 423289 14810 493316 16810 562350
18810 630398 20810 695470 22810 756599 24810 803870
26811 809322 28821 769641 30821 710792 32812 645725
34812 577674 36812 508637 38812 439609 40812 369585
42812 299565 44812 228546 46812 158529 48822 087513
50822 017497

Вариант 8. TBUS 1 KWBC 281900

APT PREDICT

073135 NOAA 10

Part I

09713 03119 04724 00259 T0116 L2531

97170 23231 10387

97210 91739 25484

97251 60246 35356

Part II

02810 070042 04810 141058 06810 211075 08810 282093
10810 352113 12810 422135 14810 492163 16810 561197
18810 629244 20810 695316 22810 756444 24810 803713
26811 809164 28811 769486 30811 710638 32811 645720
34811 578772 36812 509791 38812 439762 40812 369738
42812 299718 44812 229700 46812 158683 48812 087666
50812 016650

Вариант 9. TBUS 2 KWBC 301900

APT PREDICT

080234 NOAA 9

Part I

08752 00217 00503 01661 T0203 L2551

87562 35319 11867

87600 64135 23926

87641 32952 33720

Part II

02860 069182 04860 139198 06850 209216 08850 279234
10850 349255 12850 418278 14850 487305 16850 555340
18850 622387 20850 687458 22850 748581 24850 795826
26851 807247 28851 773584 30851 717752 32852 653757
34852 587700 36852 519661 38842 450630 40842 380605
42842 311584 44842 241564 46842 171546 48842 101530
50842 030513

Вариант 10. TBUS 2 KWBC 291900

APT PREDICT

080134 NOAA 9

Part I

08738 00117 01607 01940 T0203 L2551

87420 00423 12146

87460 65239 23647

87501 34055 33441

Part II

02860 069211 04860 139227 06850 209245 08850 279263

10850 349284 12850 418307 14850 487334 16850 555369

18850 622416 20850 687487 22850 748609 24850 795855

26851 807276 28851 773613 30851 717781 32852 653726

34852 587671 36852 519632 38842 450601 40842 381576

42842 311555 44842 241535 46842 171517 48842 101501

50842 030484

Рекомендуемая литература

1. *Говердовский В.Ф.* Космическая метеорология. Ч. I. Спутниковая метеорология. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009.
2. Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды / Под ред. И.П. Ветлова, Н.Ф. Вельтищева. – Л.: Гидрометеоздат, 1982.

Порядок выполнения работы

1. В начале работы, под руководством преподавателя, на примере телеграммы в кодовой форме FANAS и ее декодирования ознакомиться с общими принципами кодирования информации и особенностями построения специальных кодов, используемых для передачи эфемерид, рассчитываемых регулярно для каждого космического объекта.

2. Вместе с преподавателем разобрать порядок кодирования данных кодом TBUS (APT PREDICT).

3. Самостоятельно декодировать текст телеграммы в кодовой форме TBUS одного из вариантов, указанного преподавателем.

4. Представить результаты декодирования телеграммы в табличной форме, рекомендуемой в методических указаниях по выполнению лабораторной работы.

Методические указания

1. Раскодировать часть I (Part I) телеграммы и данные представить в виде таблицы (пример):

Номер орбиты	Число месяца	Время пересечения* экватора, мск	Долгота восходящего угла, град	Период обращения	Долготное приращение, град
0073	16	13 ч 01 мин 41 с	123,74 в.д.	114 мин 53с	28,71
0077		20 ч 41 мин 14 с	12,90 в.д.		
...			

Примечания: 1. От гринвичского времени, указанного в телеграмме, следует переходить к московскому (декретному или сезонному) времени;
2. При раскодировании сведений об октантах необходимо воспользоваться кодом ВМО 3300.

2. Раскодировать часть 2 (Part II) телеграммы и данные представить в таблице вида (пример):

Минуты после пересечения экватора	Высота полета спутника, км	Октант	Широта, град.	Долгота, град.
02	810	0	7,0	22,7
04	810	0	14,1	24,3
...
50	820	2	101,7	46,6

3. Результаты раскодирования телеграммы использовать при выполнении лабораторной работы 9, для чего на кальке (ксерокопии) карты Северного полушария (приложение 2) построить проекцию исходной (мерной) орбиты МСЗ.

Мерной (базисной, опорной) считают орбиту, сведения о которой сообщаются в первой строке части 1 телеграммы в кодовой форме TBUS (APT PREDICT). Мягким (простым черным) карандашом на экваторе карты отмечают точку восходящего узла этой орбиты (по ее долготы, сообщаемой в четвертой группе первой строки части 1 телеграммы). Затем на этой же карте Северного полушария отмечают остальные подспутниковые точки орбиты по их географическим координатам (широте и долготы), сообщаемым в части 2 телеграммы кодовой формы TBUS (APT PREDICT). Возле каждой точки цифрами (02, 04, ..., 50) указывают интервал времени, прошедшего с момента пересечения спутником экватора в восходящем узле. Все нанесенные на карту точки соединяют плавной линией – кривой второго порядка, которая отображает проекцию мерной орбиты спутника на земной поверхности в указанный в телеграмме прогностический срок (месяц, число и время полета над Северным полушарием Земли).

Лабораторная работа 8

Расчет зоны радиовидимости пункта приема информации и построение диаграммы для слежения за метеорологическим спутником Земли

Цель работы: научиться правильно определять зону радиовидимости пункта приема информации и строить диаграмму для слежения за метеорологическим спутником Земли (МСЗ).

В практике оперативного метеорологического обеспечения прием визуализированной формы информации – космических снимков от спутниковой аппаратуры, работающей в режиме непосредственной передачи, – осуществляется либо автономными пунктами приема информации (АПШИ), либо персональными станциями приема данных дистанционного зондирования Земли.

Персональными принято называть станции приема и первичной обработки данных спутниковых наблюдений, представляющих собой комплексы аппаратуры (например, «Лиана», «Селена», «Сюжет», «СканЭкс» и др.), которые не требуют специального обслуживания и сопровождения в текущей работе, ориентированы на использование персональных компьютеров и могут эффективно эксплуатироваться одним оператором.

Режим непосредственной передачи информации позволяет получать на Земле космические снимки облачности и естественных объектов подстилающей поверхности, попадающих в поле зрения аппаратуры МСЗ во время его пролета над определенной территорией, в зоне радиовидимости пункта приема информации.

Зона видимости спутника и диаграмма для слежения за ним

Зона видимости. В общем случае зоной видимости спутника называют часть земной поверхности (рис. 49), из любой точки которой в конкретный момент времени можно провести прямую, соединяющую эту точку с точкой, где находится спутник, и при этом не пересекающую земной сфероид, то есть при наблюдении, так сказать, «оптической», визуальной видимости. Иначе говоря, эта

зона определяется поверхностью земного сферического сегмента, географические координаты которого (широта B_N и долгота L_N) удовлетворяют условию:

$$\sin L_N \sin L_{пт} + \cos L_N \cos L_{пт} \cos(B_N - B_{пт}) \geq \frac{R_3}{H}, \quad (8.1)$$

где R_3 – радиус земной сферы; H – расстояние спутника от центра земной сферы ($H = OD$ на рис. 49); $B_{пт}$ и $L_{пт}$ – географические координаты (широта и долгота) так называемой «подспутниковой точки» (п.т.), то есть точки пересечения земной сферы с прямой OD (вертикалью к центру Земли).

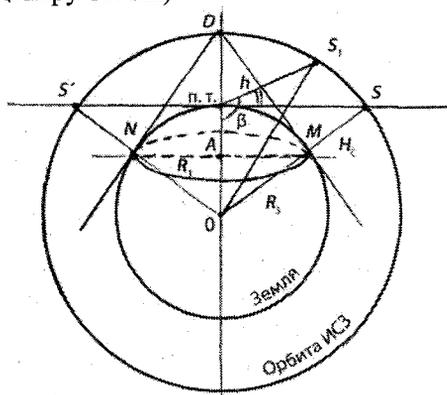


Рис. 49. Зона видимости искусственного спутника Земли

Радиус R_1 окружности, ограничивающей зону видимости ($R_1 = AN$), определяется соотношением:

$$R_1 = R_3 \sqrt{H^2 - R_3^2} / H. \quad (8.2)$$

Во время сеанса связи для получения неискаженного сигнала антенна АППИ должна быть направлена на спутник, то есть прием информации от МСЗ, работающего в режиме непосредственной передачи, осуществляется в зоне радиовидимости пункта приема информации, которая определяется как геометрическое место точек (практически – окружность) пересечения поверхности земного сфероида с образующей (линия OS или OS' на рис. 49) геоцентрического конуса, характеризующих моменты выхода спутника на местный горизонт пункта приема со всех возможных направлений.

В зависимости от вида орбиты зона видимости МСЗ может оставаться неизменной относительно географических ориентиров на земной поверхности (для геостационарного спутника, например) либо смещаться относительно этих ориентиров (например, для низкоорбитальных спутников на солнечно-синхронных орбитах). В последнем случае наблюдается выход географических земных пунктов (с их зоной радиовидимости) из зоны видимости данного спутника (принято говорить, что ИСЗ находится вне зоны радиовидимости того или иного пункта или выходит из нее).

В случае сеанса связи между спутником и земным пунктом чаще всего имеют в виду зону взаимной видимости, то есть зону определенного радиуса (например, R_1 на рис. 49) вокруг данного АППИ, в пределах которой должен находиться МСЗ, для того чтобы между ним и пунктом приема на Земле была **прямая** видимость. Радиус такой зоны определяется высотой орбиты спутника.

Количество витков спутника, проходящих в зоне радиовидимости определенного пункта приема информации, зависит от его географической широты: чем ближе к полюсу находится пункт приема, тем с большего количества спутниковых витков (орбит) можно принимать информацию.

Направленность антенны приемной наземной станции определяется, как известно, зависимостью интенсивности принимаемого сигнала от направления его распространения (от направления на спутник), географическое отображение которой называют диаграммой (греч. *diagramma* – фигура, рисунок) направленности антенны.

Диаграммой направленности антенны называют графическую характеристику (обычно в полярных координатах) способности антенны принимать (или излучать) радиоволны в разных направлениях.

Для ненаправленной антенны полярная диаграмма направленности – окружность, а для направленной имеет сложный многолепестковый вид (рис. 50). Лепесток с наибольшим максимумом называется главным, а остальные – боковыми.

Диаграмма направленности обычно характеризуется шириной, определяемой углом между двумя прямыми, пересекающими главный лепесток по полю на уровне 0,707 от максимального. Диаграммы направленности различают по полю, когда на ней отображается напряженность поля электромагнитных колебаний, и по

мощности, если отображается плотность потока энергии, измеряемые на одном и том же расстоянии от антенны. В зависимости от технических особенностей радиоаппаратуры ширина диаграммы направленности может колебаться в пределах 30–50°.

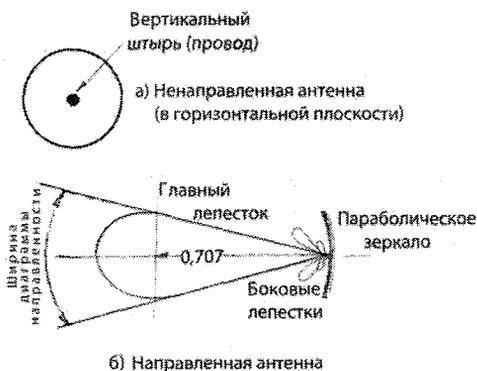


Рис. 50. Диаграммы направленности антенны

Направленные антенны позволяют определить пространственное положение источника радиоизлучения – метеорологического спутника Земли. Для определения угловых координат в той или иной плоскости (рис. 51) соответствующее «перемещение» диаграммы направленности может быть осуществлено, например, путем использования двух поочередно включаемых (запитываемых) антенных систем (в антеннах типа «волновой канал») или за счет смещения облучателя относительно фокуса рефлектора (в «зеркальных» антеннах). Направление OO' , которому соответствует равенство сигналов цели при двух положениях антенны (см. рис. 51), называется равносигнальным. Метод сравнения, или равносигнальный метод, обеспечивает возможность не только автоматического измерения угловых координат МСЗ, но и процесса его сопровождения (слежение за ним) по угловым координатам при плавном перемещении антенны в пространстве равносигнального направления. Следовательно, для слежения за спутником требуется априорная информация (целеуказания) о пространственном его положении, включающая момент времени входа (и выхода) МСЗ в зону (из зоны) радиовидимости АППИ, азимут и угловую высоту (угол места) над плоскостью горизонта для всего периода

нахождения спутника (через определенные интервалы времени) в зоне радиовидимости наземного пункта приема информации.

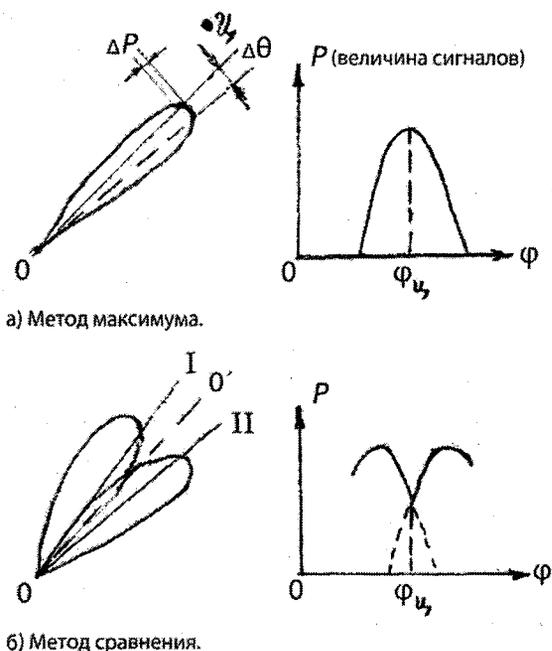


Рис. 51. К измерению угловых координат аэрокосмических объектов

Начало и конец сеанса связи со спутником определяются моментами времени пересечения границы зоны радиовидимости АППИ проекцией орбиты МСЗ. Участки орбиты, на которых спутник появляется в зоне радиовидимости пункта приема информации с юга и летит по направлению к северу, называются восходящими, участки орбиты, на которых спутник появляется в зоне радиовидимости с севера, — нисходящими.

В спутниковой метеорологии все прогностические расчеты принято производить для восходящих участков орбиты МСЗ, хотя прием информации осуществляется и на нисходящих участках орбит, проходящих через зону радиовидимости наземного пункта приема информации.

Диаграмма слежения. Расчет целеуказаний для слежения за спутником осуществляют, используя специальную диаграмму, ко-

торая состоит из двух частей: неподвижной круговой номограммы и подвижной линейки (крута).

Неподвижная круговая диаграмма для графического определения азимута и угловой высоты спутника над горизонтом в любой точке орбиты внутри зоны радиовидимости конкретного АППИ строится на бланке географической карты полярной стереографической проекции масштаба 1:30 000 000 (или 1:25 000 000).

Азимутом называют угол, заключенный между северным концом меридиана пункта наблюдения и направлением на подспутниковую точку.

Угловой высотой (углом места) называется угол, заключенный между направлением (лучом визирования) на спутник от пункта наблюдения и горизонтальной плоскостью.

Диаграмма слежения объединяет два семейства: концентрических окружностей, построение которых осуществляется от границы зоны радиовидимости в направлении её центра – АППИ (с дискретностью 10°), и радиальных линий, проходящих через пункт наблюдения, оцифровка которых производится от северного направления по часовой стрелке через каждые 10° .

Для построения границы зоны радиовидимости пункта приема информации и окружностей диаграммы слежения, по которым определяют угловые высоты спутника, рассчитываются значения геоцентрических углов по формуле:

$$q = 180^\circ - \left[\beta + \arcsin \left(\frac{R_3 \sin \beta}{R_3 + H_c} \right) \right], \quad (8.3)$$

где q – геоцентрический угол, град; R_3 – радиус Земли, км; H_c – средняя высота полета спутника, в км (определяется из телеграммы с эфемеридами МСЗ); β – угол между направлением от пункта приема информации на спутник и вертикалью (направление к центру Земли), град.

Максимальное значение геоцентрического угла q_{\max} определяет расстояние границы зоны радиовидимости АППИ от ее центра.

Семейство радиальных линий на диаграмме слежения используется для определения азимута спутника.

Подвижная линейка (или крут) изготавливается из любого прозрачного материала и закрепляется на географической карте

в своей середине таким образом, чтобы она могла вращаться вокруг полюса Земли как вокруг центра. На линейке в масштабе карты по координатам подспутниковых точек строится проекция мерной орбиты. Линейка используется для определения оптимального положения прогностической орбиты метеорологического спутника Земли, проходящей через зону радиовидимости АППИ.

В целях длительного и многоразового практического использования диаграмму слежения за спутником, построенную на бланке географической карты, и подвижную линейку (или круг) с проекцией мерной орбиты объединяют на одном планшете.

Контрольные вопросы

1. Что называют зоной видимости спутника?
2. Чем определяется зона радиовидимости пункта приема информации?
3. Поясните понятие зоны взаимной видимости МСЗ и АППИ.
4. От чего зависит количество витков спутника, проходящих в зоне радиовидимости определенного пункта приема информации?
5. Какие участки орбиты в зоне радиовидимости АППИ называются восходящими, а какие – нисходящими?
6. Что такое направленная антенна?
7. Что называют диаграммой направленности антенны?
8. Как определяется ширина диаграммы направленности антенны?
9. Чем определяются начало и конец сеанса связи АППИ со спутником?
10. Что называют азимутом спутника?
11. Что понимают под угловой высотой (углом места) спутника?
12. Поясните назначение и устройство диаграммы слежения за спутником.

Материалы для работы

1. Бланк географической карты (приложение 2).
2. Лист (размером 30×30 см, примерно) прозрачной основы (калька, пленка, целлулоид, оргстекло и т.п.) для изготовления подвижной линейки (или круга).
3. Циркуль, линейка, транспортир.
4. Калькулятор (компьютер).

Рекомендуемая литература

1. *Говердовский В.Ф.* Космическая метеорология. Часть I. Спутниковая метеорология. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009.
2. Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды / Под ред. И.П. Ветлова, Н.Ф. Вельтищева. – Л.: Гидрометеиздат, 1982.

Порядок выполнения работы

Используя результаты выполнения лабораторной работы 7 – данные декодирования телеграммы в кодовой форме TBUS (APT PREDICT) – и бланк географической карты (приложение 2) с нанесенной на ней проекцией мерной орбиты спутника, выполнить следующее:

- 1) рассчитать и построить на бланке географической карты зону радиовидимости пункта приема информации (станции слежения за спутником), указанного преподавателем;
- 2) на бланке географической карты построить в зоне радиовидимости пункта круговую номограмму диаграммы слежения за спутником;
- 3) изготовить из прозрачного материала подвижную линейку (или круг) и нанести на нее проекцию мерной орбиты спутника (в масштабе используемой географической карты), определив знаком «+» положение Северного полюса относительно этой проекции орбиты.

Методические указания

1. Расчет геоцентрических углов по формуле (8.3) производится для дискретно задаваемых значений угла β с шагом 10° в пределах от 90° до 180° , а результаты вычислений заносятся в таблицу вида:

β	90°	100°	110°	...	170°	180°
q	q_{\max}	0

2. На бланке карты стереографической проекции (приложение 2), на которой в ходе выполнения лабораторной работы 7 была нанесена проекция мерной орбиты спутника, построить границу зоны радиовидимости пункта приема информации (станции слежения за спутником), указанного преподавателем.

На географической карте от точки, соответствующей приемной станции, к северу и югу по меридиану откладываются (в масштабе карты) рассчитанные значения максимальных геоцентрических углов q_{\max} . Циркулем из точки АППИ, как из центра, провести окружность на карте радиусом, равным половине отрезка между нанесенными точками. Эта окружность – граница зоны радиовидимости, которая соответствует нулевой угловой высоте спут-

ника (спутник находится на уровне математического или истинного горизонта станции).

3. Построить круговую номограмму диаграммы слежения, для чего внутри зоны радиовидимости станции приема откладывают по меридиану, от её границы к центру, отрезки величиной 10 и 20° (в масштабе карты). Через каждую пару полученных точек проводится окружность радиусом, равным половине отрезка между соответствующими точками*. Построенные окружности диаграммы слежения служат для определения угловой высоты спутника.

Внешняя окружность диаграммы слежения (граница зоны радиовидимости) делится с помощью транспортира на десятиградусные интервалы, начиная от северного конца меридиана, проходящего через пункт приема информации, и через каждую точку деления из центра зоны (спутника) проводятся радиальные линии.

Оцифровка полученных таким образом радиальных линий производится от северного направления по часовой стрелке через каждые 10°. Семейство радиальных линий используется для определения азимута антенны (спутника).

4. Подвижная часть диаграммы слежения – линейка (или круг) – изготавливается из любого прозрачного материала в виде узкой (4–5 см), но достаточно длинной (до 30 см) полосы. Вместо линейки можно вырезать круг диаметром 25–30 см. Линейку (или круг) положить на географическую карту (приложение 2) таким образом, чтобы ее середина (или центр круга) совмещалась с Северным полюсом, а сама линейка покрывала линию проекции мерной орбиты, нанесенной на карту по результатам выполнения лабораторной работы 7. Зафиксировать полоску и скопировать на ней взаимное расположение Северного полюса (отметив его местоположение знаком «+») и проекции орбиты, на которой отмечены подспутниковые точки и соответствующие временные метки.

Полученная «линейка» должна иметь возможность вращения вокруг точки полюса карты для изменения положения проекции орбиты спутника относительно пункта приема информации в пределах его зоны радиовидимости.

* Некоторое несоответствие формы орбиты с круговой при построении диаграммы слежения за спутником не учитывается, поскольку погрешности, вызванные этими допущениями, не оказывают существенного влияния на результаты расчетов.

Лабораторная работа 9

Определение целеуказаний для слежения за спутником в зоне радиовидимости стационарного автономного пункта приема информации (АППИ)

Цель работы: научиться определять оптимальное положение прогностической орбиты МСЗ в зоне радиовидимости АППИ и целеуказания для слежения за спутником.

В зоне радиовидимости автономного пункта приема информации, расположенного в средних широтах, в сутки может проходить несколько (2–6) витков спутника. Уверенный прием информации возможен со всех витков, для которых угол места (высоты) спутника в зоне радиовидимости не менее 5° . Процесс слежения за спутником реализуется путем соответствующего поворота (сопровождения) антенны по азимуту и угловой высоте (углу места). Мерная орбита, как правило, не проходит через зону радиовидимости АППИ, поэтому прогностические расчеты сеанса связи со спутником целесообразно производить для орбиты спутника, проекция которой в интересующий период (сутки, через несколько суток) будет занимать оптимальное положение в зоне радиовидимости. Это дает возможность рассчитать целеуказания для двух – трех витков спутника, проходящих последовательно один за другим в заданный период через зону радиовидимости пункта приема информации.

Методы расчета целеуказаний для слежения за спутником

Для осуществления слежения за спутником требуется знать момент времени входа МСЗ в зону радиовидимости АППИ и момент времени выхода из нее, а также азимут и высоту спутника над плоскостью истинного горизонта для всего промежутка времени его нахождения в зоне радиовидимости. Совокупность перечисленных параметров называется целеуказаниями, а процесс их определения – вычислением целеуказаний. Другими словами, слежение за спутником осуществляется на основе сведений о его по-

ложении относительно антенны приемной станции в то время, когда МСЗ находится в ее зоне радиовидимости. Прогностическое положение проекции орбиты спутника в назначенный период должно быть оптимальным: она должна пересекать зону радиовидимости в правой (восточной) ее части, как можно ближе к границе зоны, но обеспечивая при этом длительность сеанса связи не менее 8 мин. Для решения этой задачи пункт наблюдения должен располагать эфемеридами спутника, которые регулярно рассылаются в виде специальных телеграмм.

От точности вычисления целеуказаний в значительной мере зависит качество принятой информации и ее пригодность для практического использования. Требования к точности расчета целеуказаний определяются конструктивными особенностями спутника и приемной антенны наземной станции, а также режимом работы спутниковой аппаратуры.

Различают два типа наземных комплексов приема и обработки спутниковой информации: наземный комплекс, предназначенный для приема и регистрации информации, поступающей как в режиме непосредственной передачи, так и полученной ранее в режиме запоминания ее на борту спутника, и наземный комплекс, осуществляющий только прием данных спутниковых наблюдений в режиме непосредственной передачи (АППИ или персональные станции). Основная задача последнего – прием, регистрация и первичная обработка информации обзорного типа, то есть космических изображений.

Для осуществления уверенного приема спутниковой информации необходимо, чтобы метеорологический спутник Земли находился в поле зрения направленной приемной антенны наземного комплекса в течение всего времени прохождения спутником зоны радиовидимости данного пункта приема. Целеуказания для слежения за спутником могут быть определены различными способами: аналитическим, географическим и табличным.

Аналитический метод вычисления предполагает знание пространственных координат спутника на каждый момент времени. Если обозначить через B_i широту, а через L_i – долготу подспутниковой точки для i -го момента времени, а через B_N и L_N – соответствующие географические координаты пункта наблюдения,

то геоцентрический угол q_i , определяющий на земной сфере расстояние между пунктом приема информации и подспутниковой точкой, можно вычислить по формуле:

$$q_i = \arccos \left[\sin B_i \sin B_N + \cos B_i \cos B_N \times \cos(L_i - L_N) \right]. \quad (9.1)$$

Моментом входа спутника в зону радиовидимости будет некоторый i -й момент времени, для которого справедливо соотношение:

$$q \geq q_{\max} \geq q_{i+1}, \quad (9.2)$$

причем q_{\max} – максимальное значение геоцентрического угла, определяющее границу зоны радиовидимости пункта приема информации.

Моментом выхода спутника из зоны радиовидимости будет j -й момент времени, для которого справедливо соотношение:

$$q_{j-1} \leq q_{\max} \leq q_j. \quad (9.3)$$

Определив момент времени входа и выхода спутника в зону радиовидимости наземного пункта на данном витке (то есть фактически – сеанс связи), можно вычислить азимут A_K поворота антенны и угловую высоту h_K спутника над местным горизонтом для дискретных моментов времени:

$$i \leq k \leq j.$$

Дискретность вычислений целеуказаний по времени обеспечена достаточно большой шириной диаграммы направленности приемных антенн (30–50°). Поэтому значения азимута A_K и угловой высоты h_K могут быть представлены соответствующими соотношениями:

$$q_K = \arccos \left[\sin B_K \sin B_N + \cos B_K \cos B_N \cos(L_K - L_N) \right], \quad (9.4)$$

$$A'_K = \arccos \left[\frac{\sin B_K - \cos q_K \sin B_N}{\sin q_K \cos B_N} \right], \quad (9.5)$$

$$h_K = \arctg \left[\frac{H_{cp} \cos q_K - R_3 (1 - \cos q_K)}{(H_{cp} + R_3) \sin q_K} \right], \quad (9.6)$$

$$A_K = 360^\circ - A'_K \text{ при } L_K < L_N, \quad (9.7)$$

$$A_K = A'_K \text{ при } L_K > L_N.$$

Графический метод предполагает использование диаграммы слежения за спутником, построенной для конкретного пункта приема информации на бланке географической карты полярной стереографической проекции. Вычисления целеуказаний могут быть выполнены в следующей последовательности:

1. Определяется положение восходящего узла первого из ожидаемых (прогнозируемых) витков спутника, проходящего через зону радиовидимости пункта приема информации в намеченный период и удовлетворяющего условиям оптимальности.

2. Нулевая минута, соответствующая восходящему узлу проекции (мерной) орбиты, нанесенной на подвижную прозрачную линейку (или круг), совмещается со значением долготы восходящего узла первого из прогнозируемых витков, которая обозначена по экватору на географической карте. Линия проекции орбиты при этом должна пересекать границу зоны радиовидимости наземного пункта в двух точках – на входе в зону и на выходе из нее.

3. Определяется время вхождения ($t_{вх}$) в зону радиовидимости путем прибавления ко времени восходящего узла прогнозируемой орбиты числа минут (Δt_1), обозначенных у метки проекции орбиты на линейке (или на круге) в точке пересечения орбиты с внешним кругом диаграммы слежения на входе в зону радиовидимости наземного пункта:

$$t_{вх} = t_{восх.узл.} + \Delta t_1, \quad (9.8)$$

где $t_{восх.узл.}$ – время восходящего узла прогнозируемой орбиты.

4. Определяется время выхода ($t_{вых}$) спутника из зоны радиовидимости пункта на прогнозируемой орбите путем прибавления ко времени ее восходящего узла числа минут (Δt_1), обозначенных у

метки проекции орбиты на прозрачной линейке (круге) в точке пересечения этой проекции с внешним кругом диаграммы слежения на выходе из зоны радиовидимости наземного пункта:

$$t_{\text{вх}} = t_{\text{восх. узл.}} + \Delta t_2, \quad (9.9)$$

5. Уточняется длительность сеанса связи со спутником по соотношению:

$$t_{\text{св}} = t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}} = t_2 - \Delta t_1, \quad (9.10)$$

где $t_{\text{св}}$ – длительность сеанса связи (в минутах).

6. Для каждой минутной метки участка проекции прогностической орбиты внутри зоны радиовидимости наземного пункта, начиная от пересечения границы зоны на входе до точки выхода из нее, определяется угловая высота h и азимут антенны A .

7. По определенной форме составляется таблица целеуказаний для слежения за спутником в зоне радиовидимости пункта приема информации.

Табличный способ определения целеуказаний является наиболее простым. В силу того, что диаграммы направленности приемных антенн имеют достаточно широкий угол, оказывается возможным осуществлять уверенный прием информации от спутника и в тех случаях, когда он находится не в центре поля зрения антенны. Другими словами, достаточно иметь стандартные целеуказания для дискретного набора орбит, разнесенных по долготам восходящих узлов на 5° (так называемых стандартных орбит). Для каждой конкретной орбиты определяют только моменты входа в зону радиовидимости и выхода из нее, а целеуказания берутся для стандартных орбит, скажем, ближайшей по долготе восходящего узла к данной конкретной орбите. На практике для составления стандартных целеуказаний используются орбиты, долготы восходящих узлов которых кратны пяти и которые проходят через зону радиовидимости данного наземного пункта. Разница между долготами восходящего узла конкретной (прогнозируемой) и стандартной орбит обычно не превышает $2,5^\circ$, а ошибка в определении самих целеуказаний – 5° . Таблицы целеуказаний можно построить, используя вышеприведенные формулы аналитического метода или диаграммы слежения.

Контрольные вопросы

1. Что входит в понятие «целеуказания»?
2. Что зависит от точности вычисления целеуказаний?
3. Что понимают под оптимальным положением прогнозируемой орбиты?
4. Назовите условия для осуществления уверенного приема информации МСЗ.
5. Кратко охарактеризуйте аналитический метод вычисления целеуказаний.
6. Поясните графический способ расчета целеуказаний.
7. В какой последовательности определяются целеуказания графическим способом с помощью диаграммы слежения за спутником?
8. Почему уточняется длительность сеанса связи со спутником?
9. Расскажите о табличном способе определения целеуказаний.
10. Каковы ошибки целеуказаний, определяемых табличным способом?

Материалы для работы

1. Бланк карты полярной стереографической проекции с нанесенной на ней проекцией мерной орбиты спутника (см. лабораторную работу 7).
2. Диаграмма слежения за спутником, построенная в зоне радиовидимости наземного пункта приема информации (см. лабораторную работу 8).
3. Линейка (или круг) на прозрачной основе с нанесенной проекцией мерной орбиты спутника (см. лабораторную работу 8).

Рекомендуемая литература

1. *Говердовский В.Ф.* Космическая метеорология. Ч. I. Спутниковая метеорология. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009.
2. Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды / Под ред. И.П. Ветлова, Н.Ф. Вельтищева. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982.

Порядок выполнения работы

1. Определить долготу восходящего узла первого из ожидаемых (прогнозируемых) витков спутника, проходящего через зону радиовидимости наземного пункта приема информации в намеченный (заданный) период (например, в ближайшие сутки) и удовлетворяющего условиям оптимальности.
2. На бланке географической карты полярной стереографической проекции (приложение 2), на которой нанесена проекция мерной орбиты (см. лабораторную работу 7) и построена диаграмма слежения за спутником (см. лабораторную работу 8), провести проекцию первой из прогнозируемых орбит, удовлетворяющую условиям оптимальности (рис. 52).

Методические указания

1. Орбита спутника обязательно пройдет через зону радиовидимости, если ее восходящий узел будет располагаться на меридиане пункта наблюдения. Другими словами, восходящий узел мерной орбиты от своего первоначального положения (указанного в телеграмме с эфемеридами спутника) должен сместиться по земному экватору на угол

$$Q = (180^\circ - \lambda_1) + (180^\circ - \lambda_2), \quad (9.11)$$

где Q – дуга (угол в градусах) перемещения восходящего узла орбиты; λ_1 – долгота восходящего узла мерной орбиты; λ_2 – долгота пункта приема информации.

Полезно помнить, что земной шар вращается против часовой стрелки (если смотреть со стороны Северного полюса), а проекция орбиты МСЗ смещается в противоположном направлении. Приращением (инкрементом) долготы называется угол, на который повернется Земля за время одного полного оборота спутника по орбите. Этот угол характеризует дискретное перемещение («шагами», равными по величине долготному приращению) восходящего узла орбиты по земному экватору (в направлении стрелки часов).

Для того чтобы оказаться на меридиане АППИ, спутник должен совершить количество витков, равное

$$m = \frac{Q}{L_{\text{д.п.}}}, \quad (9.12)$$

где m – число оборотов (витков) спутника вокруг земного шара (всегда округляется до целого числа по правилам арифметики); $L_{\text{д.п.}}$ – долготное приращение.

В этом нетрудно убедиться, вращая прозрачную линейку (см. лабораторную работу 8) с копией проекции мерной орбиты вокруг Северного полюса (по часовой стрелке) до совмещения на экваторе восходящего узла этой копии проекции мерной орбиты с меридианом наземного пункта наблюдения.

2. Для удовлетворения требований оптимальности необходимо от намеченного положения (у меридиана пункта) проекции орбиты повернуть линейку в обратном направлении (вправо, против

часовой стрелки) один или несколько раз на величину $L_{д.п.}$, отмечаемую дискретно по экватору, добиваясь минимальной длительности сеанса связи (но не менее 8-ми минут!).

Продолжительность сеанса связи определяется по числу подспутниковых точек, нанесенных с двухминутным интервалом на линейке у проекции орбиты и оказавшихся на границе и внутри зоны радиовидимости наземного пункта, или как разность моментов времени входа МСЗ в зону и выхода из нее (9.10). Следовательно, для обеспечения оптимального положения прогностической (расчетной) проекции орбиты спутнику реально придется выполнить меньшее, чем предназначалось ранее, число оборотов:

$$p = m - n, \quad (9.13)$$

где n – число обратных сдвигов (шагов) линейки.

3. Проекция оптимально расположенной прогностической (расчетной) орбиты проводится на бланке географической карты (приложение 2) и на ее участке, расположенном внутри зоны радиовидимости пункта приема информации, намечаются минутные метки времени (путем интерполяции расстояний между подспутниковыми точками).

4. Определить (вычислить) целеуказания для слежения за спутником.

а. Время пересечения проекции прогностической орбиты с экватором (t_3) рассчитывается по соотношению:

$$t_3 = t_1 + pT, \quad (9.14)$$

где t_1 – время пересечения экватора мерной орбитой; p – число витков, определяемое соотношением (9.13); T – период обращения спутника. Если к этому моменту времени t_3 добавить интервал времени t_3 , который необходим спутнику для полета по прогностической орбите от экватора до границы зоны радиовидимости, то станет известным время начала сеанса связи $t_{н.с.}$:

$$t_{н.с.} = t_3 + t_3. \quad (9.15)$$

б. С помощью диаграммы слежения (см. лабораторную работу 8) для каждой минутной метки внутри зоны радиовидимости

пункта, включая границы, определяют азимут A и угловую высоту h спутника, находящегося на прогностической орбите. Точность определения этих целеуказаний 5° .

в. Результаты определения целеуказаний для слежения за спутником отображаются таблицей вида

№ подспутниковой точки в зоне радиовидимости	Время (московское)	Азимут, град.	Угловая вы- сота, град.
1 (на границе зоны при входе)	$t_{\text{н.с.}}$ (ч, мин, с)	95	0
2	$t_{\text{н.с.}} + 1$ мин	90	5
...

Примечание. Время указывается с точностью до секунд, которые рассчитываются методом интерполяции по расстояниям между минутными метками.

Наиболее употребительные константы, используемые при решении задач

Диаметр Солнца $1391\,000\text{ км} \approx 109$ диаметров Земли; радиус Солнца $695,6 \cdot 10^3\text{ км}$.

Площадь поверхности Солнца $6079 \cdot 10^9\text{ км}^2$.

Расстояние между центрами Солнца и Земли:

- среднее $149 \cdot 10^6\text{ км}$;
- Земля в перигелии, 2 января, $147 \cdot 10^6\text{ км}$;
- Земля в афелии, 4 июля, $152 \cdot 10^6\text{ км}$.

Среднее расстояние Луны от Земли 384400 км .

Гравитационный параметр притягивающего центра:

- для Солнца $\mu_c = 1325 \cdot 10^8\text{ км}^3/\text{с}^2$;
- для Луны $\mu_l = 4900\text{ км}^3/\text{с}^2$;
- для Земли $\mu_z = 398\,600 \cdot 10^8\text{ км}^3/\text{с}^2$.

Диаметр Луны $3477\text{ км} \approx 0,27$ диаметра Земли.

Солнечная постоянная $1,38\text{ кВт}/\text{м}^2$.

Период суточного вращения Земли $23\text{ ч } 56\text{ мин } 4\text{ с} \approx 24\text{ ч} \approx 86400\text{ с}$.

Угловая скорость вращения Земли $7,27 \cdot 10^{-5}\text{ радиан}/\text{с}$.

1 радиан = $57,3^\circ = 206\,265''$.

Радиус Земли $6,3675 \cdot 10^6\text{ м} \approx 6370\text{ км}$.

Средняя величина градуса меридиана Земли $111,1\text{ км}$.

Экваториальная полуось Земли $6378,2\text{ км}$.

Полярная полуось Земли $6256,5$.

Площадь поверхности Земли $5,1 \cdot 10^8\text{ км}^2 = 5,096 \cdot 10^{18}\text{ см}^2$.

Нормальное ускорение свободного падения $9,80665\text{ м}/\text{с}^2$.

Постоянная Стефана–Больцмана $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Число e (основание натуральных логарифмов) $2,7183$.

Длина волны самого **низкого** тона, доступного уху человека $\lambda = 16\text{ м}$.

Длина волны самого **высокого** тона, доступного уху человека $\lambda = 1,5\text{ см}$.

Длина волны крайних красных лучей (фраунгоферова линия А) $\lambda = 0,759\text{ мкм}$.

Длина волны крайних фиолетовых лучей (фраунгоферова линия H) $\lambda = 0,379\text{ мкм}$.

Ответы и решения

Лабораторная работа 1

1.8.

1.8.1. $\delta = 60^\circ\text{N}; t = 99^\circ;$

1.8.2. $\delta = 15^\circ\text{N}; t = 295^\circ;$

1.8.3. $\delta = 20^\circ\text{N}; t = 316^\circ;$

1.8.4. $\delta = 25^\circ\text{S}; t = 304^\circ;$

1.8.5. $h = 25^\circ; A = 47^\circ;$

1.8.1. $h = 2^\circ; A = 243^\circ;$

1.8.1. $h = 35^\circ; A = 230^\circ.$

1.9.

1.9.1. $h = 40^\circ 53' 44''$; формула (1.23);

1.9.2. $A = 119^\circ 09' 32''$; формула (1.24);

1.9.3. $t = 43^\circ 28' 30''$; формула (1.25);

$A = 108^\circ 11' 51''$; формула (1.26);

1.9.4. $\delta = 14^\circ 29' 28''\text{S}$; формула (1.27);

$t = 15^\circ 37' 21''\text{W}$; формула (1.28);

1.9.5. $h = 60^\circ 40' 34''$; формула (1.30);

$t = 44^\circ 47' 15''\text{W}$; формула (1.29).

1.10.

1.10.1. $h = 12^\circ 58' 29''$, $A = 299^\circ 55' 21''$;

1.10.2. $h = 11^\circ 33' 44''$, $A = 244^\circ 38' 53''$;

1.10.3. $h = 41^\circ 15' 40''$, $A = 139^\circ 01' 56''$

или $40^\circ 58' 04''\text{SE}$;

1.10.4. $t = 290^\circ 40' 33''$, $A = 79^\circ 38' 06''$;

1.10.5. $t = 25^\circ 02' 15''$, $A = 205^\circ 58' 23''$;

1.10.6. $\delta = 48^\circ 02' 45''\text{N}$, $t = 65^\circ 21' 51''$;

1.10.7. $\delta = 15^\circ 52' 13''\text{S}$, $t = 232^\circ 45' 40''$;

1.10.8. $\delta = 54^\circ 39' 32''\text{S}$, $t = 309^\circ 58' 44''$;

1.10.9. $h = 28^\circ 30' 35''$, $t = 286^\circ 57' 41''$;

1.10.10. $t = 75^\circ 54' 23''$, $A = 248^\circ 18' 27''$.

Лабораторная работа 2

- 2.1. 1 ч 13 мин 0,83 с.
2.2. 3 ч 15 мин 22,37 с.
2.3. 18 ч 10 мин 9 с.
2.4. $55^{\circ}46'57''$.
2.5. $243^{\circ}00'51''$; $10^{\circ}00'42''$.
2.7. $232^{\circ}00'$.
2.8. $\alpha = 11$ ч 19 мин 48 м.
2.9. $S = 13$ ч 20 мин.
2.10. Звездным временем в определенной точке на земной поверхности в данный момент называют двухгранный угол между полуплоскостью, проходящей через полярную ось Земли и точку весеннего равноденствия, и полуплоскостью, проходящей в этот момент через ось Земли и известную точку. На единицу измерения этого угла принимают частенько не градус, а «угловой час» (или просто «час»), причем $360^{\circ} = 24$ угловым часам, а 1 ч $= 15^{\circ}$. В астрономических календарях обычно приводится звездное время в Гринвиче в полночь каждых суток или в полночь, с которой начинается месяц. Гринвичское время («среднее мировое время») отличается от московского на три часа, а Земля совершает полный оборот вокруг оси за 86 164 с. Поэтому

$$S = S_0 + \frac{360^{\circ}}{86\,164} 3600 (t - 3) + \lambda \text{ (градусов).}$$

$$2.11. S = 217,94^{\circ} + \frac{360^{\circ}}{86164} (86\,400 - 86\,164) \cdot 6 + \frac{360^{\circ}}{86\,164} (20 - 3) \times$$

$$\times 3600 + 32^{\circ} \approx 151,6^{\circ}.$$

$$2.12. S = 18$$
 ч 42 м 6,3 с.

$$2.13. T = 8$$
 ч 01 м 20,5 с.

$$2.14. T = 22$$
 ч 35 м 56,6 с; $t_{\odot} = 10$ ч 35 м 51,8 с.

$$2.15. 14$$
 ч 20,5 м.

2.16. 1 марта средняя полночь на 13 мин раньше истинной; 14 апреля совпадает с истинной, 25 октября на 16 мин позже истинной; 25 декабря совпадает с истинной.

$$2.17. 14$$
 ч 17 мин 48 с.

- 2.18. По среднему времени 2 ч 39 мин 25 с; по истинному 2 ч 42 мин 56 с; по декретному времени 15 ч.
 2.19. По местному среднему времени 15 ч 56 мин.
 2.20. Среднее время 12 ч 15 мин 18 с.
 2.21. 34 мин 40 с.
 2.22. 5 ч 53 мин 30 с.
 2.23. 15 ч 21 мин.
 2.24. 12 ч 55 мин.
 2.25. 7 ч 10 мин.

Лабораторная работа 3

3.1. Для известной даты и момента наблюдения на станции B вычисляют S – звездное время. Используют геоцентрическую экваториальную систему координат $Ax_3y_3z_3$, ось Ax_3 которой направлена в точку весеннего равноденствия, и топоцентрическую горизонтальную систему $Bx_ry_rz_r$, а также вспомогательную систему отсчета $Bx_1y_1z_1$ с началом в точке B и с осями, соответственно параллельными и одинаково направленными с осями Ax_3 , Ay_3 , Az_3 (рис. 53).

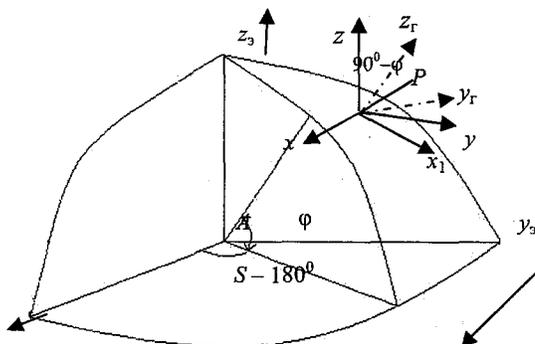


Рис. 53. Вспомогательная система отсчета для решения задачи

Тогда

$$x_3i + y_3j + z_3k = xi + yj + zk + \overline{AB},$$

где вектор \overline{AB} имеет координаты

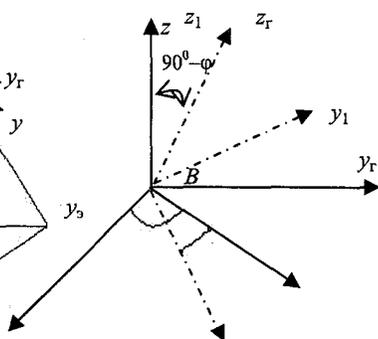


Рис. 54. Преобразование вспомогательной системы отсчета при решении задачи

$$x_0 = R \cos \varphi \cos(S - 180^\circ), y_0 = R \cos \varphi \sin(S - 180^\circ),$$

$$x = x_0 - x_0; y = y_0 - y_0; z = z_0 - z_0; z_0 = R \sin \varphi.$$

С помощью двух поворотов (рис. 54) от системы $Bxyz$ переходят к системе $Bx_r y_r z_r$: после первого поворота вокруг оси Bz на угол $S - 180^\circ$ получают новую систему $Bx_1 y_1 z_1$, ось которой Bz_1 совпадает с осью Bz ; после второго поворота вокруг оси Bx_1 на угол $90^\circ - \varphi$ получают систему $Bx_r y_r z_r$, в которой ось Bx_1 совпадает с осью Bx_r .

Составляют таблицу углов между осями матрицы первого и второго поворотов:

первый поворот

	Bx	Bx_1	Bz
Bx_1	$S - 180^\circ$	$270^\circ - S$	90°
Bx_1	$S - 90^\circ$	$S - 180^\circ$	90°
Bz_1	90°	90°	0°

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\cos S - \sin S 0 \\ \sin S - \cos S 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

второй поворот

	Bx_1	Bx_r	Bz_1
Bx_r	$90^\circ - \varphi$	90°	$180^\circ - \varphi$
Bx_r	90°	0°	90°
Bz_r	φ	90°	$90^\circ - \varphi$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\sin \varphi & 0 & -\cos \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{bmatrix},$$

Тогда

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = A_2 A_1 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A_1^{-1} A_2^{-1} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + A_1^{-1} A_2^{-1} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix},$$

где $A_1^{-1} = \begin{bmatrix} -\cos S & -\sin S & 0 \\ -\sin S & -\cos S & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $A_1^{-1} = \begin{bmatrix} -\cos S & \sin S & 0 \\ -\sin S & -\cos S & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$,

$$A_2^{-1} = \begin{bmatrix} \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{bmatrix}.$$

Зная x_r, y_r, z_r, S и φ , можно определить из (*) координаты x_3, y_3, z_3 .

3.2 . По известным горизонтальным сферическим координатам ρ, h, A можно определить декартовы горизонтальные координаты (x_r, y_r, z_r) :

$$x_r = \rho \cosh \cos A, y_r = \rho \cosh \sin A, z_r = \rho \sinh, \quad (**)$$

а затем декартовы экваториальные координаты x_3, y_3, z_3 (см. задачу 3.1).

Параметры r, δ, α определяют по соотношениям:

$$x_3 = r \cos \delta \cos \alpha, y_3 = r \cos \delta \sin \alpha, z_3 = r \sin \delta,$$

причем $r^2 = x_3^2 + y_3^2 + z_3^2$ и $\sin \delta = \frac{z_3}{r}$. Последним соотношением

угол δ определяется однозначно, так как $-\frac{\pi}{2} \leq \delta \leq \frac{\pi}{2}$. Далее вы-

числяют $\cos \alpha, \sin \alpha$ и угол α .

3.3 . Сначала определяют координаты x_3, y_3, z_3 затем координаты x_r, y_r, z_r , и наконец параметры ρ, h, A из системы уравнений (**)
в задаче (3.2).

3.4 . Если обозначить через (x, y, z) искомые декартовы координаты перигея орбиты спутника, а через (ξ, η, ζ) – орбитальные координаты, то

$$\xi = a(1-e), \eta = 0, \zeta = 0.$$

Из отношения

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} a(1-e) \begin{bmatrix} \cos \Omega \cos \omega - \sin \Omega \sin \omega \cos i \\ \sin \Omega \cos \omega + \cos \Omega \sin \omega \cos i \\ \sin \omega \sin i \end{bmatrix} a(1-e) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{4}\sqrt{2} \\ \frac{1}{2}\sqrt{2} \\ \frac{\sqrt{6}}{4} \end{bmatrix} \cdot 560,$$

то есть $x \approx -1980$ км, $y \approx 3960$ км, $z = 3430$ км. Далее:

$$r = a(1 - e) = 5600 \text{ км}; \sin \delta = \frac{z}{r} = \frac{\sqrt{6}}{4} \approx 0,6125; \delta \approx 37^\circ 46'; \cos \delta =$$

$$\frac{\sqrt{10}}{4}; \cos \alpha = \frac{x}{(r \cos \delta)} = \frac{1}{\sqrt{5}}; \sin \alpha = \frac{2}{\sqrt{5}} \approx 0,447; \alpha \approx 15^\circ 26'$$

3.5 .

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_X Q_X R_X \\ P_Y Q_Y R_Y \\ P_Z Q_Z R_Z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_X \\ R_Y \\ R_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \Omega \sin i \\ -\cos \Omega \sin i \\ \cos i \end{bmatrix} .$$

3.6 . Воспользоваться номограммой; $E = 63^\circ$.

3.7 . Воспользоваться номограммой.

3.8 . Воспользоваться формулами (3.19)–(3.24).

3.9 .Смотри решение задачи 3.8.

3.10 .Смотри решение задачи 3.8.

3.11 . Сначала необходимо вычислить звездное время S , а затем использовать формулу (3.24).

3.12 . В момент t_0 прохождения спутника над экватором (из Южного полушария в Северное) скорость подспутниковой точки можно разложить на два компонента – V_M (меридианальную) и V_3 (экваториальную):

$$V_M = V \sin i, V_3 = V \cos i,$$

где $V = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}$ – угловая скорость (или n – среднее движение) спутника; μ – гравитационный параметр Земли; a – удаление ИСЗ от притягивающего центра.

При рассмотрении движения подспутниковой точки на вращающейся Земле необходимо учитывать, что каждая точка экватора вращается со скоростью $V_0 = \frac{2\pi R}{86164}$ км/с. Поэтому скорость

спутника относительно поверхности вращающейся Земли в момент t_0 характеризуется составляющими

$$V'_3 = V_3 - V_0, V'_M = V_M .$$

Угол γ между трассой и экватором в момент t_0 удовлетворяет условию

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{V'_M}{V'_3} = \frac{V_M}{V_3 - V_0}$$

Известно, что $a = 6685$ км, $V = 7,36$ км/с, поэтому $V_3 = V \cos 65^\circ = 3,10$ км/с и $V_M = V \sin 65^\circ = 6,67$ км/с, $V_0 = 0,464$ км/с. Тогда

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{6,67}{2,64} = 2,53, \text{ то есть угол } \gamma = 68^\circ 25'.$$

3.13. Смотри решение задачи 3.12.

3.14. Смотри решение задачи 3.12.

3.15. Смотри решение задачи 3.12.

3.16. Если воспользоваться формулами из решения задачи 3.12, то по условиям поставленной задачи

$$\gamma = 90^\circ, V = 6371 \sqrt{\frac{398\ 600}{6600^3}} \approx 7,50 \text{ км/с,}$$

$$V_3 = 0, V'_3 = 7,50 \text{ км/с, } \operatorname{tg} \gamma' = \frac{7,50}{(-0,47)} = -15,96, \text{ то есть } \gamma' \cong 93^\circ 42'.$$

3.17. Смотри решение задачи 3.12.

3.18. Смотри решение задачи 3.12.

Лабораторная работа 4

4.1. Высота h_\odot Солнца равна $69,5^\circ$.

4.2. Даты прохождения Солнца через зенит: 1 марта и 13 октября.

4.3. Широта пункта наблюдения 6° N .

4.4. Приближенный расчет склонения δ_\odot Солнца начинают от ближайшей исходной даты равноденствия или солнцестояния; в данном случае такой датой является 21 марта:

1) 21/III	$\delta_\odot = 0^\circ$
+0,4°×30 дней	= +12°(с 21/III по 20/IV)
+0,3°×11 дней	= +3,3°(с 20/IV по 01/V)

$$1/V \qquad \delta_\odot = +15,3^\circ \text{ или } 15,3^\circ \text{ N.}$$

2) Условие восхода и захода с учётом рефракции и полудиаметра видимого диска Солнца:

$$|\delta| < (90^\circ - \varphi) - 51' = (90^\circ - 68^\circ 51') - 51' = 20^\circ 11' \approx 20,2^\circ.$$

Подставляя сюда найденное выше $\delta_\odot = +15,3^\circ$, видим, что условие удовлетворяется. Следовательно, 1 мая в Мурманске будет восход и заход Солнца.

3) Округляя заданную широту до $0,1^\circ$, определяем полуденную высоту Солнца:

$$h_\odot = (90^\circ - \varphi) + \delta = 21^\circ + 15,3^\circ = 36,3^\circ.$$

4) Приближенный расчет прямого восхождения α_\odot Солнца на 1 мая:

21/III	+	$\alpha_\odot = 0^\circ$
+1°×41 день		= 41°
1/V		$\alpha_\odot = 41^\circ$

Точность приближенного расчета δ_\odot примерно равна $\pm 0,5^\circ$, а точность приближенного расчета α_\odot составляет около $\pm 5^\circ$.

4.5. Продолжительность дня 15 ч 05 мин.

4.6. Продолжительность дня 8 ч 36 мин; $T_b = 7$ ч 42 мин; $T_3 = 16$ ч 18 мин.

4.7. На широте 25° продолжительность дня 13 ч 25 мин; на широте 40° – 14 ч 36 мин; на широте 60° – 17 ч 47 мин.

4.8. На широте 25° продолжительность дня 10 ч 50 мин; на широте 40° – 9 ч 52 мин; на широте 60° – 7 ч 18 мин.

4.9. На широте 10° самый длинный день больше самого короткого в 1,1 раза; на широте 30° – в 1,36 раза; на широте 60° – в 3,56 раза.

4.10. $h_\odot = 19^\circ 27' 21$ февраля; 13 августа $h_\odot = 55^\circ 18'$.

4.11. Высота Солнца 14 ноября равна $16^\circ 32'$.

4.12. Непрерывный день на широте 75° продолжается 103 суток. Порядок графического решения: построить угол φ (см. рис. 32); провести прямую M_1M ; точку M соединить с центром, то есть провести прямую OM и построить перпендикуляр к линии OM в точке O , который образует с экватором угол минимального для данных условий склонения Солнца. По таблице склонений Солнца подсчитать все дни, в которые δ_\odot имеет значения, равные полуденному и больше его.

4.20. Среднее солнечное время Владивостока отличается от всемирного времени $T_{\odot} = T_{\text{гр}}$ на величину долготы $\lambda_{\text{Вл}}^{\text{E}} \approx 9$ ч, поэтому в средний владивостокский полдень $T_{\text{гр}} = 12$ ч $- 9$ ч = 3 ч. Из астрономического ежегодника для $T_{\text{гр}} = 3$ ч находим 4 октября 1967 г., что $\delta_{\odot} = 4^{\circ}02'S$, $\eta = 225^{\circ} - 227^{\circ}44,6' = -2^{\circ}44,6'$ или $-11,0$ мин.

По формуле

$$\cos t_{\odot} = -\text{tg}\varphi \text{tg}\delta_{\odot} - 0,0148 \text{sec}\varphi \text{sec}\delta_{\odot} = +I - \text{II} \quad (*)$$

определяется часовой угол t_{\odot} Солнца, численно равный истинному солнечному времени захода Солнца. Истинное солнечное время восхода Солнца равно $(24 \text{ ч} - t_{\odot})$. Слагаемые правой части формулы (*) обозначим через I и II.

Схема вычислений:

$\varphi = 43^{\circ}07'N$	$\text{tg} \dots 9,9714$	$\text{sec} \dots 0,1367$
$\delta_{\odot} = 4^{\circ}02'S$	$\text{tg} \dots 8,8483$	$\text{sec} \dots 0,0011$
	$0,0148 \dots 8,1703$	

$+I \dots 8,8197$	$-II \dots 8,3081$
$+I = + 0,0660$	$-II = -0,0203$
$-II = - 0,0203$	
$\cos t_{\odot} = +0,0457$	$\longrightarrow (t_{\odot} = 87^{\circ}23')$

Полученному значению ($+\cos t_{\odot}$) соответствуют два значения угла

$$t_{\odot}' = 272^{\circ}37' \text{ и } t_{\odot}'' = 87^{\circ}23',$$

что в единицах времени составляет

$$t_{\odot}' = 18 \text{ ч } 10,5 \text{ м и } t_{\odot}'' = 5 \text{ ч } 49,5 \text{ мин.}$$

По формуле

$$T = t_{\odot} + \eta + 12 \text{ [ч]} \quad (**)$$

определяют местное среднее солнечное время восхода и захода Солнца, а затем по выражению

$$T_{\text{д}} = T + 1 \text{ [ч]} - (\lambda - n) \text{ ч} \quad (***)$$

и искомое декретное время:

$t_{\odot}' = 18 \text{ ч } 10,5 \text{ мин}$	$t_{\odot}'' = 5 \text{ ч } 49,5 \text{ мин}$
$\eta = -11,0 \text{ мин}$	$\eta = -11,0 \text{ мин}$
$+12 \text{ ч}$	$+12 \text{ ч}$

$$T' = 5 \text{ ч } 59,5 \text{ мин} \quad T'' = 17 \text{ ч } 38,5 \text{ мин}$$

$$+1 \text{ [ч]} - (\lambda - n) \text{ ч} = +1 \text{ ч } 12,5 \text{ мин} \quad +1 \text{ ч } 12,5 \text{ мин} \quad n = 9$$

восход $T'_d = 7 \text{ ч } 12 \text{ мин}$ заход $T''_d = 18 \text{ ч } 51 \text{ мин}$.

Примечание. Решение производится по соответствующим разделам справочника «Пятизначные таблицы логарифмов чисел и тригонометрических функций» с условной записью логарифмов. Например, $\lg \operatorname{tg} 43^\circ 07' N = 9,9714$. и $\lg \operatorname{sec} 43^\circ 07' N$ в схеме вычислений записываются так:

$$\varphi = 43^\circ 07' N \quad \operatorname{tg} \dots 9,9714 \quad \operatorname{sec} \dots 0,1367.$$

4.21. Решение этой задачи требует определенных навыков к работе с таблицами астрономических ежегодников, правила использования которых поясняются в самом ежегоднике. Так, из таблиц Морского астрономического ежегодника 18 июля 1967 г. на меридиане Гринвича ($\varphi = 54^\circ N$) для Луны можно определить:

	восход	и	заход
	$T_1 = 16,2 \text{ ч}$		$T_2 = 1,1 \text{ ч}$
поправку за изменение широты:			
$\Delta\varphi = 55^\circ 45' N - 54^\circ N = 1^\circ 45'$	+0,1 ч		-0,1 ч
поправку за долготу $\lambda = 2 \text{ ч } 30,3 \text{ мин}, E$	-0,2 ч		0,0 ч
среднее солнечное время в Москве	$T' = 16,1 \text{ ч}$		$T'' = 1,0 \text{ ч}$
с поправкой	+0,5 ч		+0,5 ч

декретное время в Москве $T'_d = 16,6 \text{ ч}$ $T''_d = 1,5 \text{ ч}$

в календаре указано 16 ч 35 мин 1 ч 33 мин

4.26. Величина склонения δ_\odot Солнца, соответствующая началу и концу гражданских белых ночей для Санкт-Петербурга, вычисляется по формуле

$$\delta_\odot = (90^\circ - 59^\circ 57') - 6^\circ 51' = +23,2^\circ;$$

начало	конец		
$22/\text{VI } \delta_\odot = +23,5^\circ$		+23,5°	
- 23,2°		-23,2°	
0,3°		0,3°	
-		+	
+0,1°×3 дня	0,3°(22.VI-19.VI)	-0,1°×3 дня	-0,3° (22.VI-25.VI)
$\Sigma_1'' = 3 \text{ дня}$	0,°0	$\Sigma_2'' = 3 \text{ дня}$	0,°0

Начало белых ночей приблизительно 19 июня, конец – 25 июня; продолжительность

$$\Sigma_1'' + \Sigma_2'' = 3 \text{ дня} + 3 \text{ дня} = 6 \text{ дней (сут.)}$$

4.27. Продолжительность 73 суток.

4.28. Начало гражданских белых ночей 18 декабря, конец – 25 декабря.

4.29. Продолжительность 88 сут.

4.30. Подставив в формулу $\delta_{\odot} \geq (90^{\circ} - \varphi) - 51'$ заданное значение φ , получаем

$$\delta_{\odot} = (90^{\circ} - 68^{\circ}58') - 51' = 20^{\circ}11' \approx 20,2^{\circ},$$

то есть полярный день в Мурманске начнется и закончится при $\delta_{\odot} = +20,2^{\circ}$.

Рассчитаем даты начала и конца полярного дня в Мурманске:

начало	$\delta_{\odot} = +23,5^{\circ}$	конец
22/VI	$+23,5^{\circ}$	$+23,5^{\circ}$
	$-20,2^{\circ}$	$-20,2^{\circ}$
$3,3^{\circ}$		$3,3^{\circ}$
-		-
$+0,1^{\circ} \times 30$ дней	$3^{\circ} (22/VI - 23/V)$	$3^{\circ} (22/VI - 22/VII)$
	$-0,3^{\circ}$	$-0,3^{\circ}$
-		-
$+0,3^{\circ} \times 1$ день	$0,3^{\circ} (23/V - 22/V)$	$0,3^{\circ} (22/VII - 23/VII)$
$3,3^{\circ}$		$3,3^{\circ}$

$$\Sigma_1 = 31 \text{ день } 0,0^{\circ} \qquad \Sigma_2 = 31 \text{ день } 0,0^{\circ}$$

Таким образом, полярный день в Мурманске начинается 22 мая и заканчивается 23 июля. Продолжительность полярного дня

$$\Sigma_1 + \Sigma_2 = 31 + 31 = 62 \text{ [сут.]}$$

4.31. $\delta_{\odot} = -[(90^{\circ} - \varphi) + 51'] = -(21^{\circ}02' + 51') = -21^{\circ}53' \approx -21,9^{\circ}$.

начало	$\delta_{\odot} = -23,5^{\circ}$	конец
22/XII	$-23,5^{\circ}$	$-23,5^{\circ}$
	$-(-21,9^{\circ})$	$-(-21,9^{\circ})$
$-1,6^{\circ}$		$-1,6^{\circ}$
-		+
$-0,1^{\circ} \times 16$ дней	$-1,6^{\circ} (22/XII - 06/XII)$	$+1,6^{\circ} (22/XII - 07/I)$
$-1,6^{\circ}$		$+1,6^{\circ}$

$$\Sigma_1' = 16 \text{ дней } 0,0^{\circ}$$

$$\Sigma_2' = 16 \text{ дней } 0,0^{\circ}$$

Таким образом, полярная ночь в Мурманске начинается 6 декабря и кончается 7 января. Продолжительность полярной ночи равна

$$\Sigma_1' + \Sigma_2' = 32 \text{ (сут.)}.$$

4.32. Начало 18 ноября, конец 25 января.

4.33. Продолжительность полярной ночи 33 суток.

4.34. Продолжительность полярного дня 68 суток.

Лабораторная работа 5

5.1. 0,47 мкм; 1,37 кВт/м²; 7,44 и 49 %.

5.2. 1,42; 1,33 кВт/м²; 2,9 и -3,6 %.

5.3. 0,36; 0,69; 0,98; 1,20; 1,33; 1,38 кВт/м².

5.4. $6,37 \cdot 10^{14}$; $1,53 \cdot 10^{16}$; $5,6 \cdot 10^{18}$ МДж; 1,24; 29,81; 10880 МДж/м².

5.5. 37,95; 32,86; 18,98; 0,00 МДж/м².

5.6. 5,60; 2,90; 2,00; 1,55; 1,30; 1,15; 1,06; 1,015; 1,000.

5.7. 21 июня: 1,40; 1,19; 1,06; 22 декабря - 5,34; 2,40.

5.8. 0,722; 0,653.

5.9. 0,710; 1,37 кВт/м².

5.10. 5,64.

5.11. 0,815; 0,801; 0,773; 0,748.

5.12. 0,96 кВт/м²; 70 %.

5.13. 0,20; 0,51; 0,71; 0,81; 0,88; 0,91 кВт/м².

5.14. При высоте Солнца 30°: 0,35; 0,50; 0,68; 0,88 кВт/м²;

при высоте Солнца 60°: 0,62; 0,77; 0,92; 1,07 кВт/м².

5.15. 0,44 кВт/м².

5.16. 7,45 МДж/м².

5.17. 0,35 кВт/м².

5.18. Чернозем, в 9 раз.

5.20. 0,11 кВт/м².

5.21. 16 500 лк; 0,37.

5.22. а) $73,0 \cdot 10^3$; $54,4 \cdot 10^3$; $43,7 \cdot 10^3$; $38,3 \cdot 10^3$ лк; б) $36,5 \cdot 10^3$; $18,0 \cdot 10^3$;

$10,8 \cdot 10^3$; $7,5 \cdot 10^3$ лк; в) 0,735; 0,739; 0,754; 0,777; г) 0,54; 0,40; 0,32;

0,28; д) 26,20, 14,8; 4 %.

5.23. 16 раз; для фиолетовых.

5.24. 0,145; 86 %; 0,143; 86 %.

5.25. 60 220 и 2620 лк.

5.26. Вертикальная, в 6 раз.

5.27. 135 000; 67 500; 27 000 и 0 лк; в 2 раза больше, чем в Санкт-Петербурге и в 5 раз больше, чем на ст. Восток.

5.28. 94 500; 42 100; 9000 и 0 лк; в 2,2 раза больше, чем в Санкт-Петербурге и в 10,5 раза больше, чем на ст. Восток.

5.29. 50 000 лк.

5.30. $3,2 \cdot 10^4$ кд/м²; $10,2 \cdot 10^4$ лм/м².

Лабораторная работа 6

6.1. 344 Вт/м².

6.2. 246К, 272К, 187К.

6.3. -95 Вт/м^2 , -17К , -19К , -13К .

6.4. Значения эффективной поглощающей массы m_z (кг/м²):

φ° с.ш.	ρ, гПа						
	100	200	300	400	500	550	600
10	$1 \cdot 10^{-4}$	0,0054	0,062	0,379	1,257	2,00	3,05
60	$1 \cdot 10^{-4}$	0,0031	0,026	0,128	0,465	0,783	1,250
φ° с.ш.	ρ, гПа						
	650	700	750	800	850	900-950	1000
10	4,48	6,39	8,92	12,22	16,47	21,78-28,25	36,05
60	1,918	2,84	4,07	5,65	7,64	10,08-13,02	16,54

6.5. Значения прямой солнечной S' и отраженной $D \uparrow$ радиации (Вт/м²):

ν°☉	Величина	ρ, гПа					
		0	200	400	600	800	1000
0	S'	1376	1335	1293	1243	1200	1157
	$D \uparrow$	174	174	174	174	174	174
50	S'	886	859	825	790	760	730
	$D \uparrow$	110	110	110	110	110	110

6.6. Значение изменения температуры $\partial T / \partial t$ (К/сутки):

ν°☉	Слой, гПа					
	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	0-1000
0	1,7	1,8	2,1	1,8	1,8	1,8
50	1,1	1,4	1,5	1,3	1,3	1,3

6.7. Значения прямой солнечной S' , нисходящей $D \downarrow$ и восходящей $D \uparrow$ радиации (Вт/м²):

φ° с.ш.	ρ, гПа	S'	$D \downarrow$	$D \uparrow$
10	0	886	0	431
	550	800	0	431
	600	0	318	30
	1000	0	297	30

60	0	886	0	440
	550	816	0	440
	600	0	323	31
	1000	0	305	31

6.8. Значение изменения температуры $\partial T/\partial t$ (К/сутки) в слоях (p , гПа):

φ° с.ш.	0-550	550-600	600-1000	0-1000
10	1,3	13,6	0,4	1,6
60	1,1	14,2	0,4	1,5

6.9.

p , гПа	0	200	400	600	800	1000
$F\uparrow$ Вт/м ²	269	274	318	366	417	455
$F\downarrow$ Вт/м ²	0	10	97	210	298	387

6.10.

Слой, гПа	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	0-1000
$\partial T/\partial t$ (К/сутки)	-0,2	-1,8	-2,7	-1,6	-2,1	-1,7

6.11. Значения радиационного баланса R (Вт/м²):

ν°	p , гПа					
	0	200	400	600	800	1000
0	933	897	898	913	907	915
50	507	485	494	524	531	552

Значения радиационных изменений температуры $\partial T/\partial t$ (К/сут.):

ν°	Слой, гПа					
	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	0-1000
0	1,5	-0,04	-0,6	0,3	-0,3	0,2
50	0,9	-0,4	-1,3	-0,3	-0,9	-0,4

6.12. Значения восходящего $F\uparrow$ и нисходящего $F\downarrow$ потоков длинноволнового излучения (Вт/м²):

p , гПа	$F\uparrow$	$F\downarrow$	$F\uparrow$	$F\downarrow$
	$\varphi = 10^\circ$ с.ш.		$\Phi = 60^\circ$ с.ш.	
0	233	0	225	0
550	307	187	260	137
600	366	325	314	276
1000	455	429	375	349

6.13. Значения изменения температуры $\partial T/\partial t$ (К/сут.) за счет длинноволнового (земного) излучения:

φ° с.ш.	Слой, гПа			
	0-550	550-600	600-1000	0-1000
10	-1,7	-13,3	-0,3	-1,7
60	-1,6	-14,3	-0,2	-1,7

6.14. Значения радиационного баланса R (Вт/м²):

φ° с.ш.	p , гПа			
	0	550	600	1000
10	222	249	247	241
60	221	253	254	248

Значения полных радиационных изменений температуры $\partial T/\partial t$ (К/сут.):

φ° с.ш.	Слой, гПа			
	0-550	550-600	600-1000	0-1000
10	-0,4	0,3	0,1	-0,2
60	-0,5	-0,2	0,1	-0,2

6.15.

$S' + D\downarrow$ при $z = 0$	$D\uparrow$ при $z \rightarrow \infty$	Радиационное нагревание		
		атмосферы	подстилающей поверхности	системы Земля- атмосфера
а. Увеличится	Увеличится	Увеличится	Увеличится	Увеличится
б. Уменьшится	Уменьшится	Увеличится	Уменьшится	Увеличится, т.к. уменьшится уходящее излучение
в. Уменьшится	Увеличится	Уменьшится при облаках верхнего яруса, увеличится при низких облаках	Уменьшится	Уменьшится
г. Незначительно увеличится за счет многократного рассеяния	Увеличится	Незначительно увеличится за счет поглощения отраженной радиации	Уменьшится	Уменьшится

6.16.

$F\uparrow$ при $z \rightarrow \infty$	$F\downarrow$ при $z = 0$	Радиационное выхолаживание		
		атмосферы	подстилающей поверхности	системы Зем- ля–атмосфера
а. Увели- чится	Увеличится	Увеличится при неизмен- ном вертикаль- ном градиенте температуры	Увеличится при неизмен- ном вертикаль- ном градиенте температуры	Увеличится
б. Увели- чится, так как основ- ной вклад в $F\uparrow$ вно- сит излу- чение атмосферы	Увеличится	Увеличится	Уменьшится	Увеличится, так как уве- личится ухо- дящее излу- чение
в. Умень- шится	Увеличится	Уменьшится при высоких облаках, увели- чится при низ- ких облаках	Уменьшится	Уменьшится, так как уменьшится уходящее излучение

6.17. Появление облачности уменьшает как приход коротковолновой радиации, так и потерю тепла вследствие собственного излучения. При положительном радиационном балансе это приводит к «похолоданию», а при отрицательном – к «потеплению».

6.18. 13,0; 10,1; 9,0 мкм.

6.19. В $19 \cdot 10^4$ раз.

6.20. 0,52; 0,16 кВт/м².

6.21. 35°C.

6.22. 0,80; 0,03 кВт/м².

6.23. 0,33; 0,47; -0,14 кВт/м².

6.24. 0,38; 0,30; 0,27; 0,11; -0,11 кВт/м².

6.25. 0,22; 0,19; 0,16 кВт/м².

6.26. 0,03 кВт/м².

6.27. 0,33 кВт/м².

6.28. 0,28 кВт/м².

6.290. -0,06 кВт/м².

6.30. 3160,7720 МДж/м².

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И.* Курс общей астрономии. – М.: Наука, 1977.
2. *Балк М.Б.* Элементы динамики космического полета. – М.: Наука, 1965.
3. *Герман М.А.* Космические методы исследования в метеорологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985.
4. *Говердовский В.Ф.* Космическая метеорология с основами астрономии. – СПб.: изд. РГГМУ, 1995.
5. Задачник по общей метеорологии / Под ред. В.Г. Морачевского. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984.
6. Задачник по динамической метеорологии / Под ред. В.Г. Морачевского. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984.
7. *Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли. – М.: Мир, 1988.
8. *Матвеев Л. Т.* Физика атмосферы. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2000.
9. Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды / Под ред. И.П. Ветлова, Н.Ф. Вельтищева. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987.
10. *Русин И.Н.* Динамическая метеорология (ознакомительный курс). – СПб.: изд-во РГГМУ, 2008.
11. Пятизначные таблицы логарифмов чисел и тригонометрических функций. – М.: Геодезиздат, 1957.
12. *ЩигOLEв Б.М.* Математическая обработка наблюдений. – М.: Физматгиз, 1962.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	6
I. Дистанционное зондирование Земли из космоса	11
Лабораторная работа 1. Определение положения искусственных спутников Земли в космическом пространстве	13
Лабораторная работа 2. Время и его измерение при изучении Земли из космоса	29
Лабораторная работа 3. Расчет координат подспутниковой точки и трассы метеорологического спутника Земли на поверхности планеты	50
II. Источники гиromетеорологической информации при дистанционном зондировании Земли из космоса	74
Лабораторная работа 4. Видимые движения Солнца и космическая съёмка Земли	77
Лабораторная работа 5. Лучистая солнечная энергия – основа получения аэрокосмических изображений естественных объектов	103
Лабораторная работа 6. Информационные основы дистанционного зондирования системы «Земля–атмосфера» из космоса	137
III. Прием и первичная обработка информации метеорологических спутников (МСЗ)	168
Лабораторная работа 7. Использование специальных кодов для передачи исходных данных по слежению за метеорологическими спутниками Земли	171
Лабораторная работа 8. Расчет зоны радиовидимости пункта приема информации и построение диаграммы слежения за метеорологическим спутником Земли	189
Лабораторная работа 9. Определение целеуказаний для слежения за спутником в зоне радиовидимости стационарного автономного пункта приема информации (АППИ)	198
Приложения	208
Приложение 1. Наиболее употребительные константы, используемые при решении задач	208
Приложение 2. Бланк географической карты полярной стереографической проекции	208
Приложение 3. Ответы и решения	209
Литература	225

Учебное издание

Говердовский Валентин Федорович,
Дикинис Александр Владиславович

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«КОСМИЧЕСКАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ»
Часть I. «Спутниковая метеорология»

Редактор Л.В. Ковель
Компьютерная верстка Н.И. Афанасьевой

ЛР № 020309 от 30.12.96

Подписано в печать 03.09.09. Формат 60×90 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,6. Тираж 500 экз. Заказ № 33/09
РГТМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.
ЗАО «НПП «Система», 197045, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., 17/1.

106 = 70